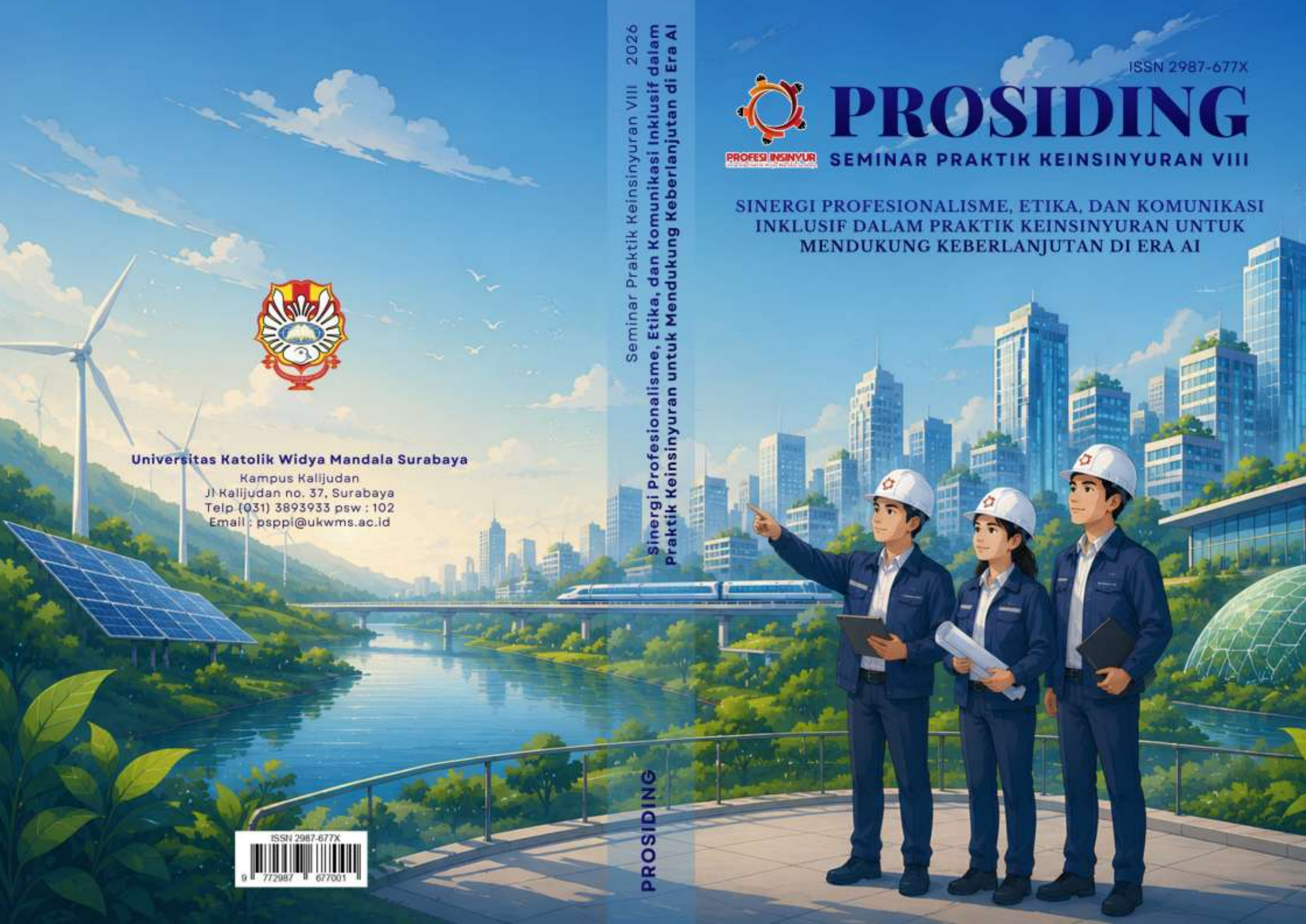
ISSN 2987-677X

PROSIDING

SEMINAR PRAKTIK KEINSINYURAN VIII

SINERGI PROFESIONALISME, ETIKA, DAN KOMUNIKASI INKLUSIF DALAM PRAKTIK KEINSINYURAN UNTUK MENDUKUNG KEBERLANJUTAN DI ERA AI



Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya
Kampus Kalijudan
Jl Kalijudan no. 37, Surabaya
Telp (031) 3893933 psw : 102
Email : psppi@ukwms.ac.id

ISSN 2987-677X

Seminar Praktik Keinsinyuran VIII 2026
Sinergi Profesionalisme, Etika, dan Komunikasi Inklusif dalam Praktik Keinsinyuran untuk Mendukung Keberlanjutan di Era AI
PROSIDING

 ISSN 2987-677x

PROSIDING SEMINAR PRAKTIK KEINSINYURAN VIII

TEMA

SINERGI PROFESIONALISME, ETIKA, DAN KOMUNIKASI INKLUSIF DALAM PRAKTIK KEINSINYURAN UNTUK MENDUKUNG KEBERLANJUTAN DI ERA AI

PENANGGUNG JAWAB

Ketua Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

Dr. Ir. Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng.

TIM REVIEWER

1. Ir. Lusia Permata Sari Hartanti, S.T., M.Eng., CQIA., IPU., ASEAN Eng.
2. Ir. Andrew Joewono, S.T., M.T., IPU., ASEAN Eng.
3. Dr. Ir. Suratno Lourentius, MS., IPM., ASEAN Eng.
4. Ir. Tarsisius Dwi Wibawa Budianta, M.T., IPM.

TIM EDITOR

1. Dra. Ir. Adriana Anteng Anggorowati, M.Si., IPU., ASEAN Eng.
2. Ir. Rasional Sitepu, M.Eng., IPU., ASEAN Eng.
3. Ir. Sandy Budi Hartono, S.T., M.Phil., Ph.D., IPM.

PANITIA

Ketua : Ir. Hartono Pranjoto, M.Sc., Ph.D., IPU., ASEAN Eng., ACPE.

Wakil Ketua : Ir. Andrew Joewono, S.T., M.T., IPU., ASEAN Eng., APEC Eng.

Sekretaris : Cicilia Lola Wahyu Setyaningrum, S.M.

Sie Acara:

1. Ir. Rasional Sitepu, M.Eng., IPU., ASEAN Eng.
2. Dra. Ir. Adriana Anteng Anggorowati, M.Si., IPU., ASEAN Eng.
3. Dr. Ir. Suratno Lourentius, MS., IPM. , ASEAN Eng.

KEYNOTE SPEAKER

Ir. Hartono Pranjoto, M.Sc., Ph.D., IPU., ASEAN Eng., ACPE.

No. ISSN : 2987-677x

Penyelenggara : Program Studi Program Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

Tanggal : 04 Juli 2026

 ISSN 2987-677x

PRAKATA TIM EDITOR

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa. Prosiding yang berisi makalah-makalah yang dipresentasikan dalam Seminar Praktik Keinsinyuran VIII dengan Tema:

SINERGI PROFESIONALISME, ETIKA, DAN KOMUNIKASI INKLUSIF DALAM PRAKTIK KEINSINYURAN UNTUK MENDUKUNG KEBERLANJUTAN DI ERA AI

telah selesai disusun. Editing makalah yang kami lakukan hanya sebatas pada tata tulis atau format penulisan di antaranya batas tepi, penomoran isi, penomoran halaman, penomoran tabel, penomoran gambar, spasi, font, dan kesalahan pengetikan. Kami tidak mengubah isi dari makalah, sehingga orisinalitas, pengambilan sumber referensi, dan seandainya ada plagiat atas karya orang lain merupakan tanggungjawab penulis yang bersangkutan. Semoga semua pihak dapat maklum atas proses panjang yang kami butuhkan. Kami ucapkan terima kasih atas segala bantuan baik moril maupun materiil selama proses editing prosiding Seminar Praktik Keinsinyuran hingga prosiding dapat diterbitkan. Kami juga mohon maaf apa apabila banyak kekurangan dalam editing Seminar Praktik Keinsinyuran ini. dapat diselesaikan, disusun, dan diterbitkan.

Surabaya, 05 Oktober 2026

TIM EDITOR

 ISSN 2987-677x

SAMBUTAN KETUA PANITIA

Selamat pagi, salam damai sejahtera bagi kita semua,

Yang kami hormati:

- Dekan Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya beserta jajarannya,
- *Keynote Speaker*, Ir. Hartono Pranjoto, M.Sc., Ph.D., IPU., ASEAN Eng., ACPE.,
- Para pemakalah dan seluruh peserta Seminar Praktik Keinsinyuran VIII,
- Serta rekan-rekan panitia yang saya banggakan.

Kami mengucapkan puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan rahmat-Nya sehingga Seminar Praktik Keinsinyuran VIII yang bertema "Sinergi Profesionalisme, Etika, dan Komunikasi Inklusif dalam Praktik Keinsinyuran untuk Mendukung Keberlanjutan di Era AI" dapat terselenggara sesuai rencana.

Seminar Praktik Keinsinyuran merupakan agenda wajib serta media publikasi dan diseminasi hasil-hasil praktik keinsinyuran dari calon insinyur dari Program Studi Program Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya.

Dengan bangga, kami menghadirkan *keynote speaker* yang sudah tidak diragukan lagi rekam jejak keinsinyurannya, yaitu Ir. Hartono Pranjoto, M.Sc., Ph.D., IPU., ASEAN Eng., ACPE. Beliau akan memberikan gambaran studi kasus yang melibatkan geopolitik, inovasi teknologi, etika, hingga isu kesehatan, keselamatan kerja, dan lingkungan.

Pada kesempatan ini, kami menyampaikan terima kasih kepada Dekan Fakultas Teknik beserta jajarannya yang telah memberikan dukungan penuh bagi terselenggaranya Seminar Praktik Keinsinyuran VIII ini. Kami juga berterima kasih kepada *keynote speaker*, para pemakalah, serta seluruh panitia yang telah membantu dan berpartisipasi untuk kesuksesan pelaksanaan Seminar Praktik Keinsinyuran VIII ini. Terima kasih sebesar-besarnya kami sampaikan kepada seluruh peserta seminar yang sangat antusias untuk berpartisipasi dalam seminar ini.

Atas nama panitia, kami menyampaikan permohonan maaf atas segala kekurangan dalam pelaksanaan seminar ini.
Selamat berseminar.
Terima kasih.

Surabaya, 04 Juli 2026
Ketua Panitia

 ISSN 2987-677x

SINOPSIS

Seminar Praktik Keinsinyuran merupakan puncak dari integrasi tiga mata kuliah wajib dalam kurikulum Program Studi Profesi Insinyur: Studi Kasus; Pemateri pada Seminar, Workshop, dan Diskusi; serta Praktik Keinsinyuran. Seminar Praktik Keinsinyuran VIII ini mengangkat tema SINERGI PROFESIONALISME, ETIKA, DAN KOMUNIKASI INKLUSIF DALAM PRAKTIK KEINSINYURAN UNTUK MENDUKUNG KEBERLANJUTAN DI ERA AI. Sinergi antara profesionalisme, etika, dan komunikasi inklusif dalam praktik keinsinyuran merupakan fondasi utama para Insinyur Indonesia dalam menerapkan inovasi teknologi dan kecerdasan buatan (AI) secara berintegritas, aman, serta efisien. Upaya ini sangat penting untuk mengatasi berbagai tantangan era modern, seperti pesatnya otomasi digital, kompleksitas Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), isu kelayakan dan integritas struktur bangunan, serta potensi dampak lingkungan di sektor industri. Tema ini dipilih karena sejalan dengan visi keilmuan Program Studi Program Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya (UKWMS), Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), dan tuntutan profesionalisme di era transformasi digital. Insinyur Indonesia memiliki tanggung jawab besar dalam merancang infrastruktur yang andal, mengoptimalkan sistem manufaktur, mengelola lingkungan kerja, dan menciptakan sistem berbasis teknologi yang mendukung pembangunan nasional tanpa mengabaikan etika serta kelestarian lingkungan. Fokus utama penerapan keinsinyuran ini mencakup rekayasa lahan dan pengelolaan limbah berbasis *circular economy*, pengujian dan evaluasi K3 serta keandalan struktur, optimalisasi energi dan sirkulasi udara industri, hingga penerapan sistem monitoring terpadu berbasis IoT dan AI.

 ISSN 2987-677x

DAFTAR ISI

DEWAN REDAKSI ..... **i**

PRAKATA TIM EDITOR ..... **ii**

SAMBUTAN KETUA PANITIA ..... **iii**

SINOPSIS ..... **iv**

DAFTAR ISI ..... **v**

Model Rekayasa Lahan Berbasis Limbah Padat Industri Gula: Evaluasi Dampak terhadap Kesuburan Tanah, Produktivitas, dan Kinerja Finansial 1-5

Pengkajian Kelayakan Dokumen Sertifikat Laik Fungsi (SLF) Gedung Rumah Sakit Swasta di Kota Madiun Oleh CV Nugraha Cipta Sejahtera 6-10

Efektivitas Penggunaan *Fan Axial Low Noise Pulley* dalam Mereduksi Polusi Udara dan Suhu Ruangan (Studi Kasus Industri Pengolahan Karet di Kawasan Manufaktur Gresik) 11-15

Evaluasi Lingkungan Fisik Laboratorium Teknik untuk Kesehatan Kerja dan Profesionalisme 16-20

Analisis *Head*, Kapasitas dan Efisiensi Pompa Sentrifugal 3 Sudu dengan Variasi Bukaan Katub dan RPM Pada Alat Fluida di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Hasyim Asy'ari 21-25

Analisis Perbandingan Efektifitas Penyangga *Drawpoint* Tipe *Lintel Set* dan *Hanging Brow* pada Tambang Bawah Tanah *Grasberg Block Caving* di PT Freeport Indonesia 26-30

Evaluasi Implementasi Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) serta Identifikasi Risiko Kecelakaan Kerja pada Proyek Konstruksi CV Cahaya Berkah Agung 31-35

Analisis Indeks Efektivitas Pembakaran Produksi Batu Bata Merah 36-40

Analisis Kebutuhan dan Kajian Desain Pelampung Penyelamat Nirawak Terkendali (*Remote-Controlled Lifebuoy*) Sebagai Optimalisasi Respons Penanganan *Man Overboard* pada Kapal Perang Republik Indonesia (KRI) 41-46

Rancang Bangun Sistem Kontrol *Submarine Kamikaze* Pendukung Sabotase Bawah Air 47-51

Pengembangan Model *Circular Economy* dan *Zero Waste* pada Sistem Produksi Jamur Tiram Untuk Mendukung *Sustainability* 52-56

Analisis Implementasi *Warehouse Management System* Menggunakan *Personal Device Assistant* pada Perusahaan Distributor untuk Efisiensi Pengelolaan Gudang 57-62

Rancang Bangun Sistem *Monitoring* Pemeliharaan Terpadu KRI di Koarmada II 63-70

Meminimalisir *Cost Overrun* Terhadap Material Struktur Beton Bertulang untuk Proyek Berkelanjutan 71-73

 ISSN 2987-677x

Analisis Kegagalan Pekerjaan *Bored Pile* untuk Mencapai Kedalaman Sesuai *Drawing* 74-78

Analisis Pengaruh Siklus *Sign On – Sign Off* terhadap Keberlanjutan Operasional Kapal Berbendera Indonesia Menggunakan Metode Rasio Ketersediaan Awak Kapal Model Diskrit 79-82

Analisis Pemilihan Manajemen Air Ballas pada Kapal Secara Teknis dan Ekonomis 83-87

Metode Pelaksanaan Pemasangan Gondola Permanen di Apartemen Westown View Surabaya 88-91

Analisis dan Pengembangan Sistem *Maintenance* untuk Meningkatkan Efektivitas Operasional pada Industri Perhiasan Emas dan Logam Mulia di PT Untung Bersama Sejahtera 92-96

Analisis Dampak Pemanfaatan *Shore Connection* dalam Mendukung Pelabuhan Berkonsep *Green Port* 97-101

Evaluasi Pengukuran Geometri Jalan Berdasarkan Pencapaian SDGs *Goal* 9 (Studi Kasus: Ruas Jalan Dusun Paritan Desa Keras Kecamatan Diwek-Jombang) 102-106

Analisis *Delay Hydrostatic Test* Akibat Kebocoran *Tube* dan Implikasinya Terhadap COD & Biaya Proyek PLTU 107-111

Kajian Teknis Perubahan Garis Pantai Pesisir Muara Gembong Bekasi Menggunakan Metode MNDWI dan DSAS pada Citra Sentinel-2A (2019–2025) untuk Mendukung Perencanaan Pengelolaan Wilayah Pesisir 112-116

Analisis Karakteristik Bioplastik dari Limbah Kulit Singkong dengan Variasi Konsentrasi *Chitosan* dan Gliserol sebagai Solusi *Zero Waste* 117-121

Analisis Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Produktivitas Tenaga Kerja pada Proyek Konstruks 122-125

Laporan Evaluasi dan Redesain Sistem Drainase Kawasan Jalan Letjen S. Parman Kelurahan Pakis Banyuwangi untuk Penanggulangan Genangan Banjir 126-128

Studi Kasus Perancangan *Drone Solar Cell* untuk Pengintaian dalam Mendukung Operasi Keamanan Laut 129-133

Dinamika Konflik antara Masyarakat dan Perusahaan Tambang: Studi Kasus Penolakan Tambang di Kecamatan Sampaga, Kabupaten Mamuju 134-139

Efek Sinergis dari *Tapered Constant* (A/V) dan Optimasi Tinggi Balok terhadap Kapasitas Lentur *Tapered I-Beam* 140-144

Tinjauan Daya Dukung Tanah Pada Ruas Jalan Air Besar Desa Batu Merah – Desa Rutong, Kota Ambon 145-148

Desain dan Implementasi *Smart Monitoring System* Berbasis IoT untuk Pemantauan Sistem Energi Terbarukan Secara *Real-Time* 149-153

Optimasi Biaya Distribusi Material Batu Pecah pada Proyek Konstruksi di Kepulauan Maluku 154-158

Rancang Bangun *Airframe Flywing VTOL Bomb Carrier* 159-163

Analisis Suhu Tidak Normal pada Mesin Pendingin Bahan Makanan di Kapal MT. Maritim Khatulistiwa 164-168

 ISSN 2987-677x

Analisis Risiko Kecelakaan Kerja Bongkar Muat dalam Kegiatan *Stevedoring* dengan Metode *Job Safety Analysis* di PT Siam Maspion Terminal 169-173

Integrasi Pembangkit Listrik *Solar Cell* dan Tenaga Uap pada Sistem *Vessel to Grid* (V2G) 174-177

COLMAP *Align*: Penyelarasan *Frame* Koordinat Otomatis pada *Pipeline Real-to-Sim-to-Real* Berbasis 3D *Gaussian Splatting* 178-182

Analisis Prediksi Sisa Umur Perkerasan Menggunakan Metode Mekanistik Empirik 183-187

Rekayasa Hidraulika Saluran *Outlet*: Analisis Kapasitas dan *Bottleneck* pada Sistem Pembuangan Tambak Udang Intensif Berwawasan Berkelanjutan 188-192

Rancang Bangun Sistem *Monitoring* Parameter Cuaca *Real-Time* Berbasis IoT untuk Digitalisasi Data Mikro-Klimat di Kota Kediri 193-197

Pengaruh Kecepatan *Change Over Layout* terhadap Produktivitas *Line Sewing* di Perusahaan *Manufacture* Sepatu 198-202

Evaluasi Desain *Ramp Pedestrian* Kawasan Pusat Perkantoran X terhadap Aksesibilitas Universal dan Kinerja Evakuasi dalam Mendukung Prinsip *Green Building* 203-207

Pembuatan *Standart* Prosedur Operasional pada Depo Container PT Duanta Adji Sejahtera dengan Menggunakan Metode JSA 208-210

Studi Kasus Pelaksanaan Persyaratan K3 Kelistrikan Instalasi Distribusi dan Pemanfaatan Tenaga Listrik (IPTL) di Gedung Manajemen PT “S” Surabaya 211-215

Perbandingan Kinerja *Paving Block* Biasa dan Porous Ditinjau dari Komposisi Penyusun, Variasi Bentuk, dan Ketahanan Struktur dalam Mendukung Infrastruktur Ramah Lingkungan 216-220

Evaluasi Penggunaan *Sheet Pile* dalam Menjaga Integritas Bangunan Eksisting pada Pelaksanaan Proyek Rumah Sakit Petrokimia Gresik-Driyorejo 221-225

Kajian Peran Informasi Cuaca Maritim dalam Perencanaan Keberangkatan Kapal: Studi Kasus Tenggelamnya KMP Tunu Pratama Jaya di Selat Bali 226-228

Strategi Pengendalian Tenaga Kerja pada Proyek Pembangunan *Offshore Patrol Vessel* (OPV) di Galangan Kapal Batam 229-232

Penerapan *Ground Anchor Prategang* untuk Peningkatan Faktor Keamanan Lereng pada Lingkungan Tropis Basah: Studi Kasus Jalan Tol Gempol–Pandaan 233-238

Perancangan Sinergi Radar IMSS dan Senjata MLRS Marinir dalam Transformasi Pertahanan Pantai di Wilayah ALKI 239-243

Penyusunan *Master Plan* Penanganan Jalan Berbasis Survei Elevasi dan Identifikasi Kerusakan Perkerasan di Wilayah Peganden Manyar Kabupaten Gresik 244-248

Peran Sinergis *Silica Fume* dan *Plasticiser* dalam Meningkatkan Mutu Tekan Beton 249-252

Korelasi Nilai *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) dengan Nilai California *Bearing Ratio* (CBR) pada Lapisan Tanah *Subgrade* 253-255

 ISSN 2987-677x

Mitigasi Risiko Ergonomi dan Teknis: Evaluasi Implementasi Keselamatan Kerja pada Manufaktur di PT Duta Bangsa Mandiri Pasuruan 256-260

Optimalisasi *Physical Availability* Komatsu HD785-7 melalui Pengendalian *Breakdown Unscheduled Retorque Stud Bolt Tyre* di PT Bagas Bumi Persada *Site* Tuhup 261-265

Implementasi *Single Varnish* Sebagai Solusi Pengurangan *Defect Scratch* dan Efisiensi Biaya pada Proses *Hot Stamping Tube* Plastik Diameter 40 di PT Lamipak Primula Indonesia 266-269

Analisis Variasi Metode Kerja dalam Penghentian Pengisian Bubuk Kopi Saat Pergantian *Roll* dan Pengaruhnya Terhadap Peningkatan *Waste* pada Lini *Packing* 270-271

Analisis dan Optimalisasi Sistem Informasi *Collection* dalam Menekan Kredit Bermasalah pada PT Bank Mandiri (Persero) Tbk 272-276

Analisis Kekuatan dan Kekakuan *Ban Airless* pada Skuter Elektrik sebagai Penarik Kursi Roda untuk Mempermudah Pengoperasian oleh Pasien Difabel 277-280

Evaluasi Tekno-Lingkungan Konstruksi Modular Baja Prefabrikasi pada Proyek dengan Sumber Daya Terbatas: Studi Kasus Gedung Penyimpanan Arsip..... 281-285

Evaluasi Kapasitas Spasial dan Simulasi Mitigasi *Overcapacity* Zona Labuh di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya 286-290

Pengaruh Jumlah Tenaga Kerja Terhadap Keterlambatan Pekerjaan Gedung Konstruksi PT J..... 291-295

Prosiding Seminar Praktik Keinsinyuran VIII (2026)
Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya
ISSN 2987-677x

Model Rekayasa Lahan Berbasis Limbah Padat Industri Gula: Evaluasi Dampak terhadap Kesuburan Tanah, Produktivitas, dan Kinerja Finansial

Yudhi Galih Prathama[1] Andrew Joewono[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ andrew_sby@ukwms.ac.id

Industri gula menghasilkan limbah padat blotong yang berpotensi mencemari lingkungan, namun juga dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi model rekayasa lahan berbasis blotong yang diimplementasikan PT Kebon Agung pada periode 2016–2020 terhadap kesuburan tanah, produktivitas tebu, serta kinerja finansial perusahaan dan petani. Metode penelitian menggunakan kombinasi *desk study* dan studi lapangan melalui observasi, wawancara, *Focus Group Discussion*, serta penyebaran kuesioner kepada 200 petani. Analisis persepsi petani menggunakan Skala Likert untuk mengukur tingkat kepuasan dan loyalitas terhadap program. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan bahan organik dari blotong meningkatkan kandungan bahan organik tanah sebesar 137%, dari kurang dari 2% menjadi lebih dari 2%, sehingga memperbaiki struktur tanah dan kapasitas menahan air. Produktivitas tebu meningkat 9,7%, dari rata-rata 77,4 ton/ha menjadi 84,8 ton/ha. Persepsi petani sangat positif dengan tingkat loyalitas 84,0–92,9 %. Dari aspek ekonomi, program ini menghasilkan tambahan pendapatan perusahaan sebesar Rp3,20 miliar. Petani juga memperoleh tambahan pendapatan sebesar Rp3,52–5,12 juta per ha. Program kemudian dilanjutkan pada periode 2021–2025 dengan fokus pada intensifikasi lahan serta pemisahan anggaran dari kegiatan *landfill* agar implementasi program lebih efektif dan berkelanjutan.

Kata kunci: blotong, rekayasa lahan, bahan organik, produktivitas tebu, kinerja finansial

Pendahuluan

Industri gula nasional menghasilkan limbah padat (blotong) yang berpotensi mencemari lingkungan. Pada tahun 2020, kedua Pabrik Gula (PG) di bawah naungan PT Kebon Agung menghasilkan 83.000 ton blotong. Akumulasi limbah tersebut memerlukan lahan pembuangan yang luas serta menimbulkan biaya operasional tambahan sehingga perlu dikelola secara berkelanjutan.

Blotong merupakan limbah organik dengan kandungan bahan organik tinggi dan berpotensi dimanfaatkan sebagai pupuk organik. Penelitian membuktikan bahwa aplikasi blotong dapat meningkatkan bahan organik tanah serta memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Perbaikan kesuburan tanah ini sangat penting mengingat lahan tebu semakin bergeser ke lahan kering dengan tingkat kesuburan rendah.

Studi Muhsin (2011) menunjukkan bahwa pupuk organik dari limbah industri gula memberikan manfaat bagi kesuburan tanah dan tanaman, nilai ekonomi bagi masyarakat, serta solusi pencemaran lingkungan. Percobaan di PG Kebon Agung dengan dosis 48 ton/ha meningkatkan produksi tebu hingga 153 %, sementara di PG Trangkil dengan dosis 28 ton/ha terjadi peningkatan 44 %.

Menyadari potensi tersebut, PT Kebon Agung menginisiasi Program Rekayasa Lahan (2016-2020) dengan mendistribusikan kompos, blotong, dan abu ketel ke lahan tebu petani. Dosis yang diterapkan sebesar 4 ton/ha untuk kompos dan 8 ton/ha untuk blotong. Program ini merespons hasil analisis tahun 2015 yang menunjukkan rata-rata kandungan bahan organik tanah hanya 0,91% (sangat rendah), sementara tanah subur memerlukan 2,5-4%. Implementasi program berhasil menyerap blotong secara signifikan (38,6 % di PG Kebon Agung dan 52,9 % di PG Trangkil pada tahun 2019). Analisis tahun 2017 menunjukkan peningkatan bahan organik tanah sebesar 137 %. Keberhasilan awal ini mendorong perlunya evaluasi komprehensif dampak program terhadap kesuburan tanah, produktivitas tebu, dan manfaat ekonomi.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi model rekayasa lahan berbasis blotong yang diimplementasikan PT Kebon Agung pada tiga aspek: pengaruh terhadap kesuburan tanah, keberlangsungan produktivitas tebu, serta *revenue* yang diperoleh perusahaan. Ruang lingkup mencakup realisasi 2016-2020 dan rencana keberlanjutan 2021-2025 di PG Kebon Agung dan PG Trangkil.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kombinasi *desk study* dan studi lapangan. *Desk study* menganalisis dokumen perencanaan dan distribusi bahan organik, sedangkan studi lapangan memperoleh data primer melalui observasi, wawancara, dan FGD dengan pemangku kepentingan.

- **Variabel Penelitian**: Variabel utama terdiri atas teknis (dasar hukum, mekanisme pelaksanaan, data

 ISSN 2987-677x

produktivitas, sebaran lokasi) dan sosial ekonomi (loyalitas petani, dampak lingkungan).

- **Fokus analisis mencakup lima aspek:** (1) Dasar hukum, (2) Pelaksanaan program (mekanisme CPCL, jadwal, verifikasi GPS, pelaporan), (3) Manfaat terhadap produktivitas lahan, (4) Aspek sosial melalui kuesioner pada 200 petani dengan Skala Likert, dan (5) Aspek finansial (biaya program dan pendapatan perusahaan).
- **Metode Pengumpulan dan Analisis Data**: Tiga pendekatan utama: (1) Telaah dokumen internal perusahaan, (2) Analisis kesesuaian lahan, dan (3) Forum Group Discussion (FGD). Data dianalisis secara deskriptif kuantitatif dan kualitatif.

Hasil Kerja

Aspek Hukum Program Rekayasa Lahan

Program Rekayasa Lahan didasari kajian kelayakan komprehensif. Percobaan Pramono dan Enggarianto (2007) membuktikan blotong dan abu ketel meningkatkan tinggi tebu 135%, anakan 200%, dan akar 328%. Santoso dkk. (2018) melaporkan peningkatan pertumbuhan akar 45%. Analisis P3GI (2015) menunjukkan kandungan bahan organik tanah hanya 0,91% (sangat rendah), memerlukan masukan 8-9 ton/ha per tahun. Survei petani PG Trangkil menunjukkan 89% mendukung program, dengan usulan subsidi 50%.

Percobaan di PG Kebon Agung (blotong 48 ton/ha) meningkatkan produksi 153%, kompos 3-8 ton/ha meningkatkan 117-142%. Di PG Trangkil, blotong 28 ton/ha meningkatkan 44%, kompos 3 ton/ha meningkatkan 136%. Hartono dkk (2016) menyatakan bahan organik 10 ton/ha optimal. Muhsin (2011) menegaskan pupuk organik limbah gula bermanfaat bagi tanah, ekonomi, dan lingkungan.

Berdasarkan kajian, Direksi menerbitkan SK No. 64/SK/DIR/VIII/2015 dan SOP Distribusi dengan Surat Pernyataan Petani. North (1990) menegaskan aturan formal dan kelembagaan berperan penting dalam memastikan keberhasilan implementasi suatu kebijakan atau program.

Aspek Pelaksanaan Program

Pelaksanaan program diawali dengan penyusunan daftar Calon Petani dan Calon Lahan (CPCL) berdasarkan beberapa kriteria, yaitu kandungan bahan organik tanah ≤2%, tingkat loyalitas petani terhadap pabrik gula, sistem pergiliran lahan, serta komitmen penggilingan tebu di pabrik gula setempat. World Bank (2004) menekankan kriteria jelas untuk dampak optimal. Jadwal distribusi disusun Litbang berdasarkan CPCL, ditandatangani petugas, dan diserahkan ke penyedia jasa. Distribusi menggunakan *dumptruck* dengan jadwal 15 hari. Ballou (2004) menyatakan praktik ini meningkatkan akurasi perencanaan. Biaya distribusi ditanggung perusahaan. Setiap armada dilengkapi stiker informasi dan nomor pengaduan. Pengiriman didokumentasi dengan surat jalan dan foto berkoordinat GPS. Aker (2011) menyatakan GPS meningkatkan transparansi program. Disiplin prosedur tinggi dengan verifikasi GPS sebagai syarat pembayaran. OECD (2016) merekomendasikan digitalisasi rantai pasok pertanian. Realisasi areal mencapai 7.086 ha (41 %) di PG Kebon Agung dan 12.353 ha (94%) di PG Trangkil, total 19.439 ha. Perbedaan disebabkan dosis blotong (5 rit vs 2 rit) dan penggabungan anggaran dengan landfill. Pressman dan Wildavsky (1984) menyatakan implementasi terkendala fragmentasi anggaran.

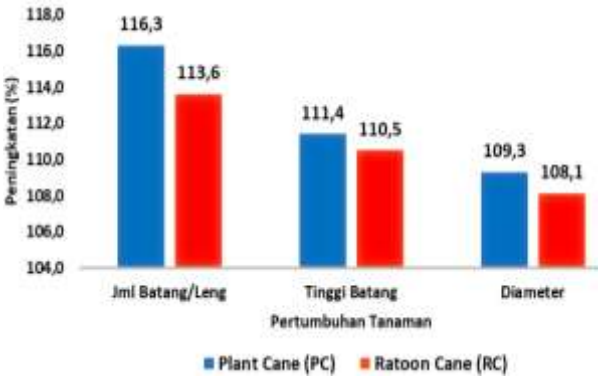
Aspek Manfaat Program

Pengaruh terhadap Kesuburan Tanah

Analisis kandungan bahan organik tanah tahun 2017 di wilayah PG Kebon Agung menunjukkan peningkatan signifikan sebesar 137% setelah program rekayasa lahan. Kandungan bahan organik awal yang berada <2% berhasil ditingkatkan menjadi >2%. Peningkatan ini sangat berarti karena bahan organik berfungsi memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah, menghasilkan struktur lebih remah, kapasitas menahan air lebih baik, serta aktivitas mikroorganisme lebih tinggi yang mendukung ketersediaan hara bagi tebu.

Hasil ini sejalan dengan penelitian Mahmud dkk (2019) yang melaporkan aplikasi blotong 40 ton/ha selama tiga tahun meningkatkan bahan organik tanah dari 1,2% menjadi 2,8% di lahan tebu Kabupaten Malang. Sari dkk (2020) menunjukkan kompos blotong 20 ton/ha meningkatkan C-organik tanah 65% dibanding kontrol. Widodo dkk (2018) melaporkan aplikasi blotong meningkatkan populasi bakteri pelarut fosfat dan penambat nitrogen hingga tiga kali lipat.

Peningkatan 137% tergolong sangat signifikan karena dosis aplikasi relatif tinggi dan sifat blotong kaya lignoselulosa yang terdekomposisi lambat, berkontribusi pada akumulasi bahan organik tanah (Alexander, 1977). Stevenson (1994) menjelaskan bahan organik berperan sebagai sumber energi mikroorganisme, agen pembentuk agregat tanah, dan peningkat kapasitas tukar kation, sehingga memberikan manfaat jangka panjang bagi keberlanjutan produktivitas lahan.



Gambar 1. Peningkatan Bahan Organik Tanah setelah Rekayasa Lahan

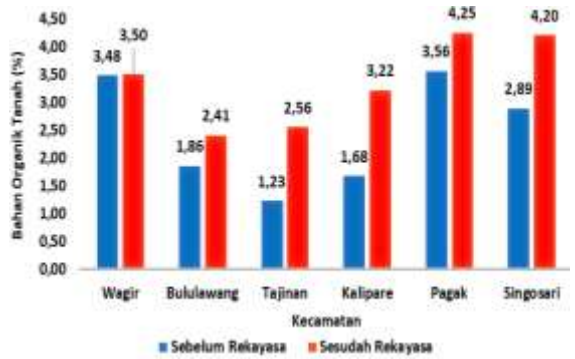
 ISSN 2987-677x

Pengaruh terhadap Produktivitas Lahan

Pengamatan pada tanaman tebu pertama (*Plant Cane*) dan keprasan (*Ratoon Cane*) menunjukkan peningkatan seluruh parameter pertumbuhan. Jumlah batang per leng pada tanaman pertama meningkat 116,3% (92 menjadi 107 batang), pada keprasan meningkat 113,6% (103 menjadi 117 batang). Tinggi batang pada keprasan meningkat 111,4% (2,02 menjadi 2,25 meter), pada tanaman pertama meningkat 110,5% (2,09 menjadi 2,31 meter). Diameter batang pada tanaman pertama meningkat 109,3% (2,3 menjadi 2,5 cm), pada keprasan meningkat 108,1% (2,4 menjadi 2,6 cm).

Hasil ini sejalan dengan Syaiful dkk (2017) yang menemukan aplikasi blotong 30 ton/ha meningkatkan tinggi tanaman 27% dan diameter batang 15%. Prasetyo dkk (2019) melaporkan kompos blotong 15 ton/ha meningkatkan jumlah batang per rumpun dari 8 menjadi 10 batang. Peningkatan jumlah anakan dan batang penting karena berkorelasi langsung dengan populasi tanaman dan produktivitas per ha (Barnes, 1974).

Peningkatan parameter pertumbuhan berdampak pada produktivitas tebu yang meningkat rata-rata 109,7%, dari 77,4 ton/ha menjadi 84,8 ton/ha. Bagi perusahaan, peningkatan ini berarti pasokan bahan baku giling lebih besar sehingga kapasitas pabrik optimal. Bagi petani, berarti peningkatan pendapatan usahatani. Hasil ini lebih tinggi dibanding temuan Yusuf dkk (2018) yang melaporkan peningkatan produktivitas 23% setelah aplikasi blotong 25 ton/ha di lahan kering Lombok. Perbedaan ini disebabkan kondisi awal tanah lebih marjinal (bahan organik <1%) sehingga respon lebih besar sesuai hukum hasil semakin menurun (Tisdale dkk., 1993). Dosis lebih tinggi dan kombinasi blotong, abu ketel, dan kompos memberikan efek sinergis terhadap perbaikan sifat tanah.



Gambar 2. Pengaruh Rekayasa Lahan Terhadap Pertumbuhan Tanaman Tebu

Penilaian Petani terhadap Program

Evaluasi aspek sosial melalui kuesioner kepada 100 petani di masing-masing PG Kebon Agung dan PG Trangkil meliputi parameter keterandalan, responsivitas, kepastian pelayanan, loyalitas, dan dampak lingkungan. Pada PG Kebon Agung, parameter keterandalan mendapat penilaian sangat setuju (81,8-88,3%). Parameter responsivitas memperoleh setuju hingga sangat setuju (66,1-85,3%), dengan penilaian terendah pada kepastian waktu pengiriman (42,6% tidak setuju). Parameter *assurance* memperoleh setuju (64,4-79,8%), dengan kelancaran pengiriman sesuai jadwal perlu dievaluasi ulang. Parameter loyalitas sangat tinggi (84,0-92,9%), menunjukkan minat petani terhadap program dan keinginan menggunakan blotong di masa mendatang.

Parameter dampak lingkungan beragam: penambahan blotong dinilai baik untuk pertumbuhan tebu (42,6% setuju, 53,5% sangat setuju), dosis dinilai mencukupi (49,5% setuju, 23,8% sangat setuju), namun blotong dirasa mengganggu warga sekitar kebun (skala 55,8% atau ragu-ragu), mengindikasikan perlunya penanganan dampak lingkungan distribusi.

Hasil kuesioner di PG Trangkil menunjukan pola yang relatif serupa dengan PG Kebon Agung, dimana tingkat keandalan program dinilai sangat baik oleh sebagian besar responden. (81,6-85,2%), responsivitas setuju hingga sangat setuju (76,0-86,0%), *assurance* setuju (71,2-81,2%), loyalitas sangat tinggi (84-92,9%). Perbedaan signifikan pada kecukupan dosis, dimana 37% tidak setuju dan 20% sangat tidak setuju bahwa dosis mencukupi, mengindikasikan perlunya evaluasi dosis di PG Trangkil.

Tingginya loyalitas mencerminkan keberhasilan program membangun kepercayaan jangka panjang, sejalan dengan teori pemasaran hubungan Morgan dan Hunt (1994) bahwa komitmen dan kepercayaan merupakan kunci hubungan saling menguntungkan. Hernanto dkk. (2020) juga menemukan petani yang mendapat dukungan sarana produksi cenderung lebih loyal memasok tebu ke pabrik. Dua parameter utama perlu perbaikan: (1) kepastian jadwal dan kesesuaian jumlah pengiriman perlu ditingkatkan melalui perencanaan dan komunikasi lebih baik, serta (2) dampak lingkungan terhadap warga perlu penanganan lebih baik, misalnya pengaturan waktu pengiriman atau penanganan debu transportasi, mengingat pentingnya aspek lingkungan sesuai Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009.

Aspek Finansial Program

Realisasi Biaya Pelaksanaan

Biaya operasional rekayasa lahan selama lima tahun (2016-2020) mencapai total Rp35,29 miliar, dengan rincian Rp19,96 miliar di PG Kebon Agung dan Rp15,96 miliar di PG Trangkil. Rata-rata biaya per ha mencapai Rp1.815.279, dengan rincian Rp926.566 per ha di PG Kebon Agung dan Rp386.452 per ha di PG Trangkil.

Perbedaan signifikan biaya per satuan luas disebabkan beberapa faktor. Di PG Kebon Agung, dosis blotong lebih tinggi (5 rit/ha dibanding 2 rit di PG Trangkil). Pada 2016-2018, PG Kebon Agung menggunakan skema satu harga angkutan Rp525.000/rit untuk semua jarak, lalu beralih ke sistem zonasi empat

 ISSN 2987-677x

zona pada 2019 dengan tarif Rp135.000 hingga Rp690.000 /rit. Penggabungan anggaran program dengan anggaran *landfill* sejak 2019 juga mengurangi alokasi untuk perluasan areal.



Gambar 3. Akumulasi Biaya dan Luas Areal Realisasi Rekayasa Lahan

Pada PG Trangkil, biaya per ha lebih rendah karena dosis blotong 2 rit/ha dan penerapan sistem zonasi tiga zona sejak 2018 dengan tarif Rp391.250 hingga Rp608.500/rit. Sistem zonasi yang konsisten memungkinkan pengendalian biaya distribusi lebih efisien dibanding sistem tarif per kecamatan sebelumnya. Bowersox dkk (2013) menyatakan biaya transportasi dapat diminimalkan dengan optimalisasi rute, dan Kurniawan dkk (2019) menemukan sistem zonasi mampu mengurangi biaya logistik hingga 23%.

Tabel 1. Analisis Peningkatan Produksi dan Manfaat Ekonomi yang Diperoleh Perusahaan dari Program Rekayasa

NO.	URAIAN	SAT.	UNIT	
			PG KEBON AGUNG	PG TRANGKIL
1.	Luas Rekayasa :	ha	973	1.819
	a. Tebu Rakyat (TR)	ha	827	1.447
	b. Tebu Sendiri (TS)	ha	46	372
2.	Kenaikan Produksi	ton/ha	7,4	5,9
	a. Tebu Rakyat (TR)	ton	6.860	8.537
	b. Tebu Sendiri (TS)	ton	342	2.195
	c. Jumlah	Ton	7.202	10.733
3.	Rendemen			
	a. Tebu Rakyat (TR)	%	8,50	7,38
	b. Tebu Sendiri (TS)	%	9,55	8,67
4.	Perolehan Gula			
	a. BH Gula PG asal TR	%	27	30
	b. Gula PG asal			
	b.1. Tebu Rakyat (TR)	Ton	157,90	189,58
	b.2. Tebu Sendiri (TS)	Ton	32,75	190,91
	c. Jumlah	Ton	190,65	380,49
5.	Perolehan Tetes			
	a. Tetes PG asal			
	a.1. Tebu Rakyat (TR)	Ton	205,79	256,12
	a.2. Tebu Sendiri (TS)	Ton	20,51	131,72
	b. Jumlah	Ton	226,31	387,84
6.	Harga Gula	Rp./Ton	10.300.000	10.300.000
7.	Harga Tetes	Rp./Ton	1.500.000	1.500.000
8.	Pendapatan			
	a. Gula	Rp.	1.963.717.617	3.919.090.295
	b. Tetes	Rp.	339.460.200	581.763.600
	c. Jumlah	Rp.	2.303.177.817	4.500.853.895
9.	Biaya			
	a. Tebu Rakyat (TR)	Rp.	1.955.128.500	1.204.038.250
	b. Tebu Sendiri (TS)	Rp.	102.901.500	339.502.000
	c. Jumlah	Rp.	2.058.030.000	1.543.540.250
10.	Revenue	Rp.	245.147.817	2.957.313.645

***Revenue* bagi Perusahaan dan Petani**

Program meningkatkan produktivitas lahan yang berdampak pada kenaikan produksi gula dan tetes. Di PG Kebon Agung, penambahan produksi Tebu Rakyat 7,4 ton tebu per ha setara 0,17 ton gula dan 0,22 ton tetes per ha. Di PG Trangkil, penambahan 5,9 ton tebu per ha setara 0,13 ton gula dan 0,18 ton tetes. Pada Tebu Sendiri, penambahan gula di PG Kebon Agung 0,71 ton/ha dan tetes 0,44 ton, sementara di PG Trangkil 0,51 ton gula dan 0,35 ton tetes per ha.

Berdasarkan harga gula Rp10,3 juta per ton dan tetes Rp1,5 juta per ton (2019), penambahan pendapatan perusahaan di PG Kebon Agung Rp2,30 miliar dan PG Trangkil Rp4,50 miliar. Setelah dikurangi biaya program (Rp 2,06 miliar di PG Kebon Agung dan Rp1,54 miliar di PG Trangkil), diperoleh pendapatan perusahaan Rp245 juta di PG Kebon Agung dan Rp2,96 miliar di PG Trangkil, total Rp3,20 miliar. Manfaat tidak berwujud lainnya adalah meningkatnya loyalitas petani mitra.

Rasio keuntungan terhadap biaya (*benefit-cost ratio*) mencapai 2,92 di PG Trangkil (setiap Rp 1 investasi menghasilkan Rp2,92 pendapatan), sementara di PG Kebon Agung 1,12 karena biaya per ha lebih tinggi dan penggabungan anggaran *landfill*. Sutrisno dkk (2018) melaporkan rasio serupa 1,8-2,3 di PG Jombang tergantung jarak lahan dari pabrik.

Petani juga merasakan tambahan pendapatan. Dengan bagi hasil gula 73% di PG Kebon Agung dan 70% di PG Trangkil, petani PG Kebon Agung mendapat tambahan 0,46 ton gula dan 0,22 ton tetes per ha (senilai Rp5,12 juta), sementara petani PG Trangkil mendapat 0,31 ton gula dan 0,18 ton tetes per ha (senilai Rp 3,52 juta). Dibanding UMR Jawa Tengah 2019 (Rp25,2 juta per tahun), tambahan ini setara 14-20% pendapatan tahunan, insentif signifikan bagi rumah tangga petani (Ellis, 1998).

Tabel 2. Analisis Peningkatan Produksi dan Pendapatan Petani dari Program Rekayasa

NO.	URAIAN	SAT.	UNIT	
			PG KEBON AGUNG	PG TRANGKIL
1.	Luas Rekayasa			
	a. Tebu Rakyat (TR)	ha	927	1.447
2.	Kenaikan Produksi	ton/ha	7,4	5,9
	a. Tebu Rakyat (TR)	ton	6.860	8.537
3.	Rendemen			
	a. Tebu Rakyat (TR)	%	8,50	7,38
4.	Perolehan Gula			
	a. BH Gula asal TR	%	73	70
	b. Gula Milik Petani	ton	426,9	442,4
5.	Perolehan Tetes			
	a. Tetes Milik Petani	%	3	3
	b. Jumlah Tetes Petani		205,79	256,12
6.	Harga Gula	Rp./Ton	10.300.000	10.559.000
7.	Harga Tetes	Rp./Ton	1.700.000	1.656.000
8.	Pendapatan Petani			
	a. Gula	Rp.	4.397.353.680	4.670.879.544
	b. Tetes	Rp.	349.849.800	424.645.302
9.	Revenue	Rp.	4.747.203.480	5.095.524.846
		Rp./Ha	**5.121.039**	**3.521.441**

Kesimpulan

Berdasarkan *monitoring* dan evaluasi program rekayasa lahan periode 2016-2020 di PG Kebon Agung

 ISSN 2987-677x

dan PG Trangkil, disimpulkan bahwa program rekayasa lahan berbasis limbah padat industri gula yang diinisiasi PT Kebon Agung efektif meningkatkan kualitas tanah, produktivitas tebu, serta memberikan manfaat ekonomi bagi perusahaan dan capaian luas areal distribusi bahan organik mencapai 7.086 ha (41%) di PG Kebon Agung dan 12.353 ha (94%) di PG Trangkil, dengan total 19.439 ha.

Program meningkatkan kandungan bahan organik tanah sebesar 111-363%, memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Produktivitas kebun meningkat rata-rata 9,7%, berdampak pada keberlanjutan pasokan bahan baku giling. Aspek sosial menunjukkan dukungan kuat petani terhadap keberlanjutan program, sementara aspek finansial menghasilkan pendapatan perusahaan sebesar Rp1,19 juta per ha.

Berdasarkan keberhasilan tersebut, program direkomendasikan untuk dilanjutkan dengan penyempurnaan: (1) pemisahan anggaran rekayasa lahan dari *landfill* di PG Kebon Agung, (2) penguatan sistem penjadwalan pengiriman, (3) pengembangan program mandiri pengambilan bahan organik oleh petani, dan (4) pengembangan *monitoring* berbasis teknologi digital. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengkaji dampak jangka panjang aplikasi blotong serta pengembangan model kelembagaan partisipatif antara pabrik gula, petani, dan pemerintah daerah.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Direksi PT Kebon Agung atas kepercayaan dan dukungan selama pelaksanaan penelitian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada Manajemen PG Kebon Agung dan PG Trangkil beserta Tim Rekayasa Lahan yang telah memfasilitasi proses pengumpulan data dan koordinasi kegiatan di lapangan. Ucapan terima kasih turut disampaikan kepada para petani tebu di wilayah kerja kedua pabrik gula atas partisipasi aktif dalam pengisian kuesioner, wawancara, dan *Focus Group Discussion*. Penghargaan juga diberikan kepada tim Litbang dan Bina Sarana atas dukungan teknis dan administratif. Semoga hasil kajian ini dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan model pengelolaan limbah industri gula yang berkelanjutan serta peningkatan kesejahteraan petani tebu di Indonesia.

Referensi

Alexander, M. (1977). *Introduction to soil microbiology* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Ballou, R. H. (2004). *Business logistics/supply chain management* (5th ed.). Pearson Prentice Hall.

Barnes, A. C. (1974). *The sugar cane* (2nd ed.). Leonard Hill Books.

Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation.

Ellis, F. (1998). Household strategies and rural livelihood diversification. *The Journal of Development Studies*, *35*(1), 1-38.

Hartono, D., dkk. (2016). Pengaruh bahan organik terhadap pertumbuhan awal tanaman tebu. P3GI.

Hernanto, F., dkk. (2020). Faktor-faktor yang mempengaruhi loyalitas petani tebu. *Jurnal Agribisnis Indonesia*, *8*(1), 45-58.

Hidayat, A., dkk. (2019). Persepsi dan adopsi teknologi pemupukan organik. *Jurnal Penyuluhan*, *15*(2), 189-202.

Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, *7*(5), 5875-5895.

Morgan, R. M., & Hunt, S. D. (1994). The commitment-trust theory of relationship marketing. *Journal of Marketin*g, 58(3), 20-38.

Muhsin, A. (2011). Pemanfaatan limbah pabrik gula untuk pupuk organik. *Jurnal Penelitian Perkebunan*, *12*(2), 85-96.

North, D. C. (1990). *Institutions, institutional change and economic performance*. Cambridge University Press.

P3GI. (2015). *Laporan analisis kandungan bahan organik tanah di wilayah PT Kebon Agung*.

Pambudi, D., dkk. (2017). Optimalisasi dosis abu ketel. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, *15*(1), 42-50.

Pramono, E., & Enggarianto, P. (2007). *Pengaruh media tanam berbasis limbah pabrik gula.* Laporan Penelitian Internal PT Kebon Agung.

Pressman, J. L., & Wildavsky, A. (1984). *Implementation* (3rd ed.). University of California Press.

PT Kebon Agung. (2015). *SK Direksi No. 64/SK/DIR/VIII/2015 tentang Tim Penyusun Roadmap Rekayasa Lahan*.

Rahman, A., dkk. (2020). Respons tebu terhadap aplikasi blotong pada berbagai jenis tanah. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 25(3), 412-421.

Santoso, B., dkk. (2018). Perbaikan sifat fisik tanah ultisol melalui aplikasi blotong. *Jurnal Tanah Tropika*, 23(1), 23-32.

Senge, P. M. (1990). *The fifth discipline*. Doubleday.

Stevenson, F. J. (1994). *Humus chemistry* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Supriyadi, S., & Widijanto, H. (2017). Status bahan organik tanah pada lahan tebu di Jawa Timur. *Jurnal Tanah dan Iklim*, *41*(2), 89-98.

Sutrisno, J., dkk. (2018). Analisis kelayakan finansial program pemberian blotong. *Jurnal Ekonomi Pertanian dan Agribisnis, 2*(4), 289-298.

Tisdale, S. L., dkk. (1993). *Soil fertility and fertilizers* (5th ed.). Macmillan.

Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

World Bank. (2004). *Implementing agricultural input subsidy programs: A guidance note*.

Yuwono, N. W., dkk. (2019). Perubahan sifat tanah akibat aplikasi blotong jangka panjang. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan, 6*(1).

ISSN 2987-677x

Pengkajian Kelayakan Dokumen Sertifikat Laik Fungsi (SLF) Gedung Rumah Sakit Swasta di Kota Madiun oleh CV Nugraha Cipta Sejahtera

Anwar Rachmadi[1] Suratno Lourentius[1,2]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2] Program Studi DIII Teknik Kimia, Politeknik Mangunwijaya Semarang

✉ anwarrachmadi99@gmail.com

✉ suratno.lourentius@gmail.com

✉ suratno.lourentius@ukwms.ac.id

Kebutuhan mendasar aspek kesehatan oleh masyarakat pada saat ini sangat mendorong perkembangan pembangunan gedung khususnya gedung rumah sakit baik yang dikelola oleh Pemerintah maupun swasta. Indonesia merupakan negara rawan gempa bumi karena dilalui oleh jalur pertemuan 3 lempeng tektonik, yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia, dan lempeng Pasifik, tentunya dibutuhkan teknologi dalam menganalisis suatu struktur bangunan telah berkembang dengan memperhatikan risiko terhadap dampak dari bencana. Analisis kelayakan struktur diperlukan untuk meninjau desain awal terhadap kondisi yang diinginkan pada tahap perencanaan dengan melakukan beberapa identifikasi yang sesuai dengan ketentuan standar yang telah ditentukan. Tujuan pelaporan ini adalah menganalisis kelayakan struktur bangunan *existing* dengan meninjau tingkat kerusakan dan simpangan yang terjadi. Metode Analisis kelayakan untuk pemodelan struktur dilakukan berdasarkan investigasi visual, data arsitektur pemanfaatan ruang, data hasil pengujian kuat tekan beton, dan data laporan hasil uji kuat tarik baja. Yang mana seluruh hasil tinjauan di atas terintegrasi di*input* ke dalam perangkat lunak STAAD.Pro V8i (SELECT*series* 6), pcaColumn dan program perhitungan *spreadsheet* excel dengan mengacu pada ketentuan SNI 2847:2019 dan ketentuan lainnya untuk menghasilkan analisis perhitungan struktur pada setiap komponen bangunan. Hasil tinjauan analisis dan data lapangan dari aspek struktural adanya kekurangan kemampuan layanan kombinasi geser dan torsi pada balok beton induk, lendutan jangka panjang pelat beton pada rangkaian struktur *rooftank* dan syarat lebar balok B4 tidak sesuai dengan ketentuan SNI 2847:2019 pasal 18.6.2.1., adanya keretakan dinding ruang AHU OK. Adapun kesimpulan utama dari permasalahan di atas adalah adanya penambahan kapasitas kekuatan struktur yang ada guna tersedianya layanan komponen struktur yang handal untuk jangka panjang.

Kata kunci: kelayakan struktur, kuat tekan, perangkat lunak STAAD.Pro V8i SELECT*series* 6, uji kuat tarik, gedung rumah sakit

Pendahuluan

Seiring dengan pesatnya pembangunan di negara kita dalam merencanakan sebuah bangunan sangat diperlukan analisis yang optimum terhadap kekuatan dan kelayakan suatu struktur demi kepentingan keselamatan pengguna bangunan. Analisis kelayakan struktur dilakukan untuk meninjau desain awal terhadap kondisi yang diinginkan pada perencanaan dengan melakukan beberapa identifikasi yang sesuai dengan ketentuan standar yang telah ditentukan. Metode untuk mengevaluasi kelayakan struktur bangunan dengan melakukan jenis-jenis tindakan dan pengujian yaitu pengamatan visual, pemetaan struktur, dan pengambilan benda uji inti beton (*hammer test*). Analisis respon dinamik untuk perancangan struktur tahan gempa dilakukan jika diperlukan evaluasi yang lebih akurat terhadap gaya-gaya gempa yang bekerja pada struktur, serta untuk mengetahui perilaku dari struktur akibat pengaruh gempa.

Tujuan kajian ini adalah menganalisis kelayakan struktur bangunan eksisting dengan meninjau tingkat kerusakan akibat beban guna gedung, kemampuan layanan seluruh komponen bangunan gedung akibat beban yang bekerja dan simpangan yang terjadi dengan analisis beban-beban yang bekerja akibat penggunaan gedung, respon dinamik dan analisis beban dorong (*pushover*). Metode analisis permodelan bangunan, respon dinamik dan *pushover analysis* dengan bantuan perangkat lunak STAAD.Pro V8i (SELECTseries 6) digunakan dalam kegiatan ini.

Ruang lingkup kajian ini meliputi tinjauan tingkat kerusakan akibat beban guna gedung, kemampuan layanan seluruh komponen bangunan gedung meliputi *upper* maupun *lower* struktur, yang diakibatkan beban guna gedung yang bekerja dan respon dinamik serta

 ISSN 2987-677x

analisis beban dorong (*pushover*). Adapun Objek Studi kelayakan ini dilakukan terhadap Dokumen Sertifikat Laik Fungsi (SLF) Gedung Rumah Sakit swasta di Kota Madiun yang diagendakan setelah satu tahun gedung tersebut difungsikan sebagai salah satu pemenuhan implementasi dasar hukum dari Undang-Undang Nomor 6 Tahun 2023 tentang Penetapan Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang Nomor 2 tahun 2022 tentang Cipta Kerja menjadi Undang-Undang. Secara teknis, UU tersebut mengubah beberapa ketentuan dalam Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung, dan Permen PU Nomor 27/PRT/M/2018 tentang Sertifikat Laik Fungsi Bangunan Gedung yang mana peraturan ini menjadi pedoman teknis pemeriksaan dan penerbitan SLF. Yang kesemuanya harus terpenuhi guna menunjang keberlangsungan aktifitas fungsi gedung rumah sakit ini.

Metode

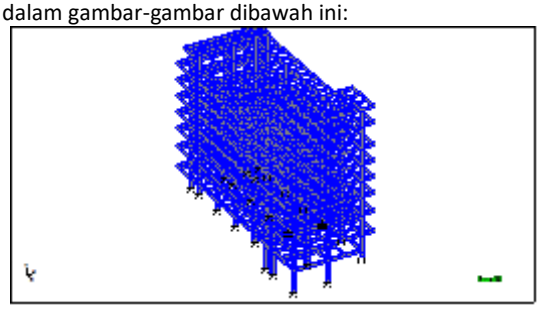
Metode kerja yang dilakukan dalam proses penyusunan laporan kajian ini meliputi:

a. Pengumpulan data dokumen pada saat pelaksanaan pembangunan guna pengkajian struktur secara *analysis* antara lain: gambar terlaksana *(asbuilt drawing)*, hasil *commissioning test* berupa laporan uji tekan karakteristik beton, laporan uji tarik baja beton dan laporan *Pile Driving Analysis* (PDA);
b. Pengumpulan data melalui pengamatan fisik dilapangan *(visual check)* dengan melibatkan petugas teknis dari pihak rumah sakit meliputi sisi arsitektur, struktur, utilitas, aksesibiltas, serta tata bangunan dan lingkungan. Termasuk di dalamnya adalah pengujian kuat tekan beton existing menggunakan *hammer test*, dokumentasi foto dan pengukuran. Kegiatan ini meliputi: pemeriksaan pondasi dan *sloof*, pemeriksaan kolom, pemeriksaan balok, pemeriksaan pelat beton lantai dan pelat beton atap, pemeriksaan kolom profil baja IWF sebagai rangka atap dan Pengukuran *Alignment* Vertikal dan Horizontal Bangunan Gedung menggunakan *Theodolite* untuk mengetahui kondisi kemiringan gedung apabila terjadi;
c. Menganalisis data pengujian dari alat *hammer test* untuk mengetahui keseragaman mutu beton dipermukaan yang ada;
d. Melakukan perhitungan analisis ulang dengan bantuan perangkat lunak STAAD.Pro V8i (SELECTseries 6), pcaColumn dan program perhitungan Spreadsheet Excel sebagai tinjauan dari perhitungan struktur hasil karya perencanaan serta yang diakibatkan dari adanya perubahan desain pada saat pelaksanaan pembangunan;
e. Membuat kesimpulan berdasarkan hasil analisis data dan menyusun rekomendasi yang dapat dipergunakan sebagai salah satu masukan bagi pihak pengelola rumah sakit ini dalam menentukan arah kebijakan selanjutnya.

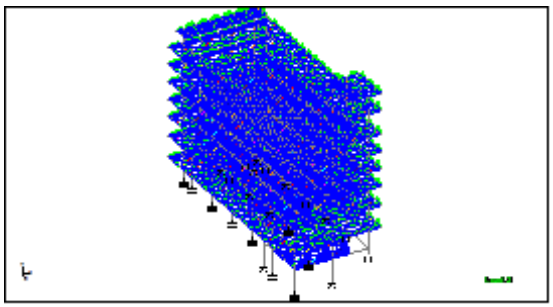
Hasil Kerja

Dari metode analisis data primer yang dilaksanakan menggunakan perangkat lunak STAAD.Pro V8i (SELECT*series* 6) berdasarkan data gambar pelaksanaan/*asbuilt drawing* dan hasil pengamatan di lapangan didapatkan keluaran/ *output* sebagai berikut:

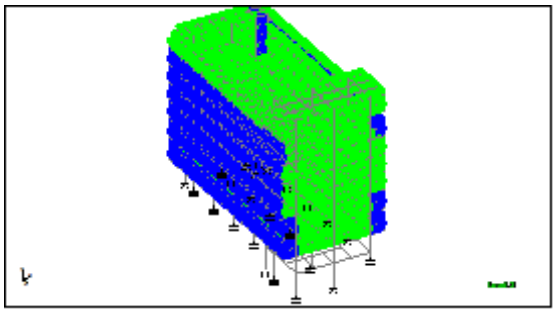
1. Gambar permodelan bangunan dan kriteria masing-masing kondisi pembebanan sebagaimana tertuang dalam gambar-gambar dibawah ini:



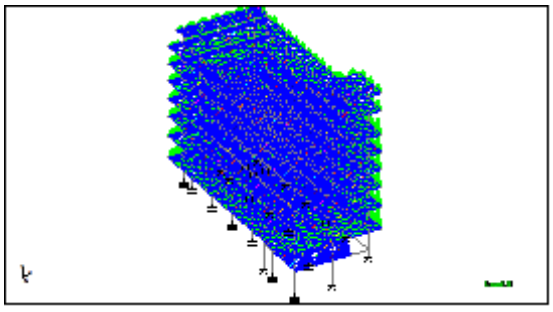
Gambar 1. Pemodelan 3D



Gambar 2. Pemodelan *Input* Beban Mati Pelat Lantai

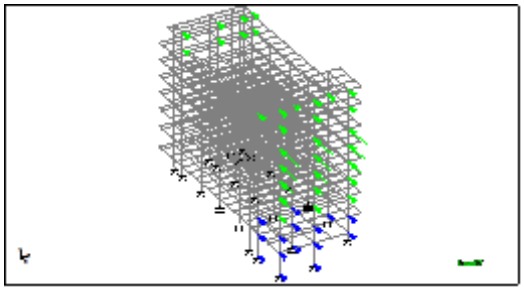


Gambar 3. Pemodelan *Input* Beban Dinding

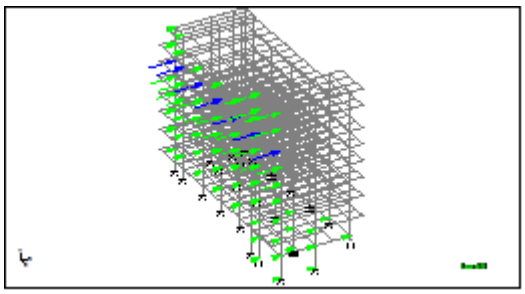


Gambar 4. Pemodelan *Input* Beban hidup

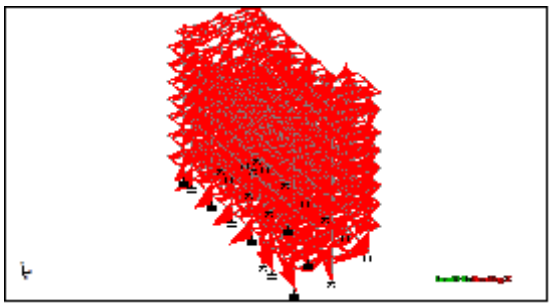
 ISSN 2987-677x



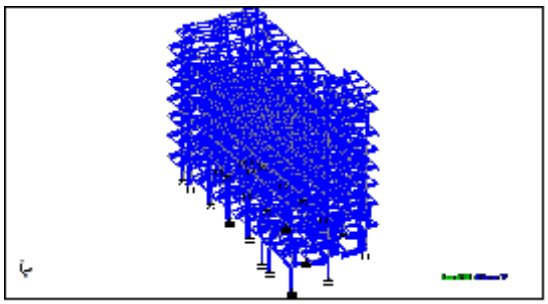
Gambar 5. Permodelan *Input* Beban Horizontal Arah Y



Gambar 6. Permodelan *Input* Beban Horizontal Arah X



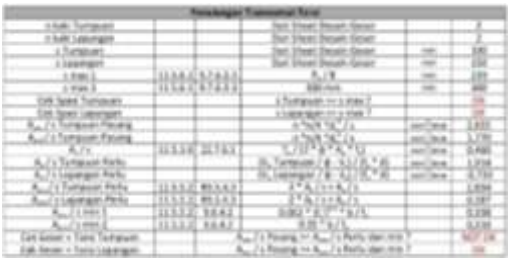
Gambar 7. Output *Bending Moment* Diagram



Gambar 8. *Output Shear Force* Diagram

2. Keluaran/*output* gaya-gaya dalam meliputi: *Bending Moment, Shear Force* dan *Axial Force* yang bekerja pada setiap batang/*element* kerangka bangunan, dimasukkan ke dalam program pcaColumn dan perhitungan Spreadsheet Excel. Sehingga didapatkan hasil analisis perhitungan yang menunjukkan adanya ketidakmampuan layanan kapasitas beberapa komponen struktural meliputi:
   a. Ketidakmampuan layanan balok beton B1 pada area pelat beton rooftank akibat kombinasi gaya geser dan torsi pada daerah tumpuan. Hal ini akan menyebabkan pada titik beton yang tidak terisi tulangan yang memadai akan mengalami keretakan diagonal akibat puntiran (*torsi*) karena tarikan. Hal ini ditunjukkan pada hasil analisis perhitungan pada tabel di bawah ini:

Tabel 1. Perhitungan Kapasitas Torsi dan Geser Balok B1



   b. Pelat beton *roof tank* dengan kapasitas lentur $ØM_n > M_u$ dalam kondisi mampu menahan beban yang bekerja. Namun nilai lendutan pelat beton dalam jangka panjang melebihi dari syarat lendutan jangka panjang pada ketentuan SNI 2847:2019. Sehingga pelat beton akan melendut dari akibat beban yang bekerja atau hal ini bisa diakibatkan dari kesalahan desain tentang penentuan tebal pelat beton. Hal ini ditunjukkan pada hasil analisis perhitungan pada tabel di bawah ini:

Tabel 2. Perhitungan Kapasitas Pelat Beton *Rooftank*

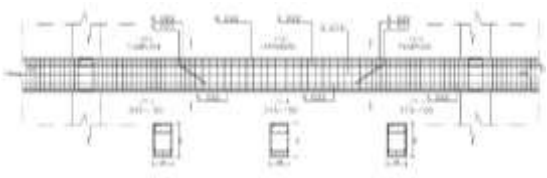


   c. Hasil pengamatan di lapangan menunjukkan adanya keretakan dinding semi *vertical* ruang sentral AHU pada ruang OK. Hal ini disebabkan dinding luar menerima panas matahari, hujan, dan tiupan angin setiap hari sehingga mengalami pemuaian dan penyusutan berulang.

Kesimpulan

1. Pada permasalahan poin "a" di bawah ini disampaikan beberapa rekomendasi solusi yang sedapatnya bisa menjadikan referensi di dalam menjaga kestabilan konstruksi yang sudah terpasang agar dampak yang akan terjadi bisa dihindari adalah sebagai berikut:
   a. Pemasangan tulangan lentur pada titik peralihan moment *negative* ke moment positif jika melihat *asbuild drawing* sudah terpasang miring. Sehingga hal ini dianggap memasang tulangan sengkang miring *(diagonal)* yang sangat efektif untuk menahan retak geser diagonal. Hal ini diilustrasikan sebagaimana pada gambar di bawah ini:

 ISSN 2987-677x



Gambar 8. Pemasangan Sengkang Miring

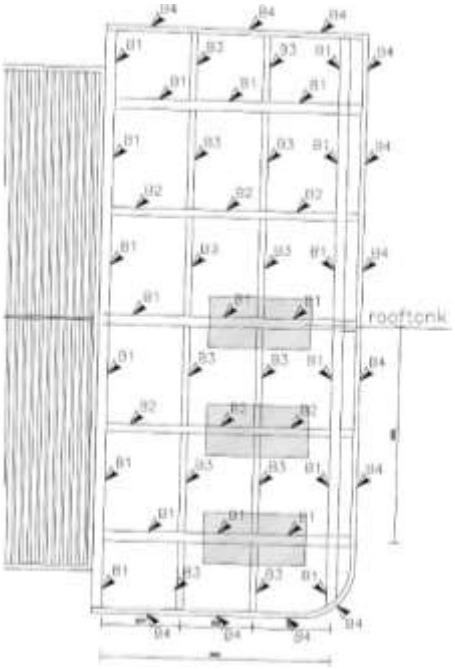
Dari sisi biaya pemilihan metode ini dianggap yang efisien dikarenakan sudah terpasang dilapangan sehingga tidak perlu mengeluarkan biaya produksi konstruksi kembali. Namun, di sisi lain kapasitas kuat geser dan torsi dengan sengkang miring dianggap kurang *maximal* karena pada posisi yang terlalu ke tengah balok, yang mana gaya geser terbesar adalah terjadi di ujung balok.

b. Pemasangan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) pada daerah tumpuan balok. Pemilihan metode ini sangat efektif dikarenakan bisa memberikan kontribusi tambahan layanan kapasitas kuat geser dan torsi pada balok. Secara rinci material CFRP ini adalah material yang memiliki kuat Tarik sangat tinggi, ringan, tidak berkarat dan modulus elastisitas yang mendekati baja tulangan. Namun dari sisi biaya pelaksanaan relatif lebih mahal. Proses di atas diilustrasikan pada gambar di bawah ini:



Gambar 9. Ilustrasi Pemasangan CFRP

c. Penempatan beban *rooftank* terpusat pada sumbu as balok beton B1, B2 dan B3. Sehingga beban-beban yang bekerja bisa simetris diterima oleh balok beton. Hal ini dimaksudkan agar beban *torsi* yang terjadi tidak melampui kapasitas layanan yang sudah terpasang pada masing-masing balok beton. Penempatan beban *rooftank* ini diilustrasikan pada gambar berikut:



Gambar 10. Penempatan Beban *Rooftank*

2. Pada permasalahan poin “b” rekomendasi solusi yang terbaik dan terefisien di dalam menghindari dampak yang akan terjadi adalah:

   a. Penambahan balok beton atau baja sebagai landasan *rooftank* agar beban bisa disalurkan pada balok beton induk. Opsi ini dipilih dikarenakan pertimbangan efisiensi anggaran yang akan dikeluarkan bisa ditekan. Ilustrasi uraian di atas bisa ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 11. Ilustrasi Pemasangan Landasan *Rooftank*

   b. Pemasangan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). Pemasangan CFRP menggunakan lembaran karbon yang ditempelkan di bawah pelat beton untuk meningkatkan kapasitas lentur pelat beton tanpa menambah beban mati secara signifikan. Secara rinci material CFRP ini adalah material yang memiliki kuat tarik sangat tinggi, ringan, tidak berkarat dan modulus elastisitas yang mendekati baja tulangan. Namun dari sisi biaya pelaksanaan relatif lebih mahal.

   c. Pengurangan luasan *gred* pelat beton dengan cara memasang balok baja IWF pada bentang arah pendek dengan teknologi angkur baja berkekuatan tarik tinggi semacam *hilty* dengan menggunakan

 ISSN 2987-677x

aplikasi Chemical Angkur. Pemasangan balok baja IWF ditunjukkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 12. Pemasangan Balok Baja IWF pada Tengah Bentang Pendek Pelat Beton

3. Pada permasalahan poin "c" satu-satunya solusi yang harus dilakukan adalah melakukan *chipping* atau pengelupasan permukaan di sekitar keretakan dinding dengan tujuan agar proses injeksi dengan mesin pompa menggunakan material cair (*Polyurethane/Epoxy*) bisa *maximal* dengan masuknya ke dalam celah keretakan dan diharapkan dinding melakukan proses penyambungan kembali. Proses di atas diilustrasikan pada gambar di bawah ini:



Gambar 13. Ilustrasi Injeksi Dinding

Saran

Saran dari kami selaku pengkaji teknis pada penyusunan dokumen Kajian Sertifikat Laik Fungsi Bangunan Gedung Rumah Sakit ini adalah semua rekomendasi di atas merupakan solusi yang paling efektif dan efisien dari permasalahan yang ada. Pemilihan salah satu metode *retrofitting* di atas didasarkan pada kondisi dimana keberlangsungan fungsi gedung ini tidak boleh berhenti dalam menjalankan fungsi pelayanan. Untuk menghindari dari hal-hal yang tidak dinginkan terkait kekurangan kapasitas layanan beberapa komponen struktur, maka disarankan proses perbaikan ataupun perkuatan struktur agar segera dilaksanakan, di mana hal ini didasarkan pada kepentingan pihak rumah sakit di dalam memenuhi perundangan-undangan yang berlaku dan pemenuhan kewajiban memberikan pelayanan kesehatan yang terbaik kepada masyarakat pada umumnya melalui kehandalan bangunan jangka panjang sebagai sarananya.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih saya sampaikan sebesar-besarnya kepada Civitas Akademi Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya terutama kepada Bapak Dr. Ir. Suratno Lourentius, MS., IPM., ASEAN Eng. yang senantiasa tidak bosan-bosannya mengarahkan penulis untuk mencapai kesempurnaan di dalam penyusunan artikel ini. Ucapan terimakasih juga saya sampaikan kepada Direktur Utama CV Nugraha Cipta Sejahtera atas kerjasama yang baik dalam proses penyusunan artikel ini.

Referensi

BSN. (1995). *SNI 4430:1997 Metode pengujian elemen struktur beton dengan menggunakan alat palu beton tipe N dan NR*. Bandung: Badan Standardisasi Nasional.

BSN. (2019). *SNI 2847:2019 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

BSN. (2019). *SNI 1726:2019 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

BSN. (2020). *SNI 1727:2020 Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

BSN. (2020). *SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Bowles, J E., PE., S.E. (1993). *Analisis dan desain pondasi*. Jakarta: Penerbit Erlangga.

CV Nugraha Cipta Sejahtera (2024) *Kajian PBG & SLF gedung rektorat kampus Universitas Swasta 4 lantai di Ponorogo*

Dipohusodo, I (1994) *Struktur beton bertulang*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.

 ISSN 2987-677x

Efektivitas Penggunaan *Fan Axial Low Noise Pulley* dalam Mereduksi Polusi Udara dan Suhu Ruangan (Studi Kasus Industri Pengolahan Karet di Kawasan Manufaktur Gresik)

Roy Kurniawan [1,2] Tarsisius Dwi Wibawa Budianta [1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2] PT Semeru Inti Sukses

✉ roykurniawan73@gmail.com

Kondisi gudang penyimpanan material karet di Gresik yang memiliki volume ruang sekitar 6.000 m³ menunjukkan masalah lingkungan kerja yang serius akibat akumulasi panas dari radiasi atap, minimnya ventilasi, serta terjebaknya bau menyengat dari material karet yang tersimpan pada rak. Permasalahan semakin kompleks karena keterbatasan ruang pada dinding sehingga instalasi ventilasi mekanis horizontal tidak memungkinkan. Untuk mengatasi hal tersebut, digunakan pendekatan perhitungan *Air Change per Hour* (ACH) dengan target optimasi 20 ACH guna memastikan pergantian udara yang efektif pada lingkungan industri dengan tingkat polutan tinggi. Berdasarkan perhitungan tersebut, dibutuhkan laju alir udara sebesar 120.000 m³/jam yang direalisasikan melalui instalasi empat unit kipas hisap berkapasitas masing-masing 28.000 m³/jam menggunakan sistem *roof fan*. Sistem ini dilengkapi dengan modifikasi *ducting* pendek dan *elbow* yang dirancang untuk menarik polutan langsung dari area rak penyimpanan. Implementasi sistem ventilasi vertikal ini terbukti meningkatkan pertukaran udara segar dan pembuangan udara panas secara simultan, sehingga menurunkan suhu dan kelembapan ruangan serta mengurangi bau menyengat secara signifikan. Hasilnya, kualitas udara gudang meningkat dan mendukung kesehatan serta produktivitas pekerja.

Kata kunci: Sirkulasi Udara Industri, Gudang Material Karet, *Air Change per Hour* (ACH), *Roof Fan*, Sistem *Ducting*, Kualitas Udara dalam Ruangan

Pendahuluan

Pertumbuhan pesat sektor industri pengolahan bahan baku menuntut kesiapan infrastruktur, khususnya yang dapat menjamin aspek Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3). Salah satu tantangan terberat pada fasilitas pergudangan khusus, seperti industri pengolahan karet, adalah paparan emisi gas berbahaya secara kontinu. Material karet mentah dalam jumlah besar secara alamiah menghasilkan pelepasan gas hidrogen sulfida (H2S) dan amonia (NH3) akibat aktivitas mikrobiologis. Apabila tidak difasilitasi dengan sirkulasi yang presisi, emisi ini berpotensi mengiritasi saluran pernapasan, memicu mual, dan menurunkan fungsi paru pekerja. Kondisi tersebut semakin diperburuk oleh fenomena *occupational heat stress* (stres panas kerja) akibat minimnya ventilasi. Sebuah fasilitas gudang komoditas karet di Gresik dengan dimensi keruangan 40 m x 10 m x 15 m mengalami masalah sirkulasi parah akibat ketiadaan desain ventilasi mekanis yang mumpuni. Keterbatasan geometri di mana sisi bangunan terhimpit menghalangi pemasangan unit *wall exhaust fan* di perimeter dinding. Mengurai masalah arsitektural ini, rancangan sistem dipindahkan ke area atap dengan memanfaatkan turbin hisap mekanis berspesifikasi tinggi yang dirancang untuk memfokuskan tarikan pada titik emisi.

Metode

Studi kasus ini dilaksanakan pada periode Juli hingga Oktober 2024 di fasilitas gudang karet Gresik. Pengumpulan data primer dilakukan melalui observasi langsung untuk pemetaan spasial (dimensi ukur 40 m x 10 m x 15 m), pemetaan titik konsentrasi polusi dominan di area rak, dan wawancara untuk mendokumentasikan keluhan sesak maupun panas yang dialami oleh para pekerja. Tahapan proses analisis keinsinyuran dieksekusi dalam empat fase linier:

1. Analisis Perhitungan Udara: Menetapkan debit absolut volume udara (m³/jam) yang harus dipindahkan ke atmosfer.
2. Analisis Rekayasa Penempatan: Mendesain solusi di atap akibat dinding yang terhimpit penuh.
3. Analisis Evaluasi Kinerja Lingkungan: Memvalidasi hilangnya bau menyengat dan penurunan suhu.
4. Analisis Standar Operasional Prosedur (SOP): Merumuskan regulasi pemeliharaan dan batas jam nyala motor mekanis (*running time*).

Analisis dan Pembahasan Formulasi Kebutuhan Sirkulasi (ACH) dan Desain Spesifikasi Alat

Untuk dapat memberikan kondisi aman di bawah Nilai Ambang Batas (NAB), target pergantian udara diatur ke angka maksimal untuk fasilitas industri yakni 20 ACH. Dengan dimensi gudang 40 m x 10 m x 15 m, diperoleh total volume akumulatif ruangan sebesar 6.000 meter kubik. Maka, kebutuhan volume sirkulasi pembuangan total adalah: 6.000 m3 x 20 ACH = 120.000 m3/jam.

 ISSN 2987-677x

Berdasarkan spesifikasi industrial roof exhaust fan yang akan digunakan, kapasitas daya hisap tiap mesin rata-rata adalah 28.000 m3/jam. Evaluasi perancangan mensyaratkan penggunaan 4 unit perangkat atap (120.000 dibagi 28.000 menghasilkan 4,2 yang dibulatkan menjadi 4 unit).

Intervensi Desain Penempatan dan *Ducting* Lokal

Menempatkan *exhaust fan* di atap setinggi 15 meter seringkali memicu anomali zona stagnasi (pengendapan udara), di mana polusi di lapisan rak terbawah tidak tereliminasi secara sempurna, sebuah *problem* distribusi aliran udara yang lazim ditemui dalam simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk bangunan gudang bertingkat tinggi. Untuk mengeliminasi risiko stagnasi tersebut, rekayasa local *exhaust ventilation* ditambahkan.

Setiap kipas atap tidak sekadar menyedot plafon, melainkan disambung dengan fabrikasi pipa saluran udara (*ducting*) berukuran pendek dan sambungan belokan (*elbow*) yang moncongnya diarahkan tegak lurus menukik langsung ke tumpukan material karet di rak. Taktik ini mengkarantina sumber polutan dan menariknya secara agresif sebelum sempat menguap mengisi area kerja.

Analisis Pembiayaan

Pembangunan infrastruktur fasilitas sirkulasi ini diestimasikan memakan biaya total sebesar Rp110.200.000. Komponen biaya utama terserap pada fabrikasi dudukan dan pipa saluran yang dirancang dari material pelat Baja Lapis Seng (BJLS), yang mampu mendistribusikan efektivitas hisapan dari ketinggian.

Tabel 1. Rincian Rencana Anggaran Biaya



Keluhan

Berdasarkan hasil observasi di fasilitas gudang penyimpanan material karet, ditemukan keluhan kritis terkait buruknya kualitas udara dalam ruangan (*Indoor Air Quality*). Para pekerja secara langsung mengeluhkan kondisi lingkungan kerja yang sangat panas dan pengap, yang dipicu oleh minimnya sistem ventilasi serta tidak berjalannya laju pergantian udara secara alami. Kondisi beban termal tersebut diperparah oleh tumpukan bahan baku karet di area rak yang secara alamiah melepaskan emisi gas berbahaya berupa Amonia (NH3) dan Senyawa Organik Volatil (VOC).

Terakumulasinya polutan ini menghasilkan polusi bau karet yang sangat menyengat dan memicu serangkaian keluhan kesehatan di kalangan tenaga kerja. Secara medis, paparan gas dan hawa panas yang terperangkap ini dilaporkan menimbulkan keluhan awal berupa iritasi pada selaput lendir mata, hidung, dan tenggorokan, yang disertai dengan rasa mual dan pusing kepala. Apabila dibiarkan tanpa intervensi rekayasa yang memadai, kondisi ini sangat berisiko menyesakkan saluran pernapasan, memicu batuk, bronkitis kronis, hingga menyebabkan penurunan kapasitas fungsi paru-paru para pekerja. Mitigasi terhadap keluhan tata udara ini semakin kompleks mengingat adanya kendala arsitektural bangunan tertutup yang tidak memiliki ruang kosong (*space*) pada sisi perimeter dinding untuk instalasi perangkat pembuangan udara konvensional.

Diskusi

Diskusi mengenai implementasi rekayasa tata udara pada fasilitas pergudangan ini menyoroti signifikansi integrasi antara kepatuhan regulasi Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) dengan inovasi desain keteknikan. Keterbatasan arsitektural berupa ketiadaan ruang pada perimeter dinding bangunan, yang pada mulanya menjadi hambatan utama instalasi konvensional, berhasil diatasi melalui pendekatan spasial alternatif berupa instalasi *roof fan* yang dikonfigurasikan dengan saluran *ducting* fokal dan sambungan *elbow*. Pendekatan rekayasa ini dinilai sangat strategis karena tidak hanya berfokus pada pemenuhan target pergantian udara kuantitatif pada level maksimal sebesar 20 *Air Change per Hour* (ACH) , tetapi juga secara spesifik memusatkan daya hisap mekanis langsung pada titik sumber emisi di area rak penyimpanan material karet. Secara teoritis, evakuasi polutan gas amonia (NH3) dan Senyawa Organik Volatil (VOC) tepat dari lokus sumbernya mampu meminimalisasi dispersi kontaminan ke seluruh volume ruangan, yang pada gilirannya mengoptimalkan efektivitas pembersihan udara.

Pada akhirnya, keberhasilan intervensi teknis ini tidak hanya mengukuhkan pemenuhan standar baku mutu lingkungan kerja yang diamanatkan oleh Permenaker No. 5 Tahun 2018 dan KepmenLH No. 50 Tahun 1996, namun juga menawarkan sebuah model preseden (*benchmark*) yang komprehensif bagi fasilitas industri manufaktur lain yang dihadapkan pada permasalahan serupa, yakni tingginya beban termal laten, pekatnya polusi bau menyengat, dan adanya restriksi tata ruang struktural.

Hasil Kerja

Implementasi rekayasa keteknikan melalui instalasi sistem kipas atap (*roof fan*) yang diintegrasikan dengan saluran udara terfokus (*ducting* pendek) dan sambungan pembelok arah (*elbow*) telah terbukti menjadi solusi intervensi yang sangat berdaya guna. Berdasarkan evaluasi kinerja dan tinjauan komparatif pasca-instalasi di lapangan, sistem tersebut

 ISSN 2987-677x

mengkatalisasi dinamika sirkulasi udara (IN/OUT) hingga beroperasi secara maksimal, presisi, dan memadai. Intervensi mekanis ini secara signifikan berhasil memitigasi *problem* akumulasi polutan di dalam fasilitas tertutup tersebut secara komprehensif. Keberhasilan ini tervalidasi oleh penurunan drastis pada paparan beban panas laten serta tereliminasinya kondisi pengap yang ekstrem, yang secara langsung memulihkan stabilitas termal bagi para pekerja di dalam gedung.

Lebih lanjut, emisi gas dari material karet yang sebelumnya terakumulasi pekat dan berisiko menyesakkan saluran pernapasan berhasil dievakuasi secara mekanis dan tuntas. Daya hisap yang berfokus secara fokal mampu menarik polutan tersebut tepat dari area sumbernya untuk kemudian dibuang secara aman ke atmosfer luar. Sebagai implikasi akhir dari serangkaian perbaikan ini, parameter kualitas udara dalam ruangan (*Indoor Air Quality*) di area pergudangan mengalami transformasi substansial menjadi jauh lebih segar, terbebas dari kontaminan bau yang menyengat, dan secara paripurna mengembalikan standar keamanan serta kenyamanan lingkungan operasional kerja.

Pelaksanaan di Lapangan

Studi kasus rekayasa keteknikan ini diimplementasikan pada sebuah fasilitas gudang penyimpanan material persediaan karet yang berlokasi di kawasan industri Kabupaten Gresik, Jawa Timur. Waktu pelaksanaan proyek optimalisasi tata udara ini dijadwalkan berlangsung dalam periode bulan Juli hingga Oktober 2024. Adapun proses eksekusi fisik di lapangan yang mencakup pekerjaan mekanikal dan elektrikal di ketinggian dirancang dengan cermat dan memakan waktu pengerjaan efektif selama 14 hingga 20 hari kerja.

Kondisi Sebelum

Sebelum adanya intervensi teknis, fasilitas bangunan berdimensi panjang 40 meter, lebar 10 meter, dan tinggi 15 meter tersebut memiliki kualitas udara dalam ruangan (*Indoor Air Quality*) yang sangat buruk. Ketiadaan sistem ventilasi dan tidak berjalannya laju pergantian udara alami menyebabkan terperangkapnya suhu panas laten yang ekstrem dan memicu kondisi ruang yang sangat pengap.

Permasalahan ini diperparah oleh tumpukan bahan baku karet di rak penyimpanan yang secara alamiah melepaskan emisi gas beracun berupa Amonia (NH3) dan Senyawa Organik Volatil (VOC). Polutan tersebut menghasilkan bau karet yang sangat menyengat dan berisiko menyesakkan saluran pernapasan para pekerja. Di sisi lain, upaya perbaikan sirkulasi konvensional menemui kebuntuan struktural karena sisi-sisi perimeter dinding penyangga bangunan tidak memiliki sisa ruang kosong (*space*) untuk dipasangi kipas pembuangan dinding (*wall exhaust fan*).



Gambar 1. Kondisi Tampak Atap (Dari Bawah) Sebelum Pengerjaan



Gambar 2. Kondisi Tampak Atap (Dari Atas) Sebelum Pengerjaan

Pekerjaan Struktur

Merespons kendala arsitektural pada dinding eksisting, rekayasa struktural difokuskan pada relokasi sistem sirkulasi menuju area atap bangunan (*rooftop*). Tahapan rekayasa teknik ini meliputi serangkaian pekerjaan berikut:

1. Perhitungan Desain Kapasitas: Mengalkulasi kebutuhan total volume udara berdasarkan parameter tata udara untuk ruangan berpolusi tinggi, dengan menetapkan target *Air Change per Hour* (ACH) pada nilai maksimal 20 ACH. Hal ini memunculkan kewajiban tarikan sirkulasi mekanis sebesar 120.000 meter kubik per jam (m^3/jam).
2. Instalasi Perangkat Atap: Proses konstruksi di ketinggian 15 meter diawali dengan penyiapan perancah (*scaffolding*) dan pembukaan panel atap untuk mendudukkan 4 unit kipas hisap mekanis (*roof fan*) berskala industri. Masing-masing unit perangkat tersebut memiliki kapasitas daya hisap yang mumpuni sebesar 28.000m^3/jam.
3. Fabrikasi Saluran Fokal: Agar daya hisap *roof fan* tidak terpencar melainkan menukik tajam langsung menuju sumber emisi di rak penyimpanan, dilakukan penambahan struktur mekanikal berupa instalasi saluran udara berbahan Baja Lapis Seng (BJLS) atau *ducting* berukuran pendek. Saluran ini diintegrasikan dengan kelengkapan sambungan pipa pembelok arah (*elbow*) dan *flange* besi guna menciptakan tarikan yang presisi dari sumber emisi ke arah luar ruang.
4. Pekerjaan Kelistrikan: Melakukan pengadaan perlengkapan suku cadang, penarikan jalur kabel, dan pemasangan panel listrik secara terpusat untuk

 ISSN 2987-677x

mendistribusikan daya listrik yang stabil bagi keempat perangkat di area atap.

Kondisi Sesudah

Berdasarkan evaluasi kinerja dan tinjauan komparatif pasca- instalasi, rekayasa *roof fan* tersokong *ducting* dan *elbow* tersebut terbukti sangat berdaya guna dalam mengkatalisasi sirkulasi udara (IN/OUT) hingga beroperasi secara lancar, presisi, dan memadai. Intervensi mekanis ini secara komprehensif berhasil memitigasi polusi ruangan, yang tervalidasi oleh penurunan secara signifikan terhadap paparan suhu panas dan rasa pengap yang ekstrem. Emisi gas penyebab bau material karet yang sebelumnya pekat berhasil ditarik secara tuntas dari lokus sumbernya dan dievakuasi ke atmosfer luar. Sebagai implikasi paripurna, parameter tata udara gudang mengalami transformasi substansial menjadi lingkungan kerja yang jauh lebih segar, terbebas dari polutan kebauan, serta mengembalikan kenyamanan bagi seluruh tenaga kerja.



Gambar 3. Kondisi Tampak Atap (Dari Bawah) Sesudah Pengerjaan



Gambar 4. Proses Pengerjaan (*Detailing*)



Gambar 5. Proses Pengerjaan (*Detailing*)



Gambar 6. Proses Pengerjaan (*Detailing*)

Kesimpulan

1. Keberhasilan Intervensi Teknis: Proyek rekayasa ini telah berhasil mengimplementasikan solusi optimalisasi sirkulasi udara yang komprehensif pada fasilitas gudang penyimpanan material karet di Gresik. Sebelumnya, fasilitas tertutup ini teridentifikasi memiliki kualitas udara dalam ruangan (*Indoor Air Quality*) yang sangat buruk.
2. Identifikasi Kendala Kritis: Ketiadaan sistem ventilasi alami maupun mekanis memicu akumulasi suhu ruangan yang sangat panas dan menciptakan kondisi yang pengap bagi para pekerja. Beban lingkungan kerja ini diperburuk oleh tumpukan bahan baku karet yang secara alamiah melepaskan emisi gas, memicu polusi bau yang sangat menyengat dan berisiko menyesakkan saluran pernapasan.
3. Hambatan Arsitektural: Upaya perbaikan sirkulasi secara konvensional menemui kendala arsitektural, di mana sisi-sisi dinding penyangga bangunan sama sekali tidak memiliki sisa ruang kosong (*space*) yang memungkinkan untuk pemasangan kipas pembuangan dinding (*wall exhaust fan*).
4. Perhitungan Kapasitas Sirkulasi: Merujuk pada standar sirkulasi maksimal untuk gudang berpolutan tinggi (20 *Air Change per Hour* / ACH), dirumuskan bahwa ruangan tersebut secara teknis membutuhkan daya tarik sirkulasi udara sebesar 120.000 meter kubik per jam (m^3/jam). Kebutuhan volume masif ini dicapai melalui rumusan instalasi sebanyak 4 unit kipas mekanis, di mana masing-masing perangkat memiliki daya tarik sebesar 28.000 m^3/jam.
5. Inovasi Desain Struktural: Guna merespons kendala restriksi dinding, desain penempatan direkayasa secara strategis dengan merelokasi sistem sirkulasi ke bagian atap sebagai kipas atap (*roof fan*). Untuk menjembatani tingginya atap (15 meter) dan mempertahankan daya hisap yang optimal terhadap polutan di area rak, setiap unit *roof fan* diintegrasikan secara khusus dengan saluran udara (*ducting*) berukuran pendek serta sambungan pipa pembelok (*elbow*).
6. Efektivitas Kinerja Pasca-Instalasi: Evaluasi komparatif pasca-instalasi membuktikan bahwa implementasi

 ISSN 2987-677x

rekayasa perangkat ini sangat berhasil. Sistem sirkulasi udara (IN/OUT) bergulir secara maksimal, di mana emisi gas berbau menyengat dan hawa panas dapat dihisap tuntas secara fokal dan mekanis ke luar ruangan, menjadikan lingkungan kerja tersebut kembali segar, aman, dan nyaman.

Ucapan Terima kasih

Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya yang telah memberikan kesempatan menulis dan publikasi.

Referensi

American Conference of Governmental Industrial Hygienists. (2019). *Industrial ventilation: A manual of recommended practice for design* (30th ed.). ACGIH.

ASHRAE. (2021). *ASHRAE handbook—Fundamentals (SI edition).* American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Badan Standardisasi Nasional. (2001). *SNI 03-6572-2001: Tata cara perancangan sistem ventilasi dan pengkondisian udara pada bangunan gedung*. BSN.

Baturin, V. V. (2014). *Fundamentals of industrial ventilation*. Pergamon Press.

Burgess, W. A., Ellenbecker, M. J., & Treitman, R. D. (2004). *Ventilation for control of the work environment*. John Wiley & Sons.

Cahyono, T. (2017). *Penyehatan udara*. Penerbit ANDI.

Daly, B. B. (1978). *Woods practical guide to fan engineering*. Woods of Colchester Limited.

Drăgoescu, R., & Cămărășescu, A. (2024). Optimization of systems of industrial ventilation—Case study. *MATEC Web of Conferences, 389*, 00006. https://doi.org/10.1051/matecconf/202438900006

Fahriani, F., Hambali, R., & Yofianti, D. (2022). Improvement of quality environment at TPA Parit 6 Pangkalpinang using the sanitary landfill method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1108*, 012048. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1108/1/012048

Hemeon, W. C. L. (1999). *Hemeon's plant & process ventilation* (3rd ed.). CRC Press.

Keputusan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 1405/MENKES/SK/XI/2002 tentang Persyaratan Kesehatan Lingkungan Kerja Perkantoran dan Industri. (2002).

Khorshid, S., & Song, S. (2025). Exploring intervention strategies to prevent occupational heat stress: A scoping review. *Safety and Health at Work, 16*(1), 134–144. https://doi.org/10.1016/j.shaw.2025.03.001

McDermott, H. J. (2001). *Handbook of ventilation for contaminant control* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.

Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia. (2018). *Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan Kerja*. Kementerian Ketenagakerjaan RI.

Suma'mur, P. K. (2014). *Higiene perusahaan dan kesehatan kerja (Hiperkes)*. Sagung Seto.

Sun, Z., Tian, J., Zhang, T., Du, Z., & Ouyang, H. (2023). Cooling fan aerodynamic noise reduction with short inlet duct and its applicability. *International Journal of Refrigeration, 148*, 117–130. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.01.014

Umm Al-Qura University. (2024). Flow-induced noise and vibration in axial fan: A case study. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture, 15*, 591–608. https://doi.org/10.1007/s43995-024-00079-9

Yu, T., Yao, H., Mi, R., Song, Y., & Liu, P. (2025). Influence of leading-edge obstacles on flow field and noise of axial flow fan for building ventilation. *Journal of Building Engineering, 109*, 113045. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.113045

 ISSN 2987-677x

Evaluasi Lingkungan Fisik Laboratorium Teknik untuk Kesehatan Kerja dan Profesionalisme

Huki Chandra[1,2] Suratno Lourentius[1,3]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2] Program Studi Teknik Industri Kampus Surabaya, Telkom University

[3] Program Studi DIII Teknik Kimia, Politeknik Mangunwijaya Semarang

✉ huki.chandra@gmail.com

✉ suratno.lourentius@ukwms.ac.id

✉ suratno.lourentius@gmail.com

Laboratorium teknik sebagai lingkungan praktik rekayasa berpotensi menimbulkan paparan kebisingan, pencahayaan tidak memadai, serta kondisi termal yang memengaruhi keselamatan, kesehatan kerja, dan mutu pembelajaran. Studi kasus ini mengevaluasi kondisi lingkungan fisik laboratorium teknik di suatu universitas di Surabaya melalui pengukuran kebisingan, pencahayaan, suhu, dan kelembapan pada empat zona aktivitas dari September 2025 hingga Februari 2026. Analisis deskriptif komparatif mengacu pada Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2018 serta prinsip manajemen risiko ISO 45001:2018 dan ISO 9001:2015. Hasil menunjukkan kebisingan di area *drilling* dan CNC melebihi 85 dB, pencahayaan di bawah 500 lux, serta suhu relatif tinggi dan kelembapan berlebih dibandingkan dengan batas rekomendasi. Rekomendasi pengendalian disusun berdasarkan hierarki pengendalian risiko untuk mendukung peningkatan keselamatan dan mutu pembelajaran yang selaras dengan SDG 3, SDG 4, dan SDG 12.

Kata kunci: Lingkungan Kerja Fisik, Kesehatan Kerja, Laboratorium Teknik, SDGs

Pendahuluan

Laboratorium teknik merupakan lingkungan kerja yang merepresentasikan penerapan ilmu dan teknologi rekayasa melalui aktivitas permesinan, pengujian, dan fabrikasi yang memiliki tingkat risiko tertentu terhadap keselamatan dan kesehatan kerja. Kondisi lingkungan fisik seperti kebisingan, pencahayaan, suhu, dan kelembapan berpengaruh terhadap konsentrasi, ketelitian, kenyamanan, dan performansi kerja, sehingga berimplikasi langsung pada mutu proses pembelajaran dan profesionalisme praktik teknik (Pratiwi, 2013; Ma'arif et al., 2025). Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa tingkat kebisingan dan kualitas pencahayaan di laboratorium pendidikan berpotensi melampaui batas kenyamanan yang direkomendasikan apabila tidak dikendalikan secara sistematis (Akhmad et al., 2024; Atina et al., 2020). Pengukuran faktor fisik secara komprehensif diperlukan sebagai dasar identifikasi bahaya dan pengendalian risiko untuk mencegah gangguan kesehatan kerja serta menjaga stabilitas lingkungan laboratorium (Fatimah et al., 2024; Sudaryanto et al., 2022; Kusuma & Dewi, 2025).

Secara regulatif, kewajiban pengendalian bahaya di tempat kerja ditegaskan dalam Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja yang menempatkan keselamatan sebagai tanggung jawab pengelola tempat kerja (Pemerintah Republik Indonesia, 1970). Ketentuan tersebut diperkuat melalui Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012 tentang Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja yang menekankan identifikasi bahaya dan pengendalian risiko secara terstruktur (Pemerintah Republik Indonesia, 2012). Secara teknis, standar ambang batas kebisingan, pencahayaan, suhu, dan kelembapan diatur dalam Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan Kerja (Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia, 2018). Dalam perspektif profesionalisme insinyur, pengendalian lingkungan kerja sejalan dengan pendekatan manajemen berbasis risiko dan konsistensi mutu sebagaimana ditekankan dalam ISO 45001:2018 dan ISO 9001:2015 (*International Organization for Standardization* [ISO], 2015; *International Organization for Standardization* [ISO], 2018).

Berdasarkan kerangka regulatif dan empiris tersebut, studi kasus ini dilaksanakan pada laboratorium teknik di salah satu universitas di Surabaya yang digunakan untuk kegiatan praktikum dan pengoperasian mesin. Proyek diawali dengan identifikasi zona pengamatan berdasarkan karakteristik aktivitas dan sumber paparan, yaitu area mesin *drilling*, mesin CNC, mesin *3D printing*, serta area TV dan meja kerja. Pengumpulan data dilakukan melalui pengukuran langsung parameter kebisingan, pencahayaan, suhu, dan kelembapan menggunakan instrumen yang sesuai standar pengukuran lingkungan kerja. Data yang diperoleh dianalisis dengan membandingkannya terhadap ketentuan regulasi nasional dan prinsip manajemen keselamatan serta mutu, guna menilai tingkat kesesuaian dan mengidentifikasi potensi kesenjangan.

Ruang lingkup studi ini dibatasi pada aspek lingkungan kerja fisik yang meliputi kebisingan, pencahayaan, suhu, dan kelembapan, tanpa mencakup faktor kimia, biologis, maupun psikososial, serta tidak membahas perancangan ulang fasilitas secara

 ISSN 2987-677x

menyeluruh. Hasil evaluasi selanjutnya digunakan untuk merumuskan rekomendasi perbaikan teknis yang bersifat aplikatif dan terukur sebagai bentuk tanggung jawab profesional dalam memastikan lingkungan laboratorium yang aman, sehat, dan terdokumentasi secara sistematis.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus dengan metode pengukuran kuantitatif terhadap parameter lingkungan kerja fisik pada laboratorium teknik di suatu universitas di Surabaya. Objek penelitian dibagi menjadi empat zona pengamatan berdasarkan karakteristik aktivitas dan sumber paparan, yaitu zona 1 di dekat mesin *drilling*, zona 2 di dekat mesin CNC, zona 3 di dekat mesin *3D printing*, serta zona 4 di area TV dan meja kerja. Pengambilan data dilaksanakan pada periode September 2025 hingga Februari 2026 sesuai jadwal observasi yang telah ditetapkan.

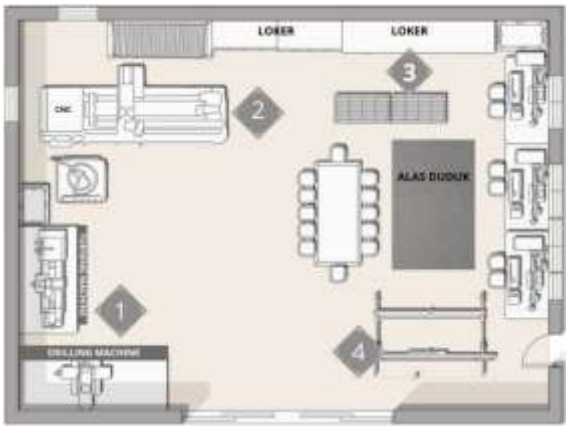
Parameter yang diukur meliputi kebisingan, pencahayaan, suhu, dan kelembapan dengan menggunakan instrumen ukur lingkungan kerja yang sesuai standar teknis pengukuran. Prosedur pengukuran mengacu pada ketentuan ambang batas dan persyaratan lingkungan kerja sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan Kerja (Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia, 2018). Batas kebisingan 85 dB untuk durasi kerja 8 jam, standar pencahayaan minimum 500 lux untuk pekerjaan presisi, serta batas suhu dan kelembapan kerja dijadikan sebagai kriteria evaluasi kesesuaian.

Data kebisingan dikumpulkan selama 20 hari observasi pada masing-masing zona, sedangkan suhu dan kelembapan diukur selama 5 hari pengamatan untuk merepresentasikan kondisi operasional laboratorium. Hasil pengukuran dianalisis secara deskriptif komparatif dengan membandingkan nilai aktual terhadap standar yang berlaku guna mengidentifikasi kesenjangan tingkat kepatuhan.

Kerangka analisis dilakukan dalam perspektif sistem manajemen keselamatan dan mutu dengan merujuk pada prinsip manajemen berbasis risiko dalam ISO 45001:2018 dan pendekatan konsistensi proses dalam ISO 9001:2015 (*International Organization for Standardization* [ISO], 2015, 2018). Tindak lanjut rekomendasi perbaikan dirumuskan menggunakan prinsip perbaikan berkelanjutan melalui siklus *Plan–Do–Check–Act* sebagai bagian dari penguatan profesionalisme insinyur dalam pengelolaan laboratorium.

Hasil Kerja

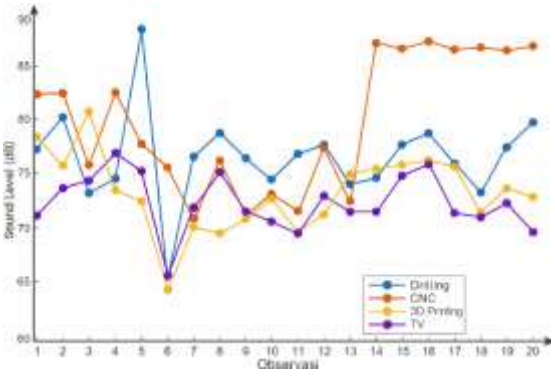
Sebagai bagian dari penerapan evaluasi berbasis pengukuran kuantitatif dalam praktik keinsinyuran profesional, hasil observasi lingkungan fisik laboratorium dianalisis dengan membandingkan kondisi aktual terhadap standar yang berlaku untuk menilai tingkat kesesuaian dan kebutuhan pengendalian risiko. Pengukuran kondisi lingkungan fisik dilakukan pada sebuah laboratorium, yaitu studi kasus pada laboratorium Teknik di suatu universitas di Surabaya. Data diambil berdasarkan hasil pengukuran lingkungan fisik berupa kebisingan, pencahayaan, suhu, dan kelembapan. Daerah pengukuran pada laboratorium dibagi menjadi empat area, yaitu zona 1 di dekat mesin *drilling*, zona 2 di dekat mesin CNC, zona 3 di dekat mesin *3D printing*, dan zona 4 di dekat TV dan meja. Gambar zona observasi lingkungan fisik pada laboratorium teknik ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Zona Observasi Lingkungan Fisik pada Laboratorium Teknik

Evaluasi Tingkat Kebisingan

Hasil pengukuran pada Gambar 2 menunjukkan bahwa zona 1 di dekat mesin *drilling* dan zona 2 di dekat mesin CNC mempunyai kebisingan di atas 85 dB berdasarkan 20 hari observasi, sehingga melampaui nilai ambang batas untuk paparan kerja 8 jam sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2018 (Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia, 2018).



Gambar 2. Hasil Pengukuran Kebisingan pada Laboratorium Teknik

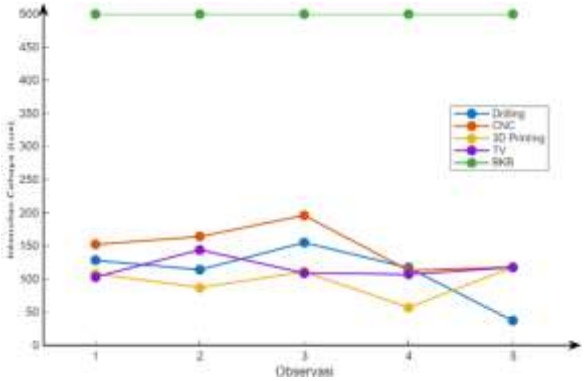
Kondisi ini berpotensi menimbulkan gangguan pendengaran dan menurunkan konsentrasi kerja, sebagaimana ditegaskan dalam kajian sebelumnya bahwa kebisingan laboratorium dapat melampaui tingkat kenyamanan dan memengaruhi performa (Akhmad et al., 2024; Atina et al., 2020; Pratiwi, 2013).

 ISSN 2987-677x

Berdasarkan hierarki pengendalian risiko, langkah eliminasi dapat dilakukan melalui pembatasan pengoperasian bersamaan mesin berisik tinggi, sedangkan substitusi dapat dipertimbangkan dengan penggunaan mesin berteknologi lebih senyap pada pengadaan berikutnya. Pengendalian rekayasa teknik dilakukan melalui pemasangan peredam akustik, *enclosure* mesin, atau panel insulasi suara. Secara administratif, diperlukan pengaturan jadwal praktikum dan pembatasan durasi paparan, serta penyusunan prosedur operasi standar yang mengatur paparan kebisingan. Penggunaan alat pelindung diri berupa *earplug* atau *earmuff* menjadi lapisan terakhir perlindungan untuk meminimalkan risiko residual.

Evaluasi Tingkat Pencahayaan

Hasil pengukuran pada Gambar 3 menunjukkan bahwa semua zona pada Laboratorium Teknik memiliki pencahayaan yang rendah, kurang dari standar 500 lux.

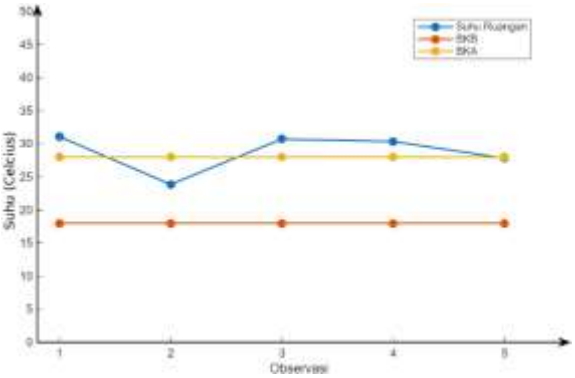


Gambar 3. Hasil Pengukuran Pencahayaan pada Laboratorium Teknik

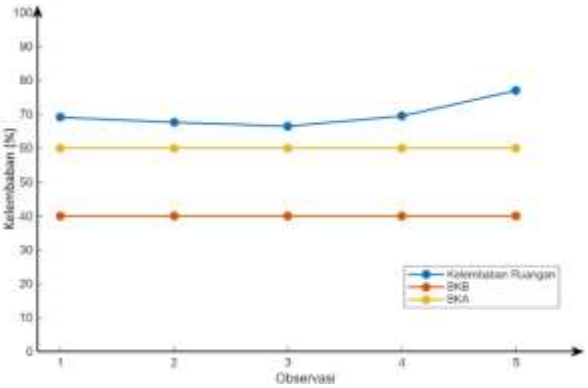
Pada aspek pencahayaan, seluruh zona pengamatan menunjukkan intensitas di bawah 500 lux sehingga belum memenuhi standar pekerjaan presisi menurut regulasi yang sama (Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia, 2018). Pencahayaan yang rendah berpotensi menurunkan ketelitian kerja dan meningkatkan risiko kesalahan operasional, sebagaimana didukung oleh penelitian yang mengaitkan intensitas cahaya dengan performansi kerja (Pratiwi, 2013; Kusuma & Dewi, 2025). Dalam konteks hierarki pengendalian, eliminasi sumber bayangan dapat dilakukan melalui penataan ulang tata letak mesin dan meja kerja, sedangkan substitusi dilakukan dengan mengganti lampu berdaya rendah menjadi lampu LED dengan lumen lebih tinggi dan efisiensi energi lebih baik. Rekayasa teknik berupa penambahan titik lampu lokal (*task lighting*) pada area presisi dan optimalisasi distribusi cahaya menjadi langkah utama. Secara administratif, perlu dilakukan inspeksi berkala terhadap sistem pencahayaan dan pencatatan hasil pengukuran.

Evaluasi Suhu dan Kelembapan Ruangan

Pengukuran suhu menunjukkan bahwa pada tiga dari lima hari observasi nilai suhu melebihi 28°C, sedangkan kelembapan relatif berada di atas 60%, sehingga melampaui batas yang direkomendasikan untuk kenyamanan dan stabilitas lingkungan kerja (Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia, 2018; Sudaryanto et al., 2022). Hasil pengukuran pada Gambar 4 menunjukkan bahwa suhu ruangan Laboratorium Teknik termasuk tinggi karena 3 dari 5 hari pengukuran diperoleh suhu di atas 28 °C. Gambar 5 menunjukkan hasil pengukuran kelembapan ruangan di atas 60%.



Gambar 4. Hasil Pengukuran Suhu Ruang Laboratorium Teknik



Gambar 5. Hasil Pengukuran Kelembapan Ruang Laboratorium Teknik

Kondisi termal yang tidak terkendali dapat menurunkan kenyamanan dan produktivitas serta memengaruhi konsentrasi operator (Ma'arif et al., 2025; Pratiwi, 2013). Pengendalian dilakukan melalui rekayasa teknik berupa peningkatan kapasitas ventilasi dan pendingin ruangan, pemasangan *exhaust fan* tambahan di area mesin panas, serta pemantauan suhu dan kelembapan berbasis sensor. Secara administratif, pengaturan jumlah pengguna laboratorium dalam satu sesi praktikum dan jadwal operasional mesin dapat mengurangi beban panas ruangan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan adanya kesenjangan antara kondisi aktual dan standar keselamatan serta kesehatan kerja, sehingga memerlukan pengendalian terintegrasi berbasis hierarki risiko. Dari perspektif profesionalisme insinyur, tindakan ini mencerminkan penerapan manajemen berbasis risiko dan perbaikan berkelanjutan sebagaimana ditekankan dalam ISO 45001:2018 dan ISO

 ISSN 2987-677x

9001:2015 (*International Organization for Standardization* [ISO], 2015, 2018). Manfaat penelitian ini terletak pada tersedianya dasar pengambilan keputusan berbasis data untuk peningkatan keselamatan, penguatan kepatuhan terhadap regulasi nasional, serta peningkatan mutu proses praktikum melalui lingkungan laboratorium yang lebih aman, sehat, dan terkendali secara sistematis.

Relevansi *Sustainable Development Goals*

Hasil kerja penelitian ini tidak hanya menunjukkan kondisi aktual lingkungan fisik laboratorium, tetapi juga merefleksikan kontribusinya terhadap agenda pembangunan berkelanjutan. Optimalisasi pengendalian kebisingan dan perbaikan sistem ventilasi berimplikasi langsung pada perlindungan kesehatan dan pencegahan risiko gangguan akibat kerja, sehingga selaras dengan SDG 3 (*Good Health and Well-Being*). Peningkatan kualitas pencahayaan dan pengendalian kondisi termal mendukung terciptanya lingkungan praktik yang aman, nyaman, dan kondusif bagi proses pembelajaran berbasis praktik, yang berkontribusi pada SDG 4 (*Quality Education*). Selain itu, rekomendasi rekayasa teknik yang mendorong efisiensi sistem pencahayaan dan ventilasi serta pemantauan lingkungan secara berkelanjutan mencerminkan praktik pengelolaan sumber daya yang lebih bertanggung jawab dan sistematis, sejalan dengan SDG 12 (*Responsible Consumption and Production*). Dengan demikian, implementasi pengendalian risiko yang dirumuskan dalam studi ini tidak hanya meningkatkan kinerja keselamatan dan kesehatan kerja laboratorium, tetapi juga memperkuat peran profesional insinyur dalam mendukung keberlanjutan institusi pendidikan tinggi.

Aspek *Plan- Do- Check- Act* (PDCA)

Penerapan siklus *Plan–Do–Check–Act* (PDCA) dalam penelitian ini menunjukkan kerangka manajemen yang sistematis dan berbasis risiko dalam pengelolaan lingkungan laboratorium teknik. Pada tahap *Plan*, dilakukan identifikasi potensi bahaya fisik serta penetapan parameter ukur dan kriteria evaluasi berdasarkan standar yang relevan, sehingga tersedia dasar perencanaan yang terukur dan objektif. Tahap *Do* diwujudkan melalui pelaksanaan pengukuran kebisingan, pencahayaan, suhu, dan kelembapan pada beberapa zona aktivitas secara terstruktur dan terdokumentasi. Selanjutnya, tahap *Check* dilakukan melalui analisis deskriptif komparatif untuk menilai kesesuaian hasil pengukuran terhadap nilai ambang batas dan rentang rekomendasi, sekaligus mengidentifikasi tingkat deviasi serta implikasinya terhadap kesehatan kerja dan mutu pembelajaran. Tahap *Act* direpresentasikan melalui perumusan rekomendasi pengendalian berbasis hierarki pengendalian risiko, disertai usulan evaluasi berkala guna memastikan efektivitas intervensi. Secara analitis, penerapan PDCA dalam studi ini menegaskan orientasi pada perbaikan berkelanjutan (*continuous improvement*) dan akuntabilitas profesional dalam tata kelola laboratorium teknik.

Implikasi Manajerial

Hasil penelitian ini memiliki implikasi manajerial yang signifikan terhadap tata kelola laboratorium teknik, khususnya dalam penguatan sistem manajemen berbasis risiko yang terintegrasi dengan kebijakan institusi. Temuan mengenai kebisingan, pencahayaan, serta kondisi termal menunjukkan perlunya penetapan standar operasional yang lebih terukur, pengalokasian sumber daya untuk perbaikan rekayasa teknik, serta pengembangan mekanisme pemantauan lingkungan kerja yang terdokumentasi dan berkelanjutan. Integrasi indikator lingkungan fisik ke dalam sistem evaluasi kinerja laboratorium akan meningkatkan efektivitas pengambilan keputusan, memperkuat akuntabilitas pengelolaan, dan mendorong budaya keselamatan yang proaktif. Tabel 1 menunjukkan implikasi manajerial hasil evaluasi pengukuran lingkungan fisik laboratorium.

Tabel 1. Implikasi manajerial

Temuan Utama	Implikasi	Tindakan Prioritas
Kebisingan >85 dB; pencahayaan <500 lux; suhu & kelembapan tinggi	Risiko K3 dan penurunan mutu praktikum	Peredam akustik, peningkatan pencahayaan & ventilasi, APD
Pengendalian belum berbasis data	Tata kelola reaktif	Integrasi ke KPI & *monitoring real-time*

Secara akademik, penelitian ini berkontribusi dalam memperkaya evidensi empiris mengenai pengaruh faktor lingkungan fisik terhadap keselamatan kerja dan mutu pembelajaran praktik di laboratorium teknik, sekaligus menegaskan relevansi penerapan hierarki pengendalian risiko dan siklus perbaikan berkelanjutan sebagai kerangka operasional pengelolaan fasilitas pendidikan tinggi. Secara praktis, hasil penelitian ini menyediakan dasar pengambilan keputusan berbasis data untuk merancang intervensi teknis dan administratif yang lebih efektif dan terukur. Rekomendasi utama diarahkan pada prioritas penguatan rekayasa teknik melalui pemasangan peredam kebisingan, peningkatan kualitas dan distribusi pencahayaan, serta optimalisasi sistem ventilasi, yang didukung oleh pengendalian administratif dan penggunaan alat pelindung diri sebagai lapisan proteksi akhir. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan kajian longitudinal guna mengevaluasi efektivitas intervensi yang diterapkan, analisis hubungan kuantitatif antara parameter lingkungan fisik dan kinerja praktikum mahasiswa, serta pengembangan model pemantauan berbasis sensor dan analitik data untuk mendukung sistem manajemen laboratorium yang adaptif dan berkelanjutan.

 ISSN 2987-677x

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengukuran dan analisis parameter kebisingan, pencahayaan, suhu, dan kelembapan di laboratorium teknik, teridentifikasi bahwa tingkat kebisingan pada zona mesin *drilling* dan CNC melampaui 85 dB, intensitas pencahayaan di seluruh zona berada di bawah 500 lux, serta pada periode tertentu suhu melebihi 28°C dan kelembapan berada di atas rentang kenyamanan yang direkomendasikan. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya optimalisasi pengendalian untuk menjamin perlindungan keselamatan dan kesehatan kerja, menjaga ketelitian operasional, serta mendukung mutu proses pembelajaran. Rekomendasi perbaikan disusun berdasarkan hierarki pengendalian risiko melalui penguatan rekayasa teknik, pengendalian administratif, dan penggunaan alat pelindung diri sebagai lapisan proteksi terakhir. Secara strategis, hasil ini menegaskan urgensi penerapan manajemen berbasis risiko dan prinsip perbaikan berkelanjutan dalam tata kelola laboratorium. Tindak lanjut diarahkan pada implementasi sistem pemantauan lingkungan berbasis sensor secara *real-time* serta evaluasi berkala efektivitas pengendalian, guna memastikan keberlanjutan peningkatan kinerja K3 yang selaras dengan pencapaian SDG 3 (*Good Health and Well-Being*), SDG 4 (*Quality Education*), dan SDG 12 (*Responsible Consumption and Production*).

Ucapan Terimakasih

Penulis berterima kasih kepada Universitas Katolik Widya Mandala atas *support* yang diberikan dalam penelitian ini.

Referensi

Akhmad, D., Putra, S., Mayasari, R., & Tiara. (2024). Analisis dan perhitungan tingkat kebisingan internal ruangan di laboratorium terpadu Sentra Inovasi Technology (LTSIT) berdasarkan tingkat kenyamanan yang direkomendasikan oleh SNI dengan menggunakan metode RCE dan BCE. *Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri, 7.*

Atina, Jumingin, Rahmadani, W., & Sukria, I. (2020). Analisis tingkat kebisingan di lingkungan Universitas PGRI Palembang. *Sainmatika: Jurnal Ilmiah Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, 17*(2). https://doi.org/10.31851/sainmatika.v17i2.5052

Fatimah, A. I. F., Trianawati, M. L., & Sarastani, D. (2024). Pengukuran faktor fisik K3: kebisingan, pencahayaan, suhu, dan kelembapan di lingkungan kerja UKM pengolahan tahu baso Kota Bogor. *Journal of Mandalika Literature, 5*(4).

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001:2015 quality management systems-requirements*. ISO.

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 45001:2018 Occupational Health and safety management systems-Requirements with guidance for use*. ISO.

Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia. (2018). *Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2018 Tentang Keselamatan Dan Kesehatan Kerja Lingkungan Kerja.* https://jdih.kemnaker.go.id/

Kusuma P., K. D., & Dewi, S. (2025). Evaluasi lingkungan kerja (intensitas cahaya, kelembapan, suhu, dan kebisingan) menggunakan metode simple random sampling dan HIRADC pada PT Vitapharm. *Jurnal Serambi Engineering, 10*(1).

Ma'arif, I. S., Hidayah, M. N. W., Munandar, G. M., Pamungkas, K. A., & Natang, R. H. (2025). Evaluasi ergonomi lingkungan kerja pos penjaga palang pintu kereta api di Gombong. *Metode: Jurnal Teknik Industri, 11*(2), 320–332.

Pemerintah Republik Indonesia. (1970). *Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 1970 Nomor 1*.

Pemerintah Republik Indonesia. (2012*). Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012 Tentang Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2012 Nomor 100*.

Pratiwi, I. (2013). Pengaruh pencahayaan, kebisingan, dan temperatur terhadap performansi kerja. *National Conference on Applied Ergonomics*.

Sudaryanto, E., Suryanto, A., & Pramono, S. A. (2022). Penerapan sistem pemantauan kelembapan dan suhu laboratorium dengan metode constrained application protocol (CoAP). *Teodolita: Media Komunikasi Ilmiah di Bidang Teknik, 23*(1). https://doi.org/10.53810/jt.v23i1.439

 ISSN 2987-677x

Analisis *Head*, Kapasitas dan Efisiensi Pompa Sentrifugal 3 Sudu dengan Variasi Bukaan Katub dan RPM pada Alat Fluida di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Hasyim Asy'ari

Basuki[1,2] Retno Eka Pramitasari[1] Suratno Lourentius[2,3]

[1] Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasyim Asy'ari

[2] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[3] Program Studi D III Teknik Kimia, Politeknik Katolik Mangunwijaya Semarang

✉ basuki@unhasy.ac.id

✉ suratno.lourentius@gmail.com

Fluida merupakan suatu zat yang mampu mengalir, fluida sendiri dibedakan menjadi dua yaitu fluida cair dan fluida gas. Fluida cair secara alamiah mampu mengalir dari posisi atau tempat yang tinggi ke tempat yang lebih rendah. Untuk sebaliknya jika ingin mengalirkan fluida cair dari posisi atau tempat rendah ke tempat yang tinggi dibutuhkan sebuah peralatan yang dinamakan pompa. Pada penelitian ini menggunakan jenis pompa sentrifugal 3 sudu. Kinerja pompa ditentukan oleh *head*, kapasitas dan efisiensi. Tujuan pertama penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh bukaan katub terhadap *head*, kapasitas dan efisiensi pompa sentrifugal 3 sudu. Tujuan kedua penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh kecepatan putar atau RPM terhadap *head*, kapasitas dan efisiensi pompa sentrifugal 3 sudu. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen. Peneliti memvariasi bukaan katub mulai dari 25°; 45°; dan 65°, sedangkan RPM yang digunakan antara lain 800, 1600 dan 2400 RPM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai *head*, kapasitas dan efisiensi pompa tertinggi terjadi pada bukaan katub 65° dan RPM 2400 dengan nilai *head* 31.15 m kapasitas 21 liter/menit dan nilai efisiensi 41.6 %.

Kata kunci: *head*, kapasitas, efisiensi, RPM, pompa sentrifugal

Pendahuluan

Fluida merupakan suatu zat yang mampu mengalir, fluida sendiri dibedakan menjadi dua yaitu fluida cair dan fluida gas (Arijanto et al., 2015). Fluida cair contohnya air, secara alamiah zat ini mampu mengalir dari posisi atau tempat yang tinggi ke tempat yang rendah. Hal ini disebabkan karena adanya perbedaan ketinggian atau kedudukan yang akan memicu munculnya tekanan yang dipengaruhi oleh gaya grafitasi bumi. Untuk aliran sebaliknya dari tempat yang rendah ke tempat yang tinggi dibutuhkan sebuah peralatan yang dinamakan pompa. Pompa adalah alat yang digunakan untuk memindahkan cairan atau fluida dari suatu tempat ke tempat lain melalui sebuah media saluran dengan cara menambahkan energi pada cairan yang ditambahkan (Gunawan, 2018). Cairan yang dipindahkan ini memperoleh energi dari mekanisme perputaran impeller yang menjadikan bagian hisap vakum, sehingga perbedaan tekanan sisi hisap ini yang membuat cairan mampu berpindah (Kristiyono & Gunarti, 2018).

Pada penelitian ini menggunakan jenis pompa sentrifugal, karena pemilihan jenis pompa yang digunakan didasarkan pada nilai ekonomis jarak fluida yang dipindahkan. Pompa sentrifugal adalah mengubah energi kinetik yang dihasilkan oleh impeller yang berputar menghasilkan energi fluida yang bertekanan. Prinsip kerjanya menaikkan tekanan cairan dengan cara mengubah kecepatan, gaya sentrifugal dan mentransformasikan gaya tersebut ke impeller yang berputar di dalam casing untuk membuat perbedaan tekanan pada sisi hisap (*suction*) dan tekan (*discharge*) (Sularso, 2010). Kinerja pompa ditentukan oleh *head*, kapasitas dan efisiensi. *Head* adalah kemampuan dari pompa untuk mengangkut fluida, kapasitas adalah jumlah volume fluida yang berpindah atau dialirkan dalam satuan waktu, sedangkan efisiensi adalah perbandingan daya pompa dengan energi yang dibutuhkan oleh motor penggerak untuk menjalankan pompa (Subagyo & Hendratno, 2021). Performa pompa sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain: kapasitas, kecepatan putaran, panjang pipa, jenis impeller pompa (Nuryanti, dkk. 2020). Selain pompa, katub juga merupakan komponen penting dalam sistem perpipaan yang mempunyai fungsi mengatur karakteristik aliran, *head loss*, debit dan efisiensi pompa (Munthe et al., 2025).

Pada penelitian-penelitian sebelumya banyak yang meneliti tentang pengaruh jumlah sudu dan sudut *impeller* terhadap kapasitas dan efisiensi pada pompa sentrifugal. Oleh karena itu perlu penelitian lanjutan mengenai pengaruh kecepatan putaran dan bukaan katub terhadap *head*, kapasitas dan efisiensi pompa sentrifugal (Munthe et al., 2025).

Pada penelitian ini peneliti akan memvariasi bukaan katub 25^0; 45^0; dan 65^0. Sedangkan RPM pompa akan

 ISSN 2987-677x

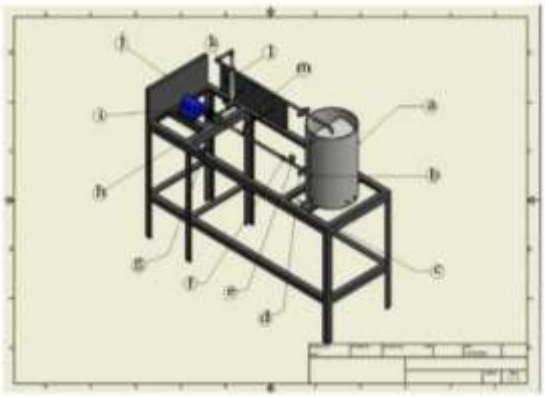
divariasi menjadi 800 RPM, 1600 RPM dan 2400 RPM. Harapan dengan penelitian ini mampu memberi wawasan dan ilmu pengetahuan yang nantinya akan digunakan dalam perancangan instalasi pompa untuk mengalirkan atau memindahkan fluida cair atau air dalam kehidupan sehari-hari dan kebutuhan air dalam industri.

Metode

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen yang bertujuan untuk menganalisis nilai *head*, kapasitas dan efisiensi pada sistem pompa . Nilai *head*, kapasitas dan efisiensi tersebut diperoleh dari hasil perhitungan rumus dari data primer yaitu nilai tekanan *input* (*manometer suction*) pada pompa dan tekanan *output* (*manometer discharge*) pada pompa yang diperoleh dari hasil pengukuran. Pada penelitian ini peneliti memvariasi bukaan katub pada sistem saluran fluida pada pipa dan RPM Pompa. Variabel penelitian yang digunakan antara lain :

a. Variabel bebas adalah variabel yang mempunyai pengaruh terhadap variabel terikat. Pada penelitian ini variabel bebas, yaitu RPM Pompa (800, 1600, 2400) dan bukaan katub (25^0, 45^0, 65^0).
b. Variabel terikat adalah variabel yang nilainya dipengaruhi oleh perlakuan atau perubahan dari variabel bebas. Variabel terikat yang diteliti antara lain nilai *head*, kapasitas dan efisiensi pada sistem pompa.
c. Variabel kontrol adalah variabel yang dipertahankan tetap atau tidak berubah selama eksperimen, agar tidak mempengaruhi hasil penelitian. Variabel kontrolnya antara lain: pompa sentrifugal 3 sudu, jenis fluida yang digunakan yaitu air, temperatur air sekitar 25 – 30^0 C, diameter pipa *discharge* 0,019 m, diameter pipa *suction* 0,019 m, panjang pipa *discharge* 2,46 m, dan panjang pipa suction 1,46 m.

Selain variabel penelitian juga didukung dengan alat penelitian dan instrumen penelitian. Berikut di bawah ini merupakan gambar alat penelitian.



Gambar 1. Instrumen dan Komponen Pompa

Keterangan :

a. *Reservoir*
b. Pengukuran ketinggian air
c. Kran air
d. Penyambung pipa
e. Thermometer
f. *Ball valve*
g. Stop kontak
h. Rumah pompa
i. Motor listrik
j. Inverter
k. *Flowmeter*
l. *Manometer discharge*
m. *Manometer suction*

Lebih jelasnya mengenai alat penelitian bisa dijelaskan seperti gambar di bawah ini.



Gambar 2. Alat Penelitian

Berikut di bawah ini merupakan penjelasan dari alat penelitian di atas yang digunakan di dalam penelitian.

1. Motor listrik digunakan sebagai penggerak pompa



Gambar 3. Motor listrik

2. Pompa digunakan untuk memindahkan fluida kerja (air) dari permukaan yang bertekanan rendah menunju permukaan yang bertekanan tinggi.



Gambar 4. Pompa

3. Tabung penampung air atau reservoir digunakan untuk menampung air atau sebagai bak penampungan.

 ISSN 2987-677x



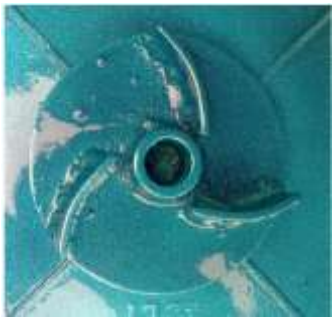
Gambar 5. Tabung penampung air

4. *Ball valve* digunakan untuk mengatur kapasitas aliran dengan cara bukaan katub.



Gambar 6. *Ball valve*

5. *Impeller* pompa digunakan untuk mengubah energi mekanik dari motor menjadi energi kinetik pada fluida sehingga fluida bisa mengalir pada sistem perpipaan.



Gambar 7. *Impeller* pompa

6. *Inverter* digunakan untuk mengatur kecepatan motor listrik.



Gambar 8. *Inverter*

7. *Flowmeter* digunakan untuk mengukur nilai debit air yang mengalir melalui pipa *discharge*.



Gambar 9. *Flowmeter*

8. *Pressure gauge* digunakan untuk mengukur tekanan fluida.



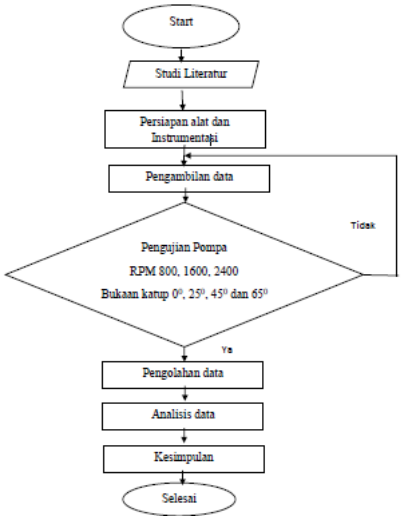
Gambar 10. *Pressure gauge*

9. *Tachometer* digunakan untuk mengukur kecepatan putar motor listrik.



Gambar 11. *Tachometer*

Untuk mempermudah pemahaman tahapan penelitian, maka disusun diagram alir penelitian. Berikut di bawah ini merupakan diagram alir penelitian.



Gambar 12. Diagram alir penelitian

 ISSN 2987-677x

Setelah tahapan penelitian dijelaskan dalam diagram alir, maka tahap berikutnya, yaitu pelaksanaan eksperimen dan pengambilan data. Adapun prosedur pengambilan data dalam penelitian ini dijelaskan sebagai berikut.

1. Persiapan awal
   a. Menyediakan alat dan instrumen penelitian
   b. Melakukan perangkaian alat dan instrumen sesuai dengan desain perancangan.
   c. Menyiapkan lembar berisi tabel pengambilan data.
   d. Melakukan uji coba pada instrumen guna mengetaui apabila terjadi suatu kesalahan proses pengambilan data dimulai.
2. Pengambilan data
   a. Memasang *impeller* dengan 3 sudu ke dalam rumah pompa atau volut.
   b. Menyalakan motor listrik sebagai sumber penggerak pompa sentrifugal.
   c. Mengatur putaran motor listrik yang terhubung dengan poros pompa dengan putaran 800 RPM.
   d. Mengatur bukaan *globe valve* dari posisi 0^0 sampai 25^0.
   e. Mengamati dan mencatat data hasil pengukuran ke dalam tabel, yaitu tekanan *suction*, tekanan *discharge*, flowmeter, volmeter dan amperemeter.
   f. Lakukan kembali langkah c sampai f untuk mengambil data pada RPM 1600 dan 2400 dengan bukaan katub 45^0 dan 65^0.

Setelah data penelitian diperoleh, maka langkah selanjutnya adalah teknik analisis data. Teknik analisis data yang digunakan, yaitu deskriptif kuantitatif.

Hasil Kerja

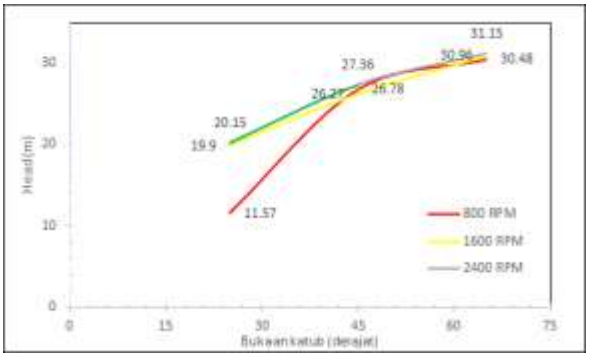
Hasil Pengujian *Head* Pompa

Berikut di bawah ini merupakan tabel hasil pengujian head pompa sentrifugal 3 sudu.

Tabel 1. Hasil Pengujian *Head* Pompa

Bukaan *valve* (derajat)	*Head* (m)		
	800 RPM	1600 RPM	2400 RPM
25	11.57	19.90	20.15
45	26.78	26.27	27.36
65	30.48	30.96	31.15

Tabel 1 menunjukkan hasil pengujian *head* pompa. Pengujian *head* pompa ini diperoleh dari hasil perhitungan. Hasil perhitungan dimulai dari pengukuran tekanan *suction* dan pengukuran tekanan *discharge*. Pengujian ke-1 bahwa pada 800 RPM dan bukaan katub 25^0, 45^0 dan 65^0 menghasilkan *head* 11.57 m, 26.78 m dan 30.48 m. Pengujian ke-2 pada 1600 RPM menghasilkan *head* 19.90 m, 26.27 m dan 30.96 m. Pengujian ke-3 pada 2400 RPM menghasilkan *head* 20.15 m, 27.36 m dan 31.15 m. Berikut di bawah ini merupakan grafik *head* pompa dari pengaruh RPM dan bukaan katub.



Gambar 13. Grafik *Head* Pompa

Dari Gambar 13 menunjukkan bahwa *head* maksimum terjadi pada bukaan katub 65^0 pada RPM 2400 dengan nilai *head* 31.15 m. Dari data tersebut diatas menunjukkan bahwa ada pengaruh bukaan katup dan RPM terhadap head. Semakin besar bukaan katub dan RPM maka nilai *head* yang dihasilkan semakin besar (Suryaman, 2021).

Hasil Pengujian Kapasitas Pompa

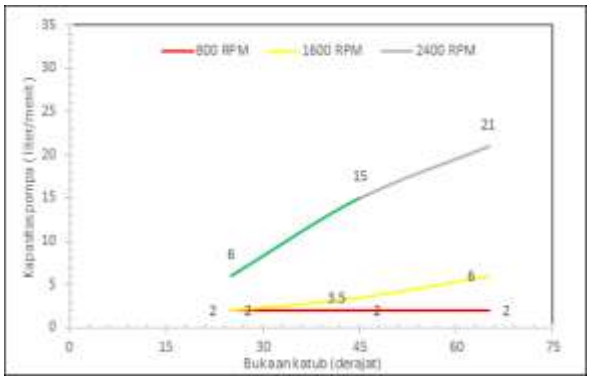
Tabel berikut di bawah ini merupakan hasil pengukuran kapasitas pompa selama proses eksperimen. Data tersebut merupakan hasil perhitungan debit aliran berdasarkan volume fluida yang mengalir dalam selang waktu tertentu.

Tabel 2. Hasil Pengujian Kapasitas Pompa

Bukaan *valve* (derajat)	Kapasitas pompa (lt/min)		
	800 RPM	1600 RPM	2400 RPM
25	2	2	6
45	2	3.5	15
65	2	6	21

Dari Tabel 2 menunjukkan bahwa pada pengujian ke-1 menggunakan bukaan katub 25^0, 45^0 dan 65^0 dan RPM 800 menghasilkan kapasitas pompa sebesar 2 liter/menit. Pada pengujian ke-2 pada RPM 1600 mampu menghasilkan kapasitas sebesar 2 liter/menit, 3.5 liter/menit dan 6 liter/menit. Pada pengujian ke-3 pada RPM 2400 menghasilkan kapasitas 6 liter/menit, 15 liter/menit dan 21 liter/menit. Data tabel di atas bisa diambil kesimpulan bahwa semakin besar bukaan katub maka hambatan aliran berkurang, fluida mengalir lebih bebas sehingga berdampak pada kapasitas pompa meningkat. Begitu juga dengan RPM, jika RPM pompa semakin tinggi maka kecepatan aliran semakin meningkat dan berdampak pada kapasitas pompa juga meningkat(Suryadi & Habibi, 2022). Berikut dibawah ini gambar grafik hubungan RPM dan bukaan katub terhadap kapasitas yang dihasilkan.

 ISSN 2987-677x



Gambar 14. Grafik Kapasitas Pompa

Gambar 14 menunjukkan hubungan antara bukaan katub dan RPM yang berpengaruh pada besarnya kapasitas pompa yang dihasilkan. Bukaan katub yang lebih besar akan menghasilkan kapasitas pompa yang lebih tinggi, karena hambatan aliran berkurang. RPM meningkat juga bisa meningkatkan kapasitas aliran pompa, karena disebabkan energi mekanik yang diberikan oleh impeller kepada fluida menjadi lebih besar (Solihat & Mahendrawan, 2024).

Hasil Pengujian Efisiensi Pompa

Tabel efisiensi pompa berikut menunjukkan hubungan antara variasi bukaan katub dan kecepatan putar pompa terhadap nilai efisiensi pompa yang dihasilkan selama proses pengujian.

Tabel 3. Hasil Pengujian Efisiensi Pompa

Bukaan *valve* (derajat)	Efisiensi pompa (%)		
	800 RPM	1600 RPM	2400 RPM
25	2.15	2.8	7.7
45	4.97	7.4	26.1
65	5.66	14.609	41.6

Dari tabel 3 menunjukkan bahwa bukaan katub 25^0 sampai 65^0 dapat meningkatkan nilai efisiensi pompa, peningkatan tersebut juga seiring dengan peningkatan RPM pompa dari 800 RPM sampai 2400 RPM juga bisa meningkatkan efisiensi pompa. Efisiensi pompa mencapai nilai maksimum terjadi pada bukaan katub 65^0 dan RPM 2400 sebesar 41.6%. Hal ini disebabkan semakin besar bukaan katub hambatan aliran berkurang sehingga fluida mengalir lebih mudah yang menyebabkan efisiensi pompa cenderung meningkat. Begitu juga dengan RPM, ketika RPM tinggi berarti impeller memberikan lebih banyak energi mekanis ke fluida sehingga efisiensi bisa meningkat karena energi yang disalurkan lebih efektif (Basuki et al., 2024).

Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang dilakukan membuktikan bahwa bukaan katub dan RPM pompa secara langsung mempengaruhi besar kecilnya nilai *head*, kapasitas dan efisiensi pompa. Hasil optimal terjadi pada bukaan katub 65^0 dan RPM 2400 dengan nilai head 31.15 m, kapasitas pompa 21 liter/menit dan efisiensi pompa sebesar 41.6%. Semakin besar bukaan katub dan semakin tinggi RPM dapat meningkatkan nilai *head*, kapasitas dan efisiensi pompa.

Ucapan Terimakasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Universitas Hasyim Asy'ari yang telah memberikan dukungan terlaksananya kegiatan penelitian ini. Rekan - rekan Dosen Program Studi Teknik Mesin yang telah memberikan dukungan dalam keikutsertaan Program Studi Profesi Insinyur. Kami juga mengucapkan banyak terima kasih kepada segenap civitas akademika dan pembimbing kami di PSPI Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya yang telah membimbing kami dalam program keinsinyuran.

Referensi

Arijanto., Yohana, E., & Sinaga, F. T. H. (2015). Analisis Pengaruh Kekentalan Fluida Air Dan Minyak Kelapa Pada Performansi Pompa Sentrifugal. *Jurnal Teknik Mesin S-1*, *3*(2), 212–219.

Basuki, B., Rosadi, M. M., Pramitasari, R. E., Hadi, F. S., & Wati, D. A. R. (2024). Analisis Pengaruh Bukaan Katup Terhadap Kapasitas dan Efisiensi Pompa Sentrifugal 3 Sudu pada 1600 RPM. *Quantum Teknika : Jurnal Teknik Mesin Terapan*, *5*(2), 59–61. https://doi.org/10.18196/jqt.v5i2.20729

Gunawan, P. (2018). Rancang Bangun Alat Peraga Sistem Pompa Sentrifugal. *Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia*, 7–22. https://dspace.uii.ac.id/handle/123456789/6491

Kristiyono, A. E., & Gunarti, M. R. (2018). Terhadap Kapasitas Dan Efisiensi Pompa Sentrifugal. *Samudra Politeknik Pelayaran Surabaya*, *3*(1), 26–34.

Munthe, D. J., Lingga, J., Jufrizal, J., & Idris, M. (2025). Pengaruh Variasi Bukaan Katup terhadap Kinerja Sistem pada Konfigurasi Pompa Seri dan Paralel. *IRA Jurnal Teknik Mesin Dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, *4*(1), 105–119. https://doi.org/10.56862/irajtma.v4i1.185

Solihat, I., & Mahendrawan, E. (2024). Analisis Pompa Sentrifugal Pada Alat Uji Aliran Fluida Terhadap Daya Listrik, Daya Hidrolis, Headloss Dan Nilai Efisensi Pompa. *Jurnal Teknik Mesin Cakram*, *7*(2), 76–90. https://doi.org/10.32493/jtc.v7i2.47905

Subagyo, R., & Hendratno, B. R. (2021). Analisa Performance Pompa Sentrifugal Di Unit 2 Pt. Pupuk Kalimantan Timur. *Elemen : Jurnal Teknik Mesin*, *8*(1), 30–38. https://doi.org/10.34128/je.v8i1.156

Sularso, M. (2010). Pengujian Kinerja Pompa Sentrifugal Menggunakan Kontrol Inventer. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknika*, *13*(1), 21–30.

Suryadi, S., & Habibi, M. (2022). Analisa Pengaruh Putaran Pompa Centrifugal (Seri dan Paralel) Terhadap Aliran Fluida dan Efisiensi Pompa. *Malikussaleh Journal of Mechanical Science and Technology*, *6*(3), 34. https://doi.org/10.29103/mjmst.v6i3.10385

Suryaman, D. (2021). Analisis Debit Air Pada Pompa Sentrifugal Dengan Variasi Bukaan Ball Valve Dan Variasi Kecepatan Putaran Motor Listrik Dengan Pemasangan Seri. *Jiptek*, *2*(2), 1–6.

ISSN 2987-677x

Analisis Perbandingan Efektifitas Penyangga *Drawpoint* Tipe *Lintel Set* dan *Hanging Brow* pada Tambang Bawah Tanah *Grasberg Block Caving* di PT Freeport Indonesia

Imam Turmudzi[1] Andrew Parhusip[2] Suratno Lourentius[1,3]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2] GBC Construction Superintendent, PT. Freeport Indonesia

[3] Program Studi D III Teknik Kimia Politeknik Katolik Mangunwijaya Semarang

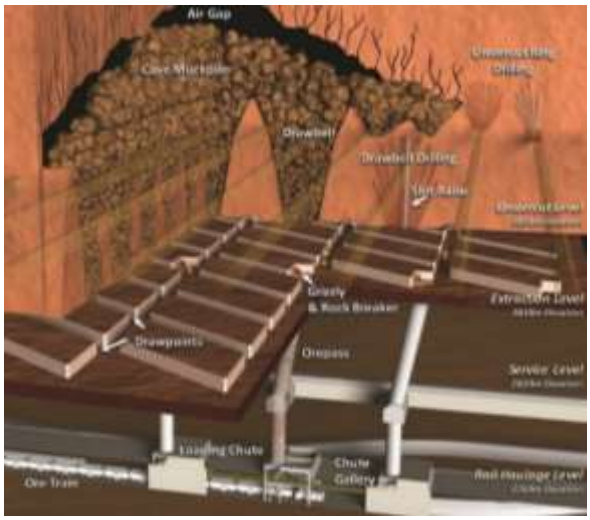
✉ iturmudz@fmi.com
✉ suratno.lourentius@ukwms.ac.id
✉ suratno.lourentius@gmail.com

Sektor pertambangan merupakan pilar strategis dalam pembangunan ekonomi karena menyediakan bahan baku logam, mineral, dan energi yang menopang berbagai industri hilir, sekaligus memberikan kontribusi signifikan terhadap pendapatan daerah dan nasional, penciptaan lapangan kerja, adopsi teknologi, serta percepatan pembangunan infrastruktur di wilayah operasional. Dalam tambang bawah tanah, keberhasilan operasi sangat dipengaruhi oleh efektivitas rekayasa struktur, termasuk penyangga *drawpoint* tipe *lintel set* dan *hanging brow* yang berfungsi menahan tegangan batuan, mencegah *rockfall* dan *muck slide*, serta melindungi personel dan peralatan selama proses *mucking* pada metode *block caving*. Penelitian ini menganalisis efektivitas kedua tipe penyangga tersebut pada operasi *Grasberg Block Caving* (GBC) PT Freeport Indonesia melalui evaluasi desain kapasitas struktur, durasi pemasangan, kebutuhan tenaga kerja, biaya konstruksi, serta peluang improvement metode kerja. Hasil penelitian menunjukkan perbedaan kinerja dalam aspek biaya, waktu pemasangan, dan potensi peningkatan produksi yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan untuk menentukan struktur penyangga yang paling efektif bagi operasi penambangan.

Kata kunci: Tambang Bawah Tanah, Konstruksi, Drawpoint, Indeks Perbandingan Efektifitas, Profesionalisme

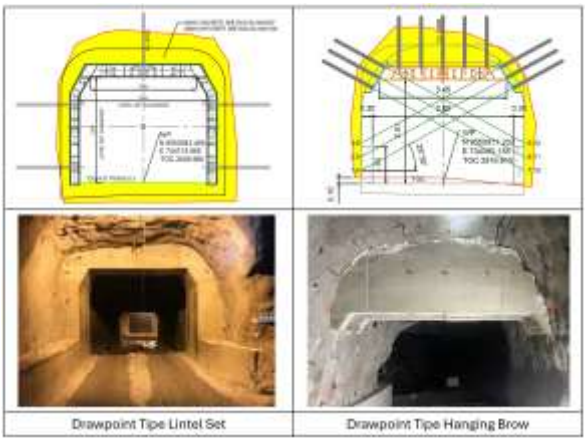
Pendahuluan

Kegiatan penambangan bawah tanah merupakan proses yang menuntut penerapan rekayasa struktur yang tepat guna untuk memastikan keamanan, efektivitas, serta keberlanjutan operasi. Pada metode *block caving*, salah satu elemen teknis yang memiliki peran sangat penting adalah sistem penyangga pada area *drawpoint*. Ilustrasi tentang metode penambangan sistem *block caving* yang terdapat di PT Freeport Indonesia ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Penambangan Bawah Tanah Metode *Block Caving*

Penyangga ini berfungsi mempertahankan stabilitas bukaan, menahan konsentrasi tegangan batuan, serta memberikan perlindungan terhadap pekerja dan peralatan selama kegiatan pengambilan bijih (*mucking*). Dua jenis penyangga yang umum digunakan, yaitu *lintel set* dan *hanging brow* yang memiliki karakteristik desain, perilaku struktural, dan metode konstruksi yang berbeda, sehingga dapat memengaruhi aspek durasi pemasangan, kebutuhan tenaga kerja, biaya konstruksi, hingga performa produksi (penambangan bijih) pada tambang bawah tanah dengan metode *block caving*. Kedua desain *drawpoint* tipe *lintel set* dan *hanging brow* ditunjukkan pada Gambar 2.

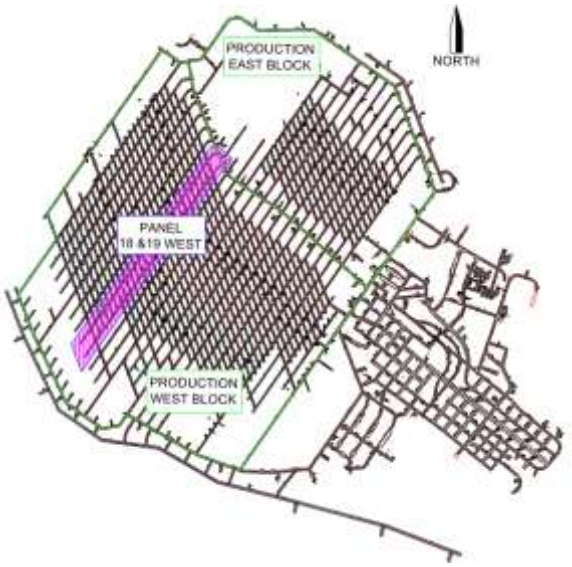


Gambar 2. Tipe *Drawpoint*

 ISSN 2987-677x

Perbandingan efektivitas kedua tipe penyangga tersebut menjadi relevan karena berkaitan langsung dengan praktik keinsinyuran yang menuntut penerapan prinsip desain struktural, efisiensi konstruksi, keselamatan kerja, dan manajemen risiko dalam lingkungan tambang bawah tanah. Karena tata letak tambang ini memiliki area yang sangat luas dengan jejak (*footprint*) berdiameter sekitar satu kilometer (±700.000 m²) dan mencakup hampir 2.400 *drawpoint* dan juga mendesak karena perbaikan berkelanjutan (*continuous improvement*) tetap harus dijalankan mengingat fase produksi sudah berjalan dan diharapkan mampu memproduksi bijih sebesar 160.000 ton per hari (Feasibility Study Team, 2008).

Dalam konteks tersebut, studi kasus ini dilakukan untuk menganalisis secara sistematis efektivitas kerja antara penyangga *lintel set* dan *hanging brow* melalui penilaian aspek desain kapasitas struktur, durasi pemasangan, jumlah tenaga kerja, dan biaya konstruksi. Proyek ini mencakup identifikasi permasalahan teknis di lapangan, evaluasi alternatif solusi, serta penyusunan rekomendasi perbaikan (*improvement*) metode konstruksi penyangga *drawpoint* berdasarkan kondisi aktual di area Panel 18 dan 19 West tambang bawah tanah GBC (*Grasberg Block Caving*) di PT Freeport Indonesia (PTFI) yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Level Extraction 2830L, Panel 18 dan 19 West

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya bertujuan menyelesaikan persoalan operasional penambangan, tetapi juga mendukung pengembangan kompetensi profesional keinsinyuran sesuai tujuan dari Program Profesi Insinyur.

Metode

Metode analisis dalam studi kasus ini menggunakan pendekatan perbandingan untuk mengetahui efektivitas dua jenis struktur penyangga *drawpoint*, yaitu *lintel set* dan *hanging brow*, yang diterapkan pada area kerja tambang bawah tanah GBC di PTFI. Analisis perbandingan ini bertujuan menilai perbedaan kinerja kedua tipe penyangga berdasarkan parameter teknis, operasional, dan keselamatan guna menentukan struktur yang paling efektif dalam mendukung stabilitas *drawpoint*.

Efektivitas dihitung menggunakan indeks sederhana melalui persamaan:

$$I = \frac{\mathrm{Xi}}{\mathrm{X}_{baseline}} \, x \, 100\%$$

Dimana,
X_i = Nilai dari objek/kelompok yang akan dibandingkan,
$X_{baseline}$ = Nilai acuan/standar/pembanding,
I = Indeks perbandingan efektifitas (dalam persen),

dimana nilai aktual dibandingkan dengan nilai acuan untuk memperoleh indeks efektivitas dalam persen. Penilaian dilakukan terhadap beberapa parameter utama, meliputi desain bukaan *drawpoint* dan kesesuaiannya dengan kapasitas operasional LHD, efisiensi sumber daya dan kebutuhan konstruksi, serta biaya dan waktu instalasi. Hasil perbandingan kuantitatif ini kemudian digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan untuk menentukan tipe penyangga yang memberikan efektivitas tertinggi bagi operasi penambangan bawah tanah pada sistem *block caving* GBC. Berikut adalah unit LHD yang ditunjukkan Gambar 4.



Gambar 4. Load, Haul, Dump (LHD)

Hasil Kerja

Analisis Desain Bukaan Drawpoint

Dengan menggunakan persamaan indeks efektivitas didapat hasil perhitungan yang ditabelkan sebagai berikut:

Tabel 1. Profil Bukaan *Drawpoint* Dibandingkan dengan Lebar *Bucket* LHD

Deskripsi	Panel	Lintel Set	Hanging Brow
Lebar (mm)	4.400,00	3.400,00	4.200,00
Tinggi Panel (mm)	4.000,00	2.800,00	2.810,00
Tipe Unit LHD	**1600G ($5.6m^3$)**	**1700K ($6.6m^3$)**	**1700K ($7.5m^3$)**
Lebar Bucket LHD (mm)	2.723,00	3.054,00	3.376,00
Sisa Lebar-Jarak Ruang/Clearance (mm)			
Lintel Set	677,00	346,00	24,00
Hanging Brow	1.477,00	1.146,00	824,00
Indeks Efektifitas	**3433,33%**		

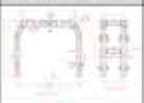
Pada Tabel 1 di atas dapat dilihat data perbandingan geometri panel, dimensi bukaan *lintel set* dan *hanging brow*, serta ukuran *bucket* LHD yang digunakan, dapat dilihat bahwa perbedaan utama antartipe penyangga *drawpoint* terletak pada sisa lebar ruang (*clearance*)

 ISSN 2987-677x

yang tersedia bagi unit LHD saat bermanuver. *Lintel set* memberikan *clearance* terkecil, yaitu 346 mm, bahkan hanya 24 mm pada konfigurasi tertentu, sehingga meningkatkan potensi hambatan operasional, risiko kontak dengan struktur, serta mengurangi fleksibilitas manuver alat. Sebaliknya, *hanging brow* menghasilkan *clearance* yang jauh lebih besar, yakni 1.146 mm hingga 1.477 mm, yang secara signifikan memperbaiki aksesibilitas alat, mengurangi risiko gesekan terhadap struktur, dan meningkatkan kelancaran proses pemuatan bijih. Perbedaan lebar ruang ini berkontribusi langsung terhadap efektivitas operasional pada *drawpoint*. Oleh karena *clearance* menjadi salah satu syarat penting bagi keselamatan dan produktivitas armada LHD. Lebih lanjut, nilai indeks efektivitas sebesar 3433,33% menunjukkan keunggulan kuantitatif yang sangat signifikan pada desain *hanging brow* dibanding *lintel set* dalam konteks ruang operasi unit LHD.

Perbandingan Metode Konstruksi, Biaya dan Durasi Pemasangan

Tabel 2. Perbandingan Metode Konstruksi untuk Berbagai Tipe *Drawpoint*

Metode Konstruksi	Lintel Set	Hanging Brow	Hanging Brow
Gambar			
Tipe	1	2	3
Spesifikasi lebar efektif (mm)	3.400,0	3.448,0	3.848,0
Berat (kg)	4.148,7	1.096,6	1.563,7
Persiapan dan material	Penanganan manual dan mekanis	Penanganan manual dan mekanis	Penanganan manual dan mekanis
Survei lokasi	Penandaan dengan menggunakan alat survey	Penandaan dengan menggunakan alat survey	Penandaan dengan menggunakan alat survey
Pekerjaan tanah dan pembersihan	Utilisasi Backhoe Loader 428F dan penggalian manual	Utilisasi Backhoe Loader 428F dan penggalian manual	Utilisasi Backhoe Loader 428F dan penggalian manual
Lantai kerja/Lean concrete	Mixer truck 1248 dan 3 orang tenaga kerja	Mixer truck 1248 dan 3 orang tenaga kerja	Mixer truck 1248 dan 3 orang tenaga kerja
Pengeboran anchor/ threadbar	Jumbo Drill Axera 6 740157	Jumbo Drill Axera 6 740157	Jumbo Drill Axera 6 740157
Jumlah lubang anchor	20	22	34
Material grouting	Resin	Resin	Resin
Alat Angkat	Telehandler 943D + Jig	Telehandler 943D + Jig	Telehandler 943D + Jig
Tenaga Kerja (Orang)	3,6	2,9	2,7
Pembesian	Wiremesh	Wiremesh	Wiremesh
Perancah (Formwork)	Modular	Modular	Modular
Pompa beton	Jacon Pump	Jacon Pump	Jacon Pump

Pada tabel di atas dapat dilihat bahwa tidak ada metode kerja baru yang digunakan untuk melakukan pemasangan tiga tipe penyangga *drawpoint* tersebut. Perbedaan yang paling menonjol antartipe terletak pada desain lebar bukaan dan kebutuhan sumber daya. Lebar efektif bukaan meningkat dari kurang-lebih 3.400 mm (*Lintel Set*) menjadi sekitar 3.449 mm (*Hanging Brow* tipe 2) dan 3.848 mm (*Hanging Brow* tipe 3), yang berimplikasi langsung terhadap jarak bebas (*clearance*) manuver LHD, risiko kemacetan aliran bijih (*ore/muck*), serta ruang kerja saat pengeboran dan injeksi (*grouting*).

Secara praktis, bukaan yang lebih lebar cenderung menurunkan frekuensi hambatan di mulut *drawpoint*, namun menuntut kontrol stabilitas *hanging brow* dan pengawasan saat pemasangan angkur (*threadbar*) yang lebih ketat. Perbedaan berat komponen sekitar ±4.149 kg (*Lintel Set*), ±1.097 kg (*Hanging Brow* tipe 2), dan ±1.564 kg (*Hanging Brow* tipe 3) juga memengaruhi kebutuhan *handling* serta tata laksana pengangkatan dan pengikatan (*lifting & rigging*), yang pada akhirnya akan berdampak pada estimasi durasi tiap langkah pemasangan. Dari sisi sistem pengangkuran atau penjangkaran, jumlah atau konfigurasi lubang angkur mencerminkan strategi pembagian beban dan target kapasitas penopang atau penggantung yang berbeda. Kombinasi jumlah titik bor (*drilling*), spesifikasi angkur (*threadbar*), dan pola *grouting* menentukan kebutuhan waktu untuk melakukan bor-pasang-injeksi resin yang juga sekaligus memengaruhi kapasitas harian tim pemasangan.

Tabel 3. Perbandingan Durasi, Tenaga Kerja, dan Biaya Pemasangan

Tipe Drawpoint	Deskripsi	KPI (Manshift)	Durasi (Hari)	Tenaga Kerja (Orang)	Biaya
Tipe 1	Lintel Set (3400mm - 20 Holes)	66,0	8,5	3,6	X
Tipe 2	Hanging Brow (3448mm - 22 Holes)	56,0	8,8	2,9	0,55 kali X
Tipe 3	Hanging Brow (3848mm - 34 Holes)	67,0	10,0	2,7	0,57 kali X

Berdasarkan hasil perhitungan pada tabel di atas pada ketiga tipe penyangga *drawpoint*, terlihat bahwa indikator kinerja KPI (*manshift*) dan durasi pemasangan menunjukkan variasi yang cukup signifikan sehingga menjadi parameter penting dalam menilai efektivitas konstruksi. Tipe 1 (*Lintel Set* 3400 mm) mempunyai nilai KPI sebesar 66 *manshift* dengan durasi 8,5 hari, yang menunjukkan kebutuhan waktu dan alokasi jam kerja yang relatif moderat. Sementara itu, Tipe 2 (*Hanging Brow* 3448 mm) mempunyai nilai KPI paling rendah, yaitu 56 *manshift* dengan durasi 8,8 hari, mencerminkan efisiensi *manshift* yang lebih baik meskipun durasi kerjanya sedikit lebih panjang. Adapun Tipe 3 (*Hanging Brow* 3848 mm) menunjukkan KPI tertinggi, yakni 67 *manshift*, disertai durasi pemasangan yang paling panjang (10 hari). Variasi ini mencerminkan bahwa kompleksitas desain bukaan dan jumlah lubang angkur berpengaruh langsung terhadap beban kerja dan kebutuhan waktu penyelesaian.

Dari sisi tenaga kerja dan biaya, ketiga tipe juga menunjukkan karakteristik yang berbeda. Tipe 1 membutuhkan tenaga kerja paling banyak (3,6 orang),

 ISSN 2987-677x

sejalan dengan bobot struktur dan jumlah lubang angkur yang lebih tinggi. Tipe 2 memerlukan tenaga kerja lebih sedikit (2,9 orang), sehingga memungkinkan efisiensi operasional dan memberikan dampak positif pada produktivitas. Tipe 3 menunjukkan kebutuhan tenaga kerja paling rendah (2,7 orang), namun durasi pemasangan yang lebih panjang menyebabkan total biaya tetap berada pada kisaran 0,57 kali biaya Tipe 1, sedikit lebih tinggi dibanding Tipe 2 yang berada pada 0,55 kali biaya Tipe 1. Perbandingan ini menegaskan bahwa efisiensi biaya tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah tenaga kerja, namun juga oleh durasi kerja dan kompleksitas konstruksi yang meliputi penanganan material, pemasangan angkur, dan koordinasi antar pekerjaan.

Penilaian Kuantitatif terhadap Perbandingan *Lintel Set* dan *Hanging Brow* Menggunakan Indeks Efektifitas

Analisis perbandingan terhadap struktur penyangga *lintel set* dan *hanging brow* (ketiga tipe *drawpoint*) adalah sebagai berikut:

Tabel 4. Indeks Efektifitas Perbandingan Durasi Pemasangan, Tenaga Kerja, dan Biaya Pemasangan

Indeks Efektifitas	I_{Durasi}, %	$I_{Tenaga\ Kerja}$, %	I_{Biaya}, %
Tipe 1 / Tipe 2	97	124	183
Tipe 1 / Tipe 3	85	132	176
Tipe 2 / Tipe 1	103	81	55
Tipe 2 / Tipe 3	88	107	96
Tipe 3 / Tipe 1	118	76	57
Tipe 3 / Tipe 2	114	94	104

Indeks efektivitas dinyatakan dalam persentase untuk tiga parameter kinerja, durasi pemasangan (I_{Durasi}), kebutuhan tenaga kerja ($I_{Tenaga\ Kerja}$), dan biaya pemasangan (I_{Biaya}).

Aspek Durasi Pemasangan

Perbandingan Tipe 1 terhadap Tipe 2 menghasilkan I_{Durasi} = 97%, yang mengindikasikan bahwa Tipe 1 memiliki durasi pemasangan sedikit lebih singkat (≈3% lebih cepat) dibandingkan Tipe 2. Sebaliknya, pada perbandingan Tipe 1 terhadap Tipe 3, diperoleh I_{Durasi} = 85%, menandakan Tipe 3 secara konsisten lebih cepat (≈15% lebih cepat daripada Tipe 1). Konsistensi tersebut ditegaskan oleh rasio balik Tipe 3 terhadap Tipe 1 sebesar 118%, yang menunjukkan durasi Tipe 1 lebih panjang. Sementara itu, Tipe 2 terhadap Tipe 3 bernilai 88%, mengonfirmasi bahwa Tipe 3 juga lebih cepat dibanding Tipe 2 (sekitar 12%). Secara keseluruhan, Tipe 3 menunjukkan keunggulan waktu pemasangan dibandingkan Tipe 1 dan Tipe 2.

Aspek Kebutuhan Tenaga Kerja

Pada parameter tenaga kerja, Tipe 1 cenderung memerlukan tenaga lebih banyak dibandingkan tipe lainnya. Hal ini tercermin pada Tipe 1/Tipe 2 dengan $I_{Tenaga\ Kerja}$ = 124% dan Tipe 1/Tipe 3 dengan 132%, yang berarti kebutuhan tenaga kerja Tipe 1 lebih tinggi masing masing sekitar 24% dan 32% dibanding pembandingnya. Tipe 2 menunjukkan kebutuhan tenaga yang lebih rendah dari Tipe 1 (rasio Tipe 2/Tipe 1 = 81%) namun lebih tinggi dari Tipe 3 (Tipe 2/Tipe 3 = 107%). Sementara itu, Tipe 3 sebagai opsi paling efisien dari sisi tenaga kerja, tercermin dari Tipe 3/Tipe 1 = 76% (paling hemat terhadap Tipe 1) dan Tipe 3/ Tipe 2 = 94% (sedikit lebih hemat daripada Tipe 2). Dengan demikian, urutan efisiensi tenaga kerja dari yang paling hemat ke paling boros adalah: Tipe 3 → Tipe 2 → Tipe 1.

Aspek Biaya Pemasangan

Dari aspek biaya, Tipe 1 menunjukkan kecenderungan paling mahal. Nilai I_{Biaya} Tipe 1/Tipe 2 = 183% dan Tipe 1/Tipe 3 = 176% mengindikasikan biaya Tipe 1 jauh lebih tinggi dibandingkan Tipe 2 dan Tipe 3. Tipe 2 lebih ekonomis dibanding Tipe 1 (Tipe 2/Tipe 1 = 55%) namun sedikit lebih mahal dibanding Tipe 3 (Tipe 2/Tipe 3 = 96%). Adapun Tipe 3 memperlihatkan biaya yang paling efisien ketika dibandingkan dengan Tipe 1 (Tipe 3/Tipe 1 = 57%) serta relatif setara hingga sedikit lebih rendah dibanding Tipe 2 (Tipe 3/Tipe 2 = 104%, menunjukkan variasi biaya yang masih kompetitif bergantung konteks pekerjaan). Secara ringkas, urutan biaya terendah ke tertinggi adalah: Tipe 3 → Tipe 2 → Tipe 1.

Relevansi Literatur dan Nilai Strategis bagi Profesi Insinyur

Hasil kerja dalam studi ini diperkuat oleh penggunaan literatur teknis yang relevan dan akurat, mencakup referensi desain penyangga *drawpoint*, metode kerja, sumberdaya alat dan pekerja hingga biaya, serta panduan keselamatan yang berlaku, sehingga seluruh analisis memiliki dasar ilmiah yang kuat. Urgensi proyek ini terletak pada pentingnya memastikan efektivitas pada pemasangan penyangga *drawpoint* pada tambang bawah tanah, di mana keputusan teknik berdampak langsung pada keselamatan pekerja, keberlanjutan produksi, dan efisiensi operasional guna mendukung kapasitas produksi bijih sebesar 160.000 ton per hari. Bagi Profesi Insinyur, kegiatan ini memberikan manfaat signifikan karena menuntut penerapan kompetensi profesionalisme keinsinyuran secara komprehensif, mulai dari interpretasi literatur, analisis teknis, evaluasi alternatif solusi, hingga penyusunan rekomendasi perbaikan, sehingga memperkuat kemampuan profesional dalam merancang, mengevaluasi, dan mengoptimalkan solusi teknik yang dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah dan etis.

Sebagai kampus lestari, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya mendukung upaya berkelanjutan dengan penerapan tiga pilar utama (*Triple Bottom Line*) sebagai berikut:

1. Ekonomi: Efektivitas metode konstruksi *drawpoint* yang dianalisis melalui indikator durasi, kebutuhan tenaga kerja, biaya, serta indeks efektivitas mendukung efisiensi operasional dan stabilitas produktivitas, sejalan dengan tujuan pengelolaan sumber daya yang bertanggung jawab.
2. Sosial: Penerapan standar K3L, program *fatigue management*, pelatihan keselamatan, dan keterlibatan kontraktor seperti PT Redpath Indonesia dan PT RUC

 ISSN 2987-677x

Cementation Indonesia memperkuat perlindungan pekerja sekaligus meningkatkan kesejahteraan mereka, mendukung program pembangunan berkelanjutan (Sustainable Development Goals) yang dicanangkan oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB), yakni:

a. SDG 3 (*Good Health and Well-Being*) – Aspek kesehatan dan keselamatan kerja.
b. SDG 8 (*Decent Work and Economic Growth*) – Kondisi kerja aman, produktif, dan layak.
c. SDG 9 (*Industry, Innovation, and Infras-tructure*) – Penerapan metode konstruksi aman & inovatif.

3. Lingkungan: Diwujudkan melalui upaya pencegahan kerusakan (*preventive control*) dan pengendalian dampak konstruksi, yang selaras dengan:
   a. SDG 12 (*Responsible Consumption and Production*) – Kendali limbah, efisiensi material.
   b. SDG 13 (*Climate Action*) - Pengurangan dampak lingkungan operasi.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan bahwa Tipe 3 merupakan kandidat paling kompetitif untuk meningkatkan kecepatan instalasi, menghemat tenaga kerja, dan mengendalikan biaya, sehingga berpotensi meminimalkan *downtime* dan meningkatkan keberlanjutan operasi. Tipe 2 dapat dipertimbangkan sebagai alternatif menengah yang tetap ekonomis dibanding Tipe 1, khususnya pada lingkungan kerja dengan keterbatasan sumber daya namun kebutuhan kecepatan pemasangan masih moderat. Tipe 1, meskipun pada beberapa konteks mungkin dipilih karena pertimbangan kapasitas struktural atau alasan geoteknik spesifik, menunjukkan konsekuensi sumber daya dan biaya yang lebih tinggi, sehingga sebaiknya ditetapkan secara selektif pada lokasi dengan justifikasi teknis yang kuat. Sedangkan untuk langkah perbaikan (*improvement*) metode konstruksi struktur penyangga *drawpoint* tipe *lintel set* dan *hanging brow* tidak ada perubahan yang signifikan dan cenderung sama.

Sejalan dengan temuan tersebut, disarankan agar Tipe 3 dijadikan pilihan utama pada *drawpoint* yang memenuhi persyaratan geoteknik, mengingat keunggulannya dalam efisiensi tenaga kerja dan biaya sekaligus tetap kompetitif dari sisi durasi instalasi. Tipe 2 dapat dipertimbangkan sebagai alternatif pada area yang membutuhkan kontrol biaya lebih ketat, sedangkan Tipe 1 sebaiknya hanya digunakan pada kondisi khusus yang memerlukan justifikasi teknis terkait kapasitas struktural. Pendekatan ini memungkinkan pembuat keputusan menetapkan strategi penyanggaan yang lebih tepat, terukur, dan selaras dengan tujuan peningkatan keselamatan serta optimalisasi produktivitas di Tambang Bawah Tanah GBC.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah berperan penting dan memberikan dukungan dalam pelaksanaan proyek dan penulisan artikel ini, termasuk para pembimbing, rekan sejawat tim konstruksi tambang GBC serta tim divisi/departemen lain, personel operasional lapangan, serta tim teknis yang berkontribusi pada pengumpulan data, validasi temuan, dan penyusunan naskah. Apresiasi khusus disampaikan kepada pihak manajemen yang telah memberikan akses data, fasilitas, serta keahlian teknis yang diperlukan untuk kelancaran kegiatan. Sehingga penelitian dan pengembangan solusi teknik dapat dilaksanakan dengan baik dan sesuai jadwal. Setiap masukan, diskusi, dan kolaborasi yang diberikan telah memperkaya kualitas keluaran ilmiah serta memperkuat relevansi praktis hasil kerja ini bagi pengembangan profesi keinsinyuran.

Referensi

Feasibility Study Team. (2008). *Feasibility study for the Grasberg Block Cave Mine*. Freeport-McMoRan Copper & Gold Inc.

International Monetary Fund. (2025). *Consumer price index manual: Theory*. IMF eLibrary. https://www.elibrary.imf.org/downloadpdf/display/book/9798229014137/CH001.pdf

NSW Resources Regulator. (2017). *Review of drawpoint management*. https://www.resources.nsw.gov.au/sites/default/files/documents/review-of-drawpoint-management.pdf

Parhusip, A., Hartono, F., Siray, M., & Mulyanto, R. (2015). *Draw point construction improvement at Deep Mill Level Zone (DMLZ) PT Freeport Indonesia using the Six Sigma method*. https://www.researchgate.net/publication/293825207

 ISSN 2987-677x

Evaluasi Implementasi Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) serta Identifikasi Risiko Kecelakaan Kerja pada Proyek Konstruksi CV Cahaya Berkah Agung

Rudy Cahyanto[1], Hartono Pranjoto[2]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2]Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ iceman_malang@yahoo.co.id

Penerapan SMK3 pada proyek konstruksi sangat penting untuk mengendalikan risiko kecelakaan kerja yang tinggi. Studi kasus ini bertujuan mengevaluasi implementasi SMK3 serta mengidentifikasi kendala dalam pelaksanaannya di lapangan. Metode yang digunakan adalah pendekatan kualitatif melalui wawancara mendalam, observasi, dan studi dokumentasi terhadap SOP K3, form inspeksi, serta catatan kecelakaan kerja. Informan terdiri dari *Owner*/Direktur, *Site Manager*, *Safety Officer*, dan pekerja konstruksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perusahaan telah memiliki komitmen manajemen, kebijakan tertulis, dan dukungan anggaran dalam penerapan SMK3. Pelaksanaan teknis seperti *toolbox meeting*, *safety induction*, penggunaan APD, dan inspeksi rutin telah berjalan secara sistematis. Namun, masih terdapat kendala berupa kedisiplinan pekerja dan tekanan target proyek sehingga pengawasan cenderung bersifat korektif. Kesimpulan penelitian ini menegaskan bahwa implementasi SMK3 telah berjalan secara administratif dan operasional, tetapi perlu penguatan pendekatan *preventif* dan budaya keselamatan agar efektivitasnya lebih optimal.

Kata kunci: SMK3, keselamatan kerja, proyek konstruksi, implementasi K3, budaya keselamatan

Pendahuluan

Industri konstruksi merupakan salah satu sektor strategis dalam pembangunan nasional yang memiliki kontribusi besar terhadap pertumbuhan infrastruktur dan perekonomian (Putra & Dharma, 2023). Namun demikian, sektor ini juga dikenal sebagai salah satu bidang pekerjaan dengan tingkat risiko kecelakaan kerja yang tinggi. Aktivitas seperti pekerjaan di ketinggian, penggunaan alat berat, instalasi listrik, pengelasan, serta pekerjaan struktur baja dan beton memiliki potensi bahaya yang signifikan apabila tidak dikelola dengan baik (Juliar & Siregar, 2026). Risiko seperti jatuh dari ketinggian, tertimpa material, tersengat listrik, terjepit alat berat, hingga paparan bahan berbahaya dapat menyebabkan kerugian baik secara material maupun non-material. Oleh karena itu, penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) menjadi kebutuhan yang tidak dapat ditawar dalam setiap proyek konstruksi (Mulyo et al., 2020).

Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) merupakan bagian integral dari sistem manajemen perusahaan yang bertujuan untuk mengendalikan risiko yang berkaitan dengan kegiatan kerja guna terciptanya tempat kerja yang aman, efisien, dan produktif (Nurfaizah et al., 2022). Penerapan SMK3 bukan hanya sekadar kewajiban administratif, tetapi merupakan bentuk tanggung jawab profesional dalam memastikan setiap tahapan pekerjaan direncanakan, dilaksanakan, dan diawasi sesuai standar keselamatan yang berlaku. Evaluasi implementasi SMK3 menjadi penting untuk mengetahui sejauh mana kebijakan, prosedur, serta standar operasional yang telah ditetapkan benar-benar diterapkan secara konsisten di lapangan (Riswana, 2022).

Tabel 1. Identifikasi Risiko dan Pengendalian K3 pada Proyek Konstruksi

No	Jenis Pekerjaan	Potensi Bahaya Utama	Tingkat Risiko	Pengendalian K3
1	Pekerjaan di Ketinggian	Jatuh dari ketinggian, tertimpa material	Sangat Tinggi	Pemasangan *scaffolding* standar, *safety net*, *full body harness*, inspeksi rutin
2	Penggunaan Alat Berat	Terjepit, tertabrak, alat terbalik	Tinggi	Operator bersertifikat, pembatasan zona aman, rambu peringatan, *briefing* kerja
3	Instalasi Listrik	Tersengat listrik, korsleting, kebakaran	Sangat Tinggi	Sistem isolasi, penerapan LOTO, APD listrik, *grounding system*
4	Pengelasan & Pemotongan	Kebakaran, radiasi UV, inhalasi asap las	Tinggi	*Welding shield*, sarung tangan tahan panas, ventilasi memadai, APAR
5	Struktur Beton & Baja	Tertimpa material, keruntuhan *bekisting*, jatuh benda	Tinggi	Inspeksi *bekisting*, prosedur *erection*, APD lengkap, pengawasan teknis
6	Instalasi IPAL & Limbah	Paparan bahan kimia berbahaya, gas beracun	Tinggi	MSDS tersedia, APD kimia, detektor gas, ventilasi area tertutup

Sumber: (Permenaker No. 5 Tahun 1996 dan PP No. 50 Tahun 2012)

 ISSN 2987-677x

Tabel identifikasi risiko dan pengendalian K3 pada proyek konstruksi memperlihatkan bahwa sebagian besar aktivitas konstruksi berada pada kategori risiko tinggi hingga sangat tinggi, sehingga implementasi SMK3 harus dilakukan secara sistematis, konsisten, dan terdokumentasi untuk mencegah terjadinya kecelakaan kerja.

Tabel 2. Tren Kecelakaan Kerja Nasional dan Kontribusi Sektor Konstruksi

Tahun	Jumlah Kecelakaan Kerja	Sektor Konstruksi	Korban Meninggal	Estimasi Kerugian Ekonomi
2020	177.161 kasus	32,4 %	2.375 orang	Rp 1,8 Triliun
2021	221.740 kasus	34,1 %	2.912 orang	Rp 2,1 Triliun
2022	265.334 kasus	35,8 %	3.109 orang	Rp 2,6 Triliun
2023	298.137 kasus	36,2 %	3.442 orang	Rp 3,1 Triliun
Tren (2020–2023)	↑ Naik 68 %	↑ Kontribusi meningkat	↑ Naik 45 %	↑ Naik 72 %

Sumber: (BPJS Ketenagakerjaan, 2023)

Tren kecelakaan kerja 2020–2023 meningkat signifikan (kecelakaan ±68%, kematian ±45%, kerugian ±72%), dengan sektor konstruksi menyumbang >30% kasus. Hal ini menegaskan pentingnya penerapan dan evaluasi SMK3. Meski regulasi sudah ada, implementasi di lapangan masih terkendala kesenjangan antara kebijakan dan praktik, terutama pada perusahaan konstruksi skala menengah (Marthinus et al., 2023). Dasar hukum SMK3 di Indonesia meliputi PP No. 50 Tahun 2012 dan UU No. 1 Tahun 1970, serta diperkuat oleh Permen PUPR No. 10 Tahun 2021 tentang SMKK (Juliar & Siregar, 2026).

Kajian langsung pada proyek konstruksi diperlukan untuk menilai implementasi SMK3 secara nyata. CV Cahaya Berkah Agung di Kabupaten Pati, Jawa Tengah, bergerak di berbagai bidang konstruksi (gedung, IPAL, perumahan, industri) dengan komitmen pada SOP, kualitas, dan keselamatan kerja. Kompleksitas pekerjaan yang tinggi menjadikan proyeknya relevan sebagai studi kasus evaluasi SMK3.

Meski telah memiliki struktur pengawas lapangan dan HSE, penerapan K3 masih menghadapi tantangan seperti kedisiplinan penggunaan APD, pemahaman prosedur kerja aman, pengawasan potensi bahaya, serta pengendalian risiko yang dinamis sesuai tahapan pekerjaan (Kadir et al., 2026). Faktor budaya kerja, tekanan target proyek, dan keterbatasan sumber daya memengaruhi efektivitas implementasi SMK3 (Astari & Suidarma, 2022). Oleh karena itu, diperlukan evaluasi tingkat implementasi, identifikasi risiko dominan, serta analisis kesesuaian antara kebijakan dan praktik di lapangan.

Studi kasus ini penting karena memberikan gambaran implementasi SMK3 sekaligus kontribusi praktis melalui identifikasi risiko dan rekomendasi teknis. Hasilnya diharapkan mendukung perbaikan berkelanjutan, mengurangi kecelakaan kerja, dan mencapai target *zero accident*.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan studi kasus pada proyek CV Cahaya Berkah Agung di Kabupaten Pati (Februari–Maret 2026). Data dikumpulkan melalui observasi partisipatif pasif, wawancara enam informan, dan studi dokumen K3, dengan fokus pada prosedur, APD, pengamanan, dan potensi bahaya. Analisis dilakukan secara deskriptif kualitatif melalui reduksi data, penyajian naratif/tabel risiko, dan penarikan kesimpulan. Keabsahan data dijamin dengan triangulasi untuk menilai implementasi SMK3, mengidentifikasi risiko dominan, dan menyusun rekomendasi menuju *zero accident*.

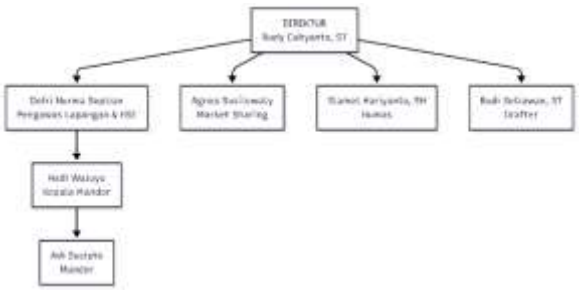
Hasil Kerja

Situasi Permasalahan

Proyek konstruksi oleh CV Cahaya Berkah Agung di Kabupaten Pati, Jawa Tengah merupakan proyek aktif dengan pekerjaan berisiko tinggi (beton bertulang, kerja di ketinggian, instalasi listrik, pengelasan, dan alat mekanis). Kompleksitas pekerjaan yang berlangsung simultan menyebabkan potensi bahaya yang dinamis sehingga memerlukan pengendalian risiko yang konsisten melalui SMK3.

Pengambilan keputusan berada pada *Owner*/ Direktur, sementara *Site Manager* dan HSE bertanggung jawab pada implementasi di lapangan. Meski menargetkan *zero accident* dan kepatuhan regulasi, praktiknya masih terdapat potensi konflik antara tuntutan produktivitas dan konsistensi penerapan keselamatan, terutama dalam penggunaan APD dan pengawasan rutin.

Gambar 1. Struktur Organisasi Perusahaan



Tujuan proyek adalah aman, produktif, tepat waktu, dan *zero accident*, namun terdapat konflik antara produktivitas dan keselamatan akibat tekanan waktu yang memengaruhi pengawasan dan kedisiplinan APD. Keberhasilan SMK3 diukur dari kepatuhan pekerja, *toolbox meeting*, inspeksi, identifikasi bahaya, dan insiden/*near miss*. Meski SOP tersedia, masih ada kesenjangan kebijakan dan praktik sehingga perlu evaluasi komprehensif.

Analisis didasarkan pada observasi dan wawancara dengan Direktur, *Site Manager, Safety Officer*, dan tiga

 ISSN 2987-677x

pekerja, dengan fokus pada komitmen manajemen, implementasi teknis, dan hambatan di lapangan.

Komitmen dan Kebijakan Manajemen

Wawancara dengan *Owner*/Direktur, Rudy Cahyanto, menunjukkan komitmen kuat manajemen dalam penerapan SMK3 melalui kebijakan tertulis, SOP K3, serta penyediaan anggaran untuk APD, pelatihan, dan perlengkapan keselamatan. Hal ini menandakan sistem telah tersedia secara normatif dan administratif, serta hambatan implementasi lebih pada aspek operasional dan perilaku.

Evaluasi insiden dilakukan melalui investigasi, namun masih bersifat reaktif sehingga pendekatan preventif perlu diperkuat. Secara keseluruhan, perusahaan telah memenuhi elemen kebijakan dan penyediaan sumber daya dalam konsep dasar SMK3 (Hakim & Wibowo, 2026). Secara konseptual, dukungan manajemen tersebut merupakan bentuk internalisasi tanggung jawab perlindungan tenaga kerja sebagaimana ditekankan dalam konsep dasar K3 (Nurfaizah et al., 2022). Namun demikian, kecenderungan evaluasi yang masih bersifat reaktif pasca-insiden menunjukkan bahwa siklus continuous *improvement* dalam SMK3 belum sepenuhnya optimal, karena teori menekankan pentingnya pendekatan preventif melalui perencanaan, pemantauan, dan tindakan perbaikan berkelanjutan (Pieter et al., 2024).

Dengan demikian, secara normatif sistem telah tersedia, tetapi efektivitasnya tetap ditentukan oleh konsistensi penerapan dan penguatan budaya keselamatan sebagaimana ditekankan dalam teori *safety culture* (Srisantyorini & Safitriana, 2020).

Implementasi Teknis di Lapangan

Wawancara dengan *Site Manager,* Slamet Haryanto, menunjukkan proyek memiliki risiko teknis tinggi seperti pekerjaan di ketinggian, tertimpa material, dan bahaya listrik. Pengendalian dilakukan melalui identifikasi bahaya, penerapan prosedur kerja aman, *toolbox meeting* rutin, serta pengawasan langsung di lapangan.

Namun, pengawasan masih bersifat korektif, dengan kendala utama berupa kedisiplinan pekerja dan tekanan target waktu. Hal ini menunjukkan bahwa faktor perilaku dan tuntutan produktivitas menjadi tantangan utama dalam konsistensi penerapan SMK3, dengan risiko dominan yang sejalan dengan karakteristik sektor konstruksi berisiko sedang hingga tinggi (Salawati & Abbas, 2020). Pelaksanaan identifikasi bahaya sebelum pekerjaan serta *toolbox meeting* rutin mencerminkan penerapan elemen perencanaan dan pengendalian operasional dalam SMK3. Namun, pengawasan yang masih bersifat korektif menunjukkan bahwa pendekatan pengendalian belum sepenuhnya mengikuti prinsip hirarki pengendalian risiko yang menekankan pencegahan sejak awal (Anggana et al., 2025).

***Monitoring* dan Kepatuhan K3**

Wawancara dengan *Safety Officer*, Defri Nurma Septian, menunjukkan bahwa sistem monitoring SMK3 telah berjalan melalui inspeksi rutin (minimal mingguan), penyediaan fasilitas darurat (jalur evakuasi, APAR, titik kumpul), *safety induction*, serta pelaporan insiden yang terdokumentasi. Namun, tantangan utama terletak pada konsistensi kepatuhan pekerja. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun sistem pengendalian, kesiapsiagaan darurat, dan pelaporan sudah berjalan sesuai prinsip *continuous improvement*, efektivitasnya sangat bergantung pada perilaku pekerja dan internalisasi budaya keselamatan di lapangan.

Perspektif Pekerja

Hasil wawancara dengan tiga pekerja menunjukkan bahwa penggunaan APD sudah dipahami dan umumnya dipatuhi, meskipun masih dipengaruhi oleh aturan dan pengawasan. Pemahaman terhadap prosedur kerja aman juga telah dimiliki melalui *safety induction* dan *briefing*, namun konsistensinya masih memerlukan pengingat rutin. Terkait insiden, tidak ditemukan kecelakaan besar, hanya kasus ringan yang telah ditangani sesuai prosedur dan dilaporkan. Komunikasi keselamatan berjalan melalui *briefing* pagi dan *toolbox meeting* yang rutin, sehingga pekerja mengetahui potensi bahaya harian.

Komunikasi keselamatan telah menjadi rutinitas operasional di proyek. Namun, pekerja menilai masih diperlukan peningkatan kedisiplinan, pengingat yang berkelanjutan, dan pengawasan penggunaan APD yang lebih ketat. Hal ini menunjukkan adanya kesadaran pekerja terhadap pentingnya penguatan budaya keselamatan dan konsistensi pengawasan untuk meningkatkan efektivitas implementasi SMK3 di lapangan.

Implementasi SMK3 pada proyek CV Cahaya Berkah Agung telah memiliki fondasi kuat secara struktural, ditunjukkan oleh komitmen manajemen, kebijakan tertulis, dukungan anggaran, serta sistem monitoring dan dokumentasi yang berjalan. Di level operasional, identifikasi bahaya, *toolbox meeting*, inspeksi rutin, dan pelaporan insiden telah diterapkan.

Namun, efektivitasnya masih terkendala aspek perilaku dan budaya keselamatan, terutama kedisiplinan penggunaan APD dan kepatuhan di bawah tekanan target proyek. Dengan demikian, SMK3 sudah berjalan secara administratif dan prosedural, tetapi perlu penguatan pada aspek preventif dan internalisasi *safety culture* agar lebih efektif dalam menekan risiko kecelakaan kerja.

Alternatif Solusi

Alternatif solusi peningkatan efektivitas SMK3 meliputi penguatan pengawasan *preventif* melalui inspeksi harian, *safety patrol*, dan *checklist* berbasis risiko; penerapan *reward* and *punishment* untuk meningkatkan disiplin; serta penguatan *safety culture*

 ISSN 2987-677x

melalui kampanye, media visual, dan pelibatan pekerja. Selain itu, dilakukan optimalisasi HIRADC, perlindungan tambahan pada pekerjaan berisiko tinggi, audit berkala, serta evaluasi preventif melalui analisis *near miss* dan pengendalian tekanan target proyek dengan integrasi indikator K3 dalam kinerja, sehingga secara keseluruhan berfokus pada pengawasan, budaya keselamatan, dan manajemen risiko preventif agar SMK3 lebih efektif dan berkelanjutan.

Rekomendasi Solusi

Rekomendasi utama untuk meningkatkan efektivitas SMK3 adalah penguatan pengawasan preventif yang terintegrasi dengan pembentukan *safety culture*. Hal ini dipilih karena permasalahan utama terletak pada konsistensi kepatuhan pekerja dan efektivitas pengawasan, bukan pada ketersediaan sistem atau sumber daya. Upaya yang dilakukan meliputi peningkatan inspeksi harian, *safety patrol*, penggunaan *checklist* berbasis risiko, pelaporan *near miss,* serta penerapan *reward* and *punishment* untuk memperkuat disiplin. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip *continuous improvement*.

Secara keseluruhan, rekomendasi ini relevan, aplikatif, dan menyasar akar masalah sehingga mampu meningkatkan efektivitas SMK3 secara berkelanjutan tanpa mengganggu produktivitas proyek.

Kajian Keselamatan, Kesehatan Kerja, dan Lingkungan

Implementasi K3L pada proyek CV Cahaya Berkah Agung secara administratif telah baik, ditunjukkan oleh kebijakan tertulis, alokasi anggaran, dan prosedur kerja aman. Identifikasi bahaya dilakukan melalui HIRA dengan risiko utama pada pekerjaan di ketinggian, tertimpa material, dan bahaya listrik, yang dikendalikan melalui hierarki pengendalian, *toolbox meeting*, inspeksi, dan pelaporan *near miss*.

Aspek kesehatan dan darurat didukung fasilitas P3K, jalur evakuasi, serta pengelolaan limbah B3 yang mencerminkan tanggung jawab lingkungan. Meskipun belum terdapat LTI maupun dampak lingkungan signifikan, masih diperlukan penguatan pengawasan *preventif* dan budaya keselamatan. Rekomendasi meliputi peningkatan kompetensi, digitalisasi *monitoring*, optimalisasi pengendalian teknis, dan penguatan *safety culture* agar implementasi SMK3 lebih efektif, konsisten, dan berkelanjutan.

Relevansi Kompetensi (Pengetahuan dan Keahlian) dengan Studi Kasus

Tabel 3. Keterkaitan Kompetensi dengan Peran dan Risiko

Peran Personel	Kompetensi Utama	Relevansi terhadap SMK3 & K3L	Catatan Temuan Lapangan
Site Manager	Identifikasi risiko, pengawasan lapangan	Memastikan prosedur K3 diterapkan dan *toolbox meeting* rutin	Pengawasan preventif perlu diperkuat
Safety Officer	Audit, pelaporan insiden, HIRADC	Mendukung evaluasi risiko dan *continuous improvement*	*Monitoring* rutin sudah ada, namun kepatuhan pekerja fluktuatif
Pekerja Lapangan	Operasional teknis, penggunaan APD	Mengurangi eksposur risiko pekerjaan berbahaya	Kesadaran tinggi, namun konsistensi perlu penguatan budaya keselamatan

Sumber: Analisis Peneliti

Keberhasilan SMK3 sangat bergantung pada kompetensi personel; prosedur yang lengkap tanpa pemahaman teknis dan risiko yang memadai akan menurunkan efektivitas pengendalian bahaya. Integrasi keberlanjutan dilakukan melalui pendekatan *Triple Bottom Line* (ekonomi, sosial, lingkungan) dan mendukung SDGs. Secara ekonomi, SMK3 mengurangi kerugian; secara sosial, meningkatkan keselamatan dan kompetensi pekerja; dan secara lingkungan, mengendalikan limbah serta dampak pencemaran.

Prinsip *continuous improvement* diterapkan melalui evaluasi berkala, pelaporan *near miss*, dan pengembangan kompetensi. Pendekatan ini memastikan implementasi K3L bersifat berkelanjutan serta mendukung keselamatan, produktivitas, dan keberlanjutan proyek.

Kesimpulan

Implementasi SMK3 pada proyek CV Cahaya Berkah Agung secara struktural telah sesuai regulasi, didukung kebijakan, sumber daya, *safety induction*, *toolbox meeting*, inspeksi, dan pelaporan insiden. Namun, masih terdapat kesenjangan pada aspek operasional seperti kedisiplinan pekerja, tekanan target proyek, dan budaya keselamatan yang belum optimal, sehingga pengawasan cenderung korektif.

Identifikasi bahaya, pengendalian risiko, kesiapsiagaan darurat, dan pengelolaan limbah B3 telah berjalan, tetapi evaluasi masih dominan reaktif. Oleh karena itu, diperlukan penguatan pendekatan *preventif* melalui peningkatan pengawasan, *reward and punishment,* serta pembentukan budaya keselamatan untuk mencapai *zero accident* dan *zero environmental damage*. Profesionalisme dan komitmen perbaikan berkelanjutan menjadi kunci keberhasilan sistem.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas terselesaikannya laporan ini. Terima kasih disampaikan kepada *Owner*/Direktur CV Cahaya Berkah Agung beserta manajemen atas izin, dukungan, dan akses data, serta kepada *Site Manager, Safety Officer*/HSE, dan seluruh pekerja yang telah menjadi informan. Apresiasi juga diberikan kepada dosen pembimbing atas arahan dan bimbingannya, serta kepada keluarga dan rekan-rekan atas dukungan dan

 ISSN 2987-677x

motivasi. Penulis berharap laporan ini bermanfaat bagi pengembangan penerapan SMK3 di proyek konstruksi.

Referensi

Anggana, M., Johari, G. J., & Saptiansyah, R. (2025). Evaluasi Penerapan sistem manajemen K3 pada proyek konstruksi gedung bertingkat. *Jurnal Konstruksi*, *23*(2). https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.23-2.2675

Astari, M. L. M., & Suidarma, I. M. (2022). *Implementasi sistem manajemen kesehatan dan keselamatan kerja (SMK3) pada PT ANTAM Tbk*.

BPJS Ketenagakerjaan. (2023). *Tren kecelakaan kerja nasional dan kontribusi sektor konstruksi*. https://www.bpjsketenagakerjaan.go.id/

Hakim, N., & Wibowo, K. (2026). *Evaluasi penerapan sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja (SMK3)*.

Juliar, E., & Siregar, C. A. (2026). *Implementasi dan pengendalian sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja (SMK3) terhadap kinerja K3 pada proyek konstruksi*. *10*(1).

Kadir, N. K., Utiarahman, A., & Tuloli, M. Y. (2026). *Evaluasi penerapan sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja (SMK3) pada proyek konstruksi di Provinsi Gorontalo*.

Marthinus, A. P., Pratasis, P. A. K., & Arsjad, T. T. (2023). Evaluasi penerapan sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja pada proyek kontruksi Puri Kelapa Gading Minahasa Utara. *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi)*, *5*(2), 92–98. https://doi.org/10.26740/proteksi.v5n2.p92-98

Mulyo, Y. S., Puro, S., & Fahruroji, A. F. (2020). Evaluasi sistem manajemen risiko keselamatan kerja pada pekerjaan struktur atas di proyek pembangunan LRT Cawang–Dukuh Atas. *Jurnal Media Teknik Sipil*, *18*(1), 43–55. https://doi.org/10.22219/jmts.v18i1.10719

Nurfaizah, S., Risal, M., & Musfirah, M. (2022). Penerapan sistem menajemen keselamatan dan kesehatan kerja. *Jurnal Ilmiah Kesehatan Sandi Husada*, 392–402. https://doi.org/10.35816/jiskh.v11i2.797

Permenaker No. 5 Tahun 1996 dan PP No. 50 Tahun 2012. (n.d.). *Identifikasi risiko dan pengendalian K3 pada proyek konstruksi*.

Pieter, K., Sahusilawane, T., & Apalem, D. R. (2024). Evaluasi penerapan SMK3 pada proyek konstruksi bendungan Way Apu di Kabupaten Buru Provinsi Maluku. *Jurnal Penelitian Multidisiplin Bangsa*, *1*(7), 576–583. https://doi.org/10.59837/jpnmb.v1i7.113

Riswana, I. (2022). *Evaluasi penerapan sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja (SMK3) pada perusahaan konstruksi*.

Salawati, L., & Abbas, I. (2020). *Penerapan keselamatan dan kesehatan kerja pada pelaksanaan proyek konstruksi*. *2*(2).

Srisantyorini, T., & Safitriana, R. (2020). Penerapan sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja pada pembangunan jalan tol Jakarta-Cikampek 2 elevated. *Jurnal Kedokteran dan Kesehatan*, *16*(2), 151. https://doi.org/10.24853/jkk.16.2.151-163

 ISSN 2987-677x

Analisis Indeks Efektivitas Pembakaran Produksi Batu Bata Merah

Achmad Syaichu[1] Hartono Pranjoto[2]

[1]Program Studi Teknik Industri, Sekolah Tinggi Teknologi Pomosda Nganjuk

[2]Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ syaichu07@stt-pomosda.ac.id

Dalam proses produksi bata merah, tahap pembakaran adalah sangat penting karena menentukan kualitas akhir dari produk. Berbagai faktor mempengaruhi efektivitas pembakaran, termasuk jenis bahan bakar yang digunakan, suhu, durasi pembakaran, dan cara penyusunan batu bata di dalam tungku. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis indeks efektivitas pembakaran pada produksi bata merah di UD Restu Indah, yang terletak di Desa Kaloran, Kabupaten Nganjuk, dengan memperhatikan efisiensi energi, keseragaman pembakaran, dan kualitas produk akhir. Metode yang diterapkan dalam penelitian ini mencakup observasi langsung, wawancara dengan para pekerja, serta pengukuran suhu dan analisis kualitas dari batu bata yang dihasilkan. Data yang dikumpulkan kemudian dianalisis dengan pendekatan kuantitatif dan kualitatif untuk menilai tingkat efektivitas proses pembakaran. Penggunaan kayu menghasilkan 498,1 batu bata berkualitas untuk setiap 100 kg bahan bakar, dengan total 51.527,6 batu bata berkualitas.

Kata kunci: efektivitas pembakaran, batu bata merah, kualitas produk

Pendahuluan

Batu bata adalah unsur bangunan yang di pergunakan dalam pembuatan konstruksi bangunan, pada umumnya pembuatan batu bata terbuat dari tanah liat di tambah air kemudian di campur dengan bahan bahan lain nya, tahap pengerjaan batu bata yaitu dengan menggali, mengolah, mencetak, mengeringkan dan membakar dengan suhu temperature yang tinggi sehingga batu bata tidak mudah retak bila di rendam di dalam air (Rahmadani, 2024).

Kualitas batu bata di bangunan bersejarah merujuk kepada karakteristik dan setandar yang memastikan batu bata tersebut sesuai untuk di gunakan dalam konservasi, restorasi, atau renovasi bangunan bersejarah kualitas ini mempertimbangkan beberapa faktor spesifik yang relevan dengan pelestarian warisan budaya. Beberapa aspek penting dari kualitas batu bata untuk bangunan bersejarah yaitu kekuatan tekan dan ketahanan, kepadatan, seragam dalam ukuran dan bentuk, permukaan yang halus dan tidak berlubang (Wismantoro, 2024). Di era globalisasi saat ini, bisnis berkembang pesat meskipun kondisi ekonomi tidak stabil. Hal ini mempengaruhi persaingan di pasar domestik maupun internasional. Setiap perusahaan harus mampu bersaing, setidaknya dengan mempertahankan operasinya di pasar lokal dan fokus pada kualitas produk. Pada dasarnya, bisnis yang mampu bersaing dan bertahan memiliki program berkualitas, karena program tersebut memungkinkan perusahaan secara efektif mengurangi jumlah produk cacat yang dihasilkan (Sasando, 2024). Perusahaan biasanya berusaha untuk memperoleh keuntungan sebesar mungkin sesuai dengan kemampuan mereka. Oleh karena itu, untuk mencapai tujuan ini, perusahaan harus membuat perencanaan keuntungan agar kemampuan mereka dapat digunakan secara bersamaan untuk mencapai tujuan perusahaan, yaitu menghasilkan keuntungan yang diharapkan (Palopo, 2023) Usaha kecil menengah (UKM) sebagai salah satu industri yang berperan dalam siklus prekonomian Indonesia, dimana dalam memenuhi kebutuhan konsumen perlu menciptakan suatu system kerja yang efektif dan efisien. Pencapaian system kerja yang efektif dan efisien tidak terlepas dari factor sumberdaya manusia (SDM). Dengan kondisi ini membuat adanya penyesuaian antara pekerjaan dengan kemampuan manusia. Banyak sekali UKM yang tidak memperhatikan faktor-faktor manusia sehingga dalam proses industri (Patradhiani dkk., 2022). Industri batu bata merah merupakan sektor industri yang mampu memberikan kontribusi untuk penyerapan tenaga kerja pada aktivitas ekonomi masyarakat, selain itu, proses produksi akan semakin cepat dengan ada nya penyerapan tenaga kerja.

Sejalan dengan penyerapan tenaga kerja, meningkatnya jumlah penduduk setiap tahun akan menambah jumlah tenaga kerja yang dibutuhkan di perdesaan. Hal ini akan mendorong berbagai aktivitas ekonomi, salah satunya adalah industri batu bata merah. Industri menurut UU RI nomor 3 tahun 2014 tentang perindustrian adalah seluruh bentuk kegiatan ekonomi yang mengolah bahan baku/memanfaatkan sumber daya industri sehingga menghasil kan barang yang mempunyai nilai tambah atau manfaat lebih tinggi, termasuk jasa industri (Aini Fahmiya dkk., 2023). UD restu indah yang berlokasi di desa Kaloran, Kabupaten Nganjuk, merupakan salah satu produsen batu bata merah tradisonal. Proses pembakaran di UD Restu Indah masih mengandalkan metode dengan memanfaatkan bahan bakar seperti kayu bakar dan

 ISSN 2987-677x

limbah organik seperti janggel jagung, yang meskipun tersedia secara lokal, seringkali tidak dimanfaatkan secara optimal rendahnya efisiensi pembakaran dapat menyebabkan pemborosan energi, meningkatkan biaya produksi, serta potensi dampak lingkungan yang signifikan, seperti emisi gas rumah kaca dan polusi udara.

Metode

Dalam beberapa tahun terakhir, efisiensi energi pada proses pembakaran industri batu bata merah menjadi perhatian utama dalam meningkatkan produktivitas serta mengurangi dampak lingkungan. Penelitian oleh (Maithel et al., 2021) menunjukkan bahwa kiln tradisional memiliki efisiensi termal yang rendah akibat distribusi panas yang tidak merata dan kurangnya kontrol pembakaran yang optimal. Kondisi ini menyebabkan tingginya konsumsi bahan bakar serta kualitas produk yang tidak konsisten, sehingga diperlukan pendekatan analisis yang lebih terukur dalam mengevaluasi proses pembakaran.

Langkah pertama dalam penelitian ini adalah melakukan observasi langsung terhadap proses pembakaran batu bata merah dengan mengumpulkan data suhu pembakaran, waktu pembakaran, jenis bahan bakar, serta konsumsi energi yang digunakan. Tahap kedua adalah pengujian kualitas hasil pembakaran berdasarkan parameter fisik seperti kuat tekan, warna, dan tingkat cacat produk. Menurut (Pandey et al., 2022), variasi suhu pembakaran memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik batu bata, sehingga pengukuran kualitas produk menjadi bagian penting dalam analisis efektivitas pembakaran.



Gambar 1. Proses Pembakaran Model Tungku

Selanjutnya, data yang diperoleh dianalisis menggunakan pendekatan indeks efektivitas pembakaran yang mengintegrasikan variabel *input* dan *output* produksi. Pendekatan ini digunakan untuk memberikan gambaran kuantitatif mengenai efisiensi dan efektivitas proses pembakaran secara menyeluruh. Menurut (Raut et al., 2023), penggunaan metode evaluasi berbasis kinerja memungkinkan analisis yang lebih komprehensif dalam sistem produksi berbasis material konstruksi, termasuk batu bata.

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada pengembangan model indeks efektivitas pembakaran yang mengintegrasikan parameter teknis pembakaran dan kualitas produk dalam satu kerangka analisis terpadu. Pendekatan ini mengadaptasi konsep evaluasi performa berbasis indikator yang sebelumnya digunakan dalam analisis sistem energi. Seperti yang dijelaskan oleh (Chaudhary et al., 2024), evaluasi kinerja termal berbasis indikator mampu memberikan gambaran yang lebih akurat terhadap efisiensi sistem pembakaran skala kecil.

Melalui pendekatan sistematis yang menggabungkan analisis konsumsi energi, distribusi suhu pembakaran, dan kualitas hasil produksi, penelitian ini tidak hanya memberikan evaluasi performa proses pembakaran tetapi juga menghasilkan rekomendasi peningkatan efisiensi produksi. Seperti yang dinyatakan oleh (Singh & Kumar, 2025), *"index-based performance evaluation provides a reliable framework for improving traditional production systems"*, sehingga pendekatan ini menjadi relevan untuk diterapkan pada industri batu bata merah. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi dalam meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan industri batu bata skala kecil dan menengah.



Gambar 2. Proses Pebakaran Batu Bata

Hasil Kerja

Suhu pembakaran

Suhu pembakaran pada UD restu indah berkisaran 800°C - 900°C Jika menggunakan kayu hanya mencapai suhu 800°C dan apabila menggunakan janggel bisa mencapai 900°C bahkan lebih, karna janggel jagung mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang merupakan senyawa organik dengan energi tinggi. Ketika terbakar, senyawa ini melepaskan energi dalam jumlah besar, menghasilkan panas yang tinggi. Dan juga kadar air yang rendah. Menurut (Yuliyanto, 2023) Hasil menunjukan bahwa nilai uji tekan terkecil yaitu sebesar 131,4 kg/cm2 dengan parameter waktu pengerasan 2,64 hari, suhu pemanasan 800˚C dan waktu pemanasan 27 Jam. Nilai yang terbesar sebesar 148 kg/cm2 dengan parameter waktu pengerasan 9.36hari, suhu pemanasan 800˚C dan waktu pemanasan 27 Jam.

Konsumsi Bahan Bakar

Sumber energi yang dipakai di UD Restu Indah, yaitu kayu jati dan janggel jagung, jika menggunakan kayu 3 mobil kecil dengan sekali pembakaran dan Ketika menggunakan janggel jagung, yaitu 2 mobil kecil kayu bakar dan 2 mobil kecil janggel jagung dan total biaya yang di keluarkan saat menggunakan kayu saja pada tahapan pembakaran, yaitu sekitar Rp1.500.000 sekali pembakaran dan jika menggunakan kayu dan janggel selama proses pembakaran, yaitu sekitar Rp2.000.000.

Waktu Pembakaran

Pada saat kegiatan pembakaran bata merah di UD Restu Indah memakan waktu 27 jam bahkan sampai 30 jam. Ketika melakukan proses pembakaran, saat proses pembakaran bata biasanya dilakukan mulai jam 5.30 pagi hari dan untuk selesai pembakarannya belum bisa

 ISSN 2987-677x

dipastikan untuk jamnya. bahkan waktu tersebut kadang berubah ubah karna tahapan pembakaran yang belum efektif.

Pembakaran adalah reaksi cepat antara sumber energi dan oksigen. Energi panas ini dihasilkan selama proses pembakaran ketika oksigen bereaksi dengan komponen kimia dalam bahan bakar, menghasilkan karbon dioksida (CO2) dan air (Heris Syamsuri, 2024). Pembakaran batu bata membutuhkan 1 x 24 jam untuk proses pembakaran agar batu bata bisa matang dengan baik, namun dalam proses pembakaran digunakan berbagai jenis kayu bakar. Beberapa jenis kayu tidak menghasilkan arang yang sempurna, sehingga dapat mengganggu proses pematangan batu bata (Messe dkk., 2021).

Kualitas produk

Kualitas produk bata di bangunan bersejarah merujuk kepada karakteristik dan setandar yang memastikan bata tersebut sesuai. Beberapa faktor utama yang menentukan kualitas batu bata untuk bangunan bersejarah meliputi kekuatan tekan dan daya tahan, kepadatan material, konsistensi ukuran dan bentuk, serta permukaan yang halus tanpa lubang. Daya serap air, ketahanan pelapukan, kekuatan, dan kadar garam rendah (Bayu Dwi Wismantoro, 2024).

Bata yang di hasil kan di UD Restu Indah ini ada 3 kulitas batu bata, yaitu:

a. Batu bata berkualitas atau siap jual terkadang berwarna hitam, yang menandakan kekuatan dan menjadi favorit konsumen.



Gambar 2. Batu Bata dengan Kualitas Baik

b. Batu bata yang belum matang di UD Restu Indah dibakar ulang atau dipindah ke tengah agar terbakar sempurna.



Gambar 3. Batu Bata Belum Sempurna

c. Batu bata rusak akibat suhu tidak stabil biasanya ditumpuk atau dipakai sebagai alas pembakaran



Gambar 4. Batu Bata Rusak

d. Di UD Restu Indah juga ada perbedaan hasil pembakaran biasa nya perbedaan tersebut di pengaruhi dengan posisi bata ketika proses pembakaran berlangsung.



Gambar 5. Batu Bata di Bawah Selama Pembakaran

Data kebutuhan bahan bakar UD restu indah, sesuai dengan tabel berikut ini:

Tabel 1. Kebutuhan Kayu Dan Janggel

Variable	Jml Bata	Kayu dan Janggel	Suhu °C	Persentase
Jml bata	15.000 bj	4 pickup	800°C	99,8
Waktu	27 jam			0,2
Baik	14.970 bj			
Kurang	30 bj			

Data kebutuhan bahan bakar UD restu indah, sesuai dengan tabel berikut ini:

Tabel 2. Kebutuhan Kayu

Variable	Jml Bata	Kayu	Suhu °C	Persentase
Jml bata	15.000 bj	3 pickup	900°C	99,62
Waktu	29 jam			0,38
Baik	14.943 bj			
Kurang	57 bj			

Tabel 3. Total Bahan Bakar yang Dibutuhkan

Variable	Jumlah (*picup*)	Harga (Rp)	Total (Rp)
Kayu	3	500.000	1.500.000
Kayu dan Janggel	4	500.000	2.000.000
	Total		**3.500.000**

Tabel 4. Ongkos Tenaga Kerja

Jumlah Pekerja (orang)	Biaya (Rp/hr)	Total (Rp)
2	50.000	100.000

Perhitungan Indeks Efektivitas Pembakaran

Hasil perhitungan indeks efektivitas dari data yang diperoleh (kayu dan janggel jagung)

1. Jumlah batu bata total (N total): 15000 biji.
2. Jumlah batu bata berkualitas (N berkualitas): 14970 biji.
3. Bahan bakar yang digunakan (B bahan bakar): 2800 kg.

 ISSN 2987-677x

4. Durasi pembakaran (T pembakaran): 27 jam.

Perhitungan:

a) Berdasarkan *output* perbahan bakar

Indeks efektivitas = $\frac{Nberkualitas}{Bbahanbakar} \times 100$

Indeks efektivitas = $\frac{14970}{2800} \times 100 = 534{,}64$

Artinya: Setiap 100kg bahan bakar menghasil kan sekitar 534,64 batu bata berkualitas.

b) Berdasarkan waktu

Indeks efektivitas = $\frac{Nberkualitas}{Tpembakaran} \times 100$

Indeks efektivitas = $\frac{14970}{27} \times 100 = 55.444{,}44$

Artinya: 55.444,44 batu bata berkualitas dihasilkan per 100 jam pembakaran.

c) Indeks efektivitas total

= $\frac{Nberkualitas}{Bbahanbakar \times Tpembakaran} \times 100$

= $\frac{14970}{2800 \times 27} \times 100 \frac{14970}{75600} \times 100 = 0{,}198 \times 100 = 19{,}8$

Artinya: 19,8 batu bata berkualitas di hasilkan perkombinasi 1kg bahan bakar dan 1 jam waktu pembakaran.

Hasil perhitungan indeks efektivitas dari data yang diperoleh (kayu):

1. Jumlah batu bata total (N total): 15000 biji.
2. Jumlah batu bata berkualitas (N berkualitas): 14943 biji.
3. Bahan bakar yang digunakan (B bahan bakar): 3000 kg.
4. Durasi pembakaran (T pembakaran): 29 jam.

Perhitungan:

a) Berdasarkan *output* perbahan bakar

Indeks efektivitas = $\frac{Nberkualitas}{Bbahanbakar} \times 100$

Indeks efektivitas = $\frac{14943}{3000} \times 100\ 498{,}1$

Artinya: 498,1 batu bata berkualitas dihasilkan per 100 kg bahan bakar.

b) Berdasarkan waktu

Indeks efektivitas = $\frac{Nberkualitas}{Tpembakaran} \times 100$

Indeks efektivitas = $\frac{14943}{29} \times 100 = 51.527{,}6 \times 100 = 51.527$

Artinya: 51.527 batu bata berkualitas dikasilkan per 100 jam pembakaran.

c) Indeks efektivitas total

= $\frac{Nberkualitas}{Bbahanbakar \times Tpembakaran} \times 100$

= $\frac{14943}{3000 \times 29} \times 100 = 0{,}1717 \times 100 = 17.17$

Artinya: 17,17 batu bata berkualitas di hasilkan perkombinasi 1 kg bahan bakar dan 1 jam waktu pembakaran.

Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan jenggel jagung dan kayu sebagai bahan bakar dalam proses pembakaran batu bata merah lebih efektif dibandingkan dengan hanya menggunakan kayu dalam pembakaran 15.000 bata mentah. Dengan hasil baik sejumlah 14.970 biji, jelek 30 biji, dengan biaya bahan bakar dan tenaga kerja masing masing berjumlah 2.000.000 dan 100.000 untuk bahan bakar kayu dan janggel. Sedangkan untuk bahan bakar kayu saja menghasilkan batu bata baik 14.943 biji, jelek 57 biji, dengan biaya bahan bakar dan tenaga kerja masing-masing berjumlah 1.500.000 dan 100.000. Dengan indeks efektivitas berdasarkan perhitungan untuk penggunaan kayu saja menghasilkan 498,1 batu bata berkualitas per 100 kg bahan bakar, dengan 51.527,6 batu bata berkualitas dihasilkan 4 hari 4 jam pembakaran, dan indeks efektivitas total mencapai 17,17 biji. Sementara itu, janggel jagung dan kayu menunjukkan kinerja yang sedikit lebih unggul dengan menghasilkan 534,64 batu bata berkualitas per 100 kg bahan bakar, 55.444,44 batu bata berkualitas per 4 hari 4 jam pembakaran, dan indeks efektivitas total sebesar 19,8 biji. Dengan menggunakan tungku pembakaran jenis tradisional.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih ditujukan kepada pembimbing Bapak Hartono Pranjoto dari UKWMS dan Pimpinan Sekolah Tinggi Teknologi Pondok Modern Sumber Daya At-Taqwa, Serta rekan-rekan profesi penulis.

Referensi

Chaudhary, G., Verma, P., & Yadav, R. (2024). Assessment of thermal performance in small-scale brick kilns. *Applied Energy, 356*, 121987. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.121987

Fahmiya, A. A., Ruja, I. N., Purnomo, A., Sukamto, S., & Bramantya, D. G. P. (2023). Kontribusi industri batu bata merah terhadap pendapatan pekerja di Desa Ngreco Kecamatan Kandat Kabupaten Kediri. *Jurnal Integrasi dan Harmoni Inovatif Ilmu-Ilmu Sosial (JIHI3S), 3*(3), 197–202. https://doi.org/10.17977/um063v3i3p197-202

Fatimah. (2023). *Analisis ekonomi lingkungan usaha batu merah di Desa Langkidi*. Institut Agama Islam Negeri Palopo.

Maithel, S., Kumar, S., & Singh, R. (2021). Improving energy efficiency in brick kilns: A review of technologies and practices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 144*, 110989.

Messe, M., Asrial, D., & Roly, E. (2021). Kualitas batu bata merah produksi Desa Oebelo Kabupaten Kupang ditinjau dari proses pembakaran. *Jurnal Batakarang, 2*(2).

Pandey, B., Agrawal, A., & Singh, D. (2022). Effect of firing temperature on physical and mechanical properties

 ISSN 2987-677x

of clay bricks. *Materials Today: Proceedings, 62*, 4112–4117.

Patradhiani, R., Kurniawan, M. H., & Rosyidah, M. (2022). Analisis human error pada proses produksi batu bata dengan metode SHERPA dan HEART untuk mengurangi kecelakaan kerja. *Integrasi: Jurnal Ilmiah Teknik Industri, 7*(1).

Rahmadani, A. (2024). *Pengertian batu bata merah*.

Raut, S. P., Ralegaonkar, R. V., & Mandavgane, S. A. (2023). Development of sustainable brick production techniques and performance evaluation. *Journal of Building Engineering, 68*, 105879.

Sasando, A. F., & Apsari, A. E. (2024). Analisis pengendalian kualitas produk batu bata pada UMKM Anugrah Jaya dengan metode Plan, Do, Check, Act dan usulan perbaikan menggunakan 5W+1H.

Singh, M., & Kumar, V. (2025). Performance evaluation of traditional manufacturing systems using index-based methods. *International Journal of Productivity and Performance Management, 74*(2), 345–360. https://doi.org/10.1108/IJPPM-05-2024-0201

Syamsuri, H., Maulani, I. S., & Noviansyah, I. (2024). Pembuatan pompa hidram dengan ukuran pompa 4 in untuk pengairan pesawahan di Desa Jatisari. *Jurnal Mesin Galuh, 3*(2). https://ojs.unigal.ac.id/index.php/jmg

Wismantoro, B. D., & Teguh, M. (2024). Uji kualitas plesteran, batu bata dan identifikasi perbaikan dinding pada bangunan bersejarah di Yogyakarta. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat LPPM Universitas 'Aisyiyah Yogyakarta, 2*, 810–821.

Yuliyanto, Y., Yudo, E., & Ramli. (2023). Analisis pengaruh pengujian tekan terhadap suhu, pengeringan awal, suhu dan lama penahanan waktu pemanasan bata merah. *Manutech: Jurnal Teknologi Manufaktur, 15*(1).

 ISSN 2987-677x

Analisis Kebutuhan dan Kajian Desain Pelampung Penyelamat Nirawak Terkendali (*Remote-Controlled Lifebuoy*) Sebagai Optimalisasi Respons Penanganan *Man Overboard* pada Kapal Perang Republik Indonesia (KRI)

Wawan Kusdiana[1], Cahya Kusuma[2], Mukhlis[3], Zainal Syahlan[4].

[1,2,3,4] Program Studi Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[1,2] Program Studi Teknik Mesin Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut.

✉ wkusdiana2744@gmail.com
✉ kusumacahya99@gmail.com
✉ mukhlis91@gmail.com
✉ zsyahlan@gmail.com

Insiden *Man Overboard* (MOB) pada Kapal Perang Republik Indonesia (KRI) merupakan kedaruratan maritim dengan tingkat fatalitas tinggi. Prosedur penyelamatan MOB konvensional yang berpedoman pada SOLAS menghadapi keterbatasan mendasar berupa waktu respons total 15–35 menit yang melampaui batas kritis hipotermia 20 menit, risiko benturan sekunder akibat manuver kapal besar, serta ketidakakuratan peralatan manual. Studi kasus ini mengkaji analisis kebutuhan dan kelayakan desain Pelampung Penyelamat Nirawak Terkendali (*Remote-Controlled Lifebuoy*/*RC Lifebuoy*) sebagai solusi rekayasa komplementer untuk platform KRI. Metodologi mencakup: analisis deskriptif data KNKT 2021–2025, analisis komparatif enam parameter kinerja, matriks kebutuhan teknis 15 persyaratan, *compliance analysis* terhadap delapan regulasi internasional, analisis *Fishbone* 5M+1E, dan kajian kelayakan teknis tiga dimensi (13 aspek). Hasil kajian menunjukkan RC Lifebuoy mampu memangkas waktu respons menjadi 3–7 menit (penghematan 75–80%), mengeliminasi risiko benturan sekunder, dan beroperasi lebih andal dalam cuaca buruk. Dari 13 aspek kelayakan, seluruhnya dinilai Layak atau Layak dengan modifikasi tanpa ada yang tidak layak. Studi ini merekomendasikan implementasi bertahap tiga fase (0–7 tahun) dimulai dari pengembangan prototipe COTS menuju integrasi penuh sistem IMOB-SARS pada Armada KRI.

Kata kunci: *man overboard*, *remote-controlled lifebuoy*, kapal perang, *unmanned surface vehicle*

Pendahuluan

Operasi maritim memegang peranan vital sebagai penggerak perdagangan global sekaligus tulang punggung pertahanan dan keamanan nasional 70 persen permukaan bumi tertutup oleh lautan (Xu, G., Yin, J., Zhang, J., & Wang, N., 2025). Di tingkat nasional, Kapal Perang Republik Indonesia (KRI) beroperasi di berbagai perairan strategis dalam kondisi yang sangat dinamis, kerap melaju pada kecepatan tinggi, dan menuntut kesiapan operasional 24 jam penuh. Di antara berbagai situasi darurat yang berpotensi terjadi di atas kapal, insiden *Man Overboard* (MOB) atau personel jatuh ke laut merupakan kondisi dengan tingkat fatalitas tertinggi (*European Maritime Safety Agency* (EMSA), 2023).

Statistik global menunjukkan angka yang mengkhawatirkan, di mana hingga 75% korban MOB akhirnya meninggal atau hilang akibat tidak adanya saksi mata dan keterlambatan penyelamatan (Soliman, A. K., & Mahdaly, S. A, 2018). Di perairan, faktor hipotermia menjadi ancaman kritis. Kemampuan fisik korban dapat menurun drastis dalam 10–20 menit, menjadikan *response time* (waktu dari kejadian hingga pertolongan tiba) sebagai variabel paling penentu keselamatan jiwa. Urgensi ini divalidasi oleh data Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) periode 2021–2025 yang mencatat bahwa 36% dari total insiden kecelakaan pelayaran (tenggelam, terbalik, dan fatality) secara langsung berpotensi mengakibatkan kondisi MOB yang menuntut penyelamatan seketika (Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT), 2025).

Prosedur MOB konvensional saat ini mengacu pada SOLAS Bab III/17-1, yang mensyaratkan kapal untuk melaksanakan *Recovery Plan* melalui manuver kapal (*Williamson Turn* atau *Anderson Turn*) dan pelemparan *smoke lifebuoy* secara manual. Keterbatasan metode konvensional penyelamatan yang mengandalkan lemparan fisik ini dapat dilihat pada Gambar 1. Berdasarkan observasi lapangan di tiga KRI, prosedur eksisting ini menghadapi keterbatasan fundamental. Pertama, *response time* membengkak hingga 15–35 menit akibat inersia kapal berbobot 1.500–3.500 ton yang membutuhkan waktu lama untuk bermanuver. Kedua, akurasi lemparan *lifebuoy* sangat rendah pada jarak >20 meter dan saat berhadapan dengan ombak putih (*whitecaps*). Ketiga, KRI yang merapat ke arah korban justru menciptakan risiko fatal baru akibat potensi benturan lambung kapal atau pusaran *propeller wake*.

 ISSN 2987-677x

Perkembangan teknologi kendaraan tak berawak (*Unmanned Vehicles*) membuka ruang solusi inovatif Untuk mengatasi kebuntuan mekanis tersebut. Meskipun sistem *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) telah terbukti mampu meningkatkan akurasi deteksi korban dari udara melampaui algoritma konvensional (Xu, G., Yin, J., Zhang, J., & Wang, N., 2025), operasionalnya sangat rentan terhadap beban angin laut. *Unmanned Surface Vehicle* (USV) menawarkan keunggulan komplementer karena dapat beroperasi langsung memotong permukaan air dan menghantarkan daya apung secara fisik.



Gambar 1. Pertolongan Orang Jatuh di Laut
(Sumber : Google Image Alo Dokter)

Studi kasus ini menyajikan rekayasa analisis kebutuhan dan kajian desain Sebagai respons terhadap permasalahan di atas yaitu Pelampung Penyelamat Nirawak Terkendali (*Remote-Controlled Lifebuoy / RC Lifebuoy*). Wahana permukaan ini dirancang untuk diluncurkan dari geladak KRI dan dikendalikan langsung menuju koordinat korban tanpa mengharuskan kapal induk bermanuver putar balik. Kajian ini secara spesifik mengevaluasi akar kegagalan prosedur MOB eksisting, memformulasikan arsitektur teknis *RC Lifebuoy* yang sesuai dengan platform KRI, serta menguji kelayakan implementasinya ditinjau dari dimensi teknis, operasional, dan kepatuhan regulasi keselamatan maritim internasional.

Metode

Metode penelitian ini dirancang untuk memberikan kerangka kerja sistematis dalam menganalisis kebutuhan teknis dan merumuskan desain konseptual *RC Lifebuoy*. Pendekatan yang digunakan mengintegrasikan observasi empiris lapangan dengan studi literatur teknis serta analisis kepatuhan terhadap standar internasional, guna memastikan solusi rekayasa yang dihasilkan bersifat aplikatif, aman, dan akuntabel secara keprofesian. Tahapan penelitian disusun secara bertahap mulai dari pengumpulan data hingga evaluasi kelayakan multidimensi.

Sumber Data

Studi kasus ini menerapkan pendekatan pengumpulan data lintas sumber (*multi-source data collection*) guna menjamin validitas hasil analisis. Data primer diekstraksi melalui metode observasi partisipan (*participant observation*) selama masa penugasan penulis sebagai Kepala Departemen Mesin (Kadepsin) pada tiga platform KRI dengan karakteristik teknis yang berbeda: KRI Layang-805 (Tipe Patroli), KRI AHP-355 (Tipe Eskorta), dan KRI Keris-624 (Tipe Kapal Cepat). Perbedaan *displacement* dan radius manuver pada ketiga kapal tersebut memberikan perspektif komparatif yang komprehensif terhadap keterbatasan kinetik kapal dalam respons MOB.

Data sekunder dikumpulkan dari berbagai sumber kredibel, meliputi: (a) Laporan Investigasi KNKT periode 2021–2025; (b) Regulasi internasional SOLAS Bab III/17-1, LSA Code IMO, dan IAMSAR Manual; (*International Maritime Organization* (IMO), 2014) (c) Literatur ilmiah dari database IEEE Xplore dan *Frontiers in Marine Science* (2010–2025); (Xu, G., Yin, J., Zhang, J., & Wang, N., 2025) (Zhang, Y., Tao, Q., & Yin, Y., 2023) (Yeong, S. P., King, L. M., & Dol, S. S., 2015) (Sevin, A., & Bayilmis, C., 2016) (Bai, J., Dai, J., Wang, Z., & Yang, S., 2022) serta (d) Standar militer MIL-STD-461 untuk parameter kompatibilitas elektromagnetik.

Metodologi Analisis

Analisis dilakukan melalui kerangka kerja terintegrasi yang mencakup enam tahapan metodologi sebagai berikut:

a. Analisis Deskriptif
   Digunakan untuk melakukan tabulasi dan kategorisasi data insiden KNKT serta mendefinisikan baseline waktu respons total Ttotal prosedur konvensional KRI secara empiris.
b. Analisis Komparatif
   Mengevaluasi enam parameter kinerja utama termasuk akurasi, risiko benturan, dan operabilitas malam hari untuk membandingkan efektivitas prosedur manual dengan skenario penggunaan RC Lifebuoy.
c. Analisis Kebutuhan Teknis
   Mengadopsi pendekatan *Systems Engineering Requirements Analysis* guna mengidentifikasi 15 persyaratan sistem (8 fungsional dan 7 non-fungsional) dengan spesifikasi target yang terukur.
d. *Compliance Analysis* (*Gap Analysis*)
   Mengevaluasi konsep desain terhadap 8 regulasi internasional maritim melalui matriks status kelayakan: Layak (L), Layak dengan Modifikasi (LM), dan Tidak Layak (TL).
e. Analisis *Fishbone* (5M+1E)
   Digunakan untuk mengidentifikasi 27 sub-faktor penyebab fatalitas MOB secara sistematis melalui enam kategori akar masalah (*man, machine, method, material, measurement, environment*).
f. Kajian Kelayakan Teknis
   Penilaian multidimensi terhadap 13 aspek (teknis, operasional, dan regulasi) guna memberikan rekomendasi final terhadap implementasi wahana.

 ISSN 2987-677x

Hasil Kerja

Bagian ini menyajikan sintesis dari seluruh tahapan analisis rekayasa dan kajian desain yang telah dilakukan untuk mengoptimalkan prosedur penyelamatan *Man Overboard* (MOB). Hasil kerja dipaparkan secara sistematis, dimulai dari pemetaan profil insiden secara empiris, dekonstruksi akar masalah menggunakan kerangka *systems engineering*, hingga perumusan spesifikasi teknis dan evaluasi kelayakan implementasi *RC Lifebuoy* pada *platform* KRI. Seluruh hasil yang diperoleh dikorelasikan dengan standar keselamatan maritim internasional dan kebutuhan taktis operasional TNI Angkatan Laut guna memastikan solusi yang dihasilkan bersifat aplikatif, andal, dan akuntabel secara keprofesian.

Profil Insiden dan Urgensi Operasional

Validasi urgensi rekayasa keselamatan maritim membutuhkan pemetaan empiris terhadap profil kecelakaan di lapangan. Tabel 1 menyajikan distribusi 25 insiden pelayaran yang diinvestigasi oleh Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) selama periode 2021–2025.

Tabel 1. Distribusi Insiden Pelayaran Nasional (KNKT 2021–2025)

Jenis	2021	2022	2023	2024	2025	Total
Kebakaran	1	5	2	3	0	11
Tenggelam	2	1	0	0	1	4
Tubrukan	2	1	0	0	0	3
Fatality	2	1	0	0	0	3
Terbalik	2	0	0	0	0	2
Kandas	0	1	0	0	0	1
Ledakan	1	0	0	0	0	1
TOTAL	**10**	**9**	**2**	**3**	**1**	**25**

Berdasarkan data tabulasi pada Tabel 1 diketahui bahwa insiden kebakaran mendominasi dengan 11 kasus (44%), disusul oleh kejadian tenggelam sebanyak 4 kasus (16%). Dari total populasi insiden, setidaknya 9 kasus (36%) yang mencakup kategori tenggelam, terbalik, dan *fatality* secara mutlak berpotensi memicu situasi *Man Overboard* (MOB) yang menuntut ekskavasi seketika. Pemetaan geografis menunjukkan konsentrasi di titik strategis seperti Selat Bali, perairan Maluku, dan Selat Makassar, yang *notabene* merupakan area patroli taktis KRI. Fakta bahwa MOB dapat bermuara dari berbagai anomali (tidak eksklusif pada insiden tenggelam) menegaskan bahwa kapabilitas instrumen MOB adalah lapisan perlindungan terakhir (*last line of defense*) yang tidak dapat disubstitusi.

Analisis Komparatif Alternatif Solusi

Tabel 2 mendemonstrasikan evaluasi komparatif enam parameter kinerja antara prosedur MOB konvensional eksisting dengan skenario intervensi RC Lifebuoy.

Tabel 2. Matriks Perbandingan Kinerja Prosedur MOB

Parameter	Konvensional	*RC Lifebuoy*
Waktu Respons	15–35 menit	3–7 menit
Risiko Benturan	Tinggi	Minimal
Cuaca Buruk	Terbatas	Lebih Andal
Akurasi Penjangkauan	Rendah (<30m)	GPS ±2–5 m
Beban Awak	Tim Besar	1–2 Operator
Operasi Malam	Terbatas	IR + GPS

RC *Lifebuoy* memberikan keunggulan yang konsisten dan signifikan pada seluruh enam parameter yang dikaji. Penghematan waktu respons 75–80% merupakan keunggulan paling kritis. Eliminasi risiko benturan sekunder memiliki implikasi keselamatan yang tidak dapat diukur secara linear tidak ada pendekatan konvensional yang dapat mengeliminasi risiko ini selama kapal harus mendekati korban secara fisik.

Berdasarkan perbandingan dengan sistem SAR berbasis UAV yang dikembangkan oleh Xu et al. (2025) dan Soliman & Mahdaly (2017), *RC Lifebuoy* menunjukkan keunggulan komplementer: UAV unggul dalam deteksi awal dan cakupan area pencarian yang luas, sementara *RC Lifebuoy* unggul dalam ketahanan terhadap cuaca buruk (tidak terpengaruh angin kencang) dan kemampuan menghantarkan bantuan fisik langsung ke permukaan air. Sinergi kedua sistem dalam skenario *two-layer rescue* UAV mendeteksi dan memantau dari udara, *RC Lifebuoy* menjangkau dan mengamankan di permukaan menghasilkan kapabilitas SAR optimal untuk armada KRI.

Analisis Akar Masalah: *Fishbone* 5M+1E

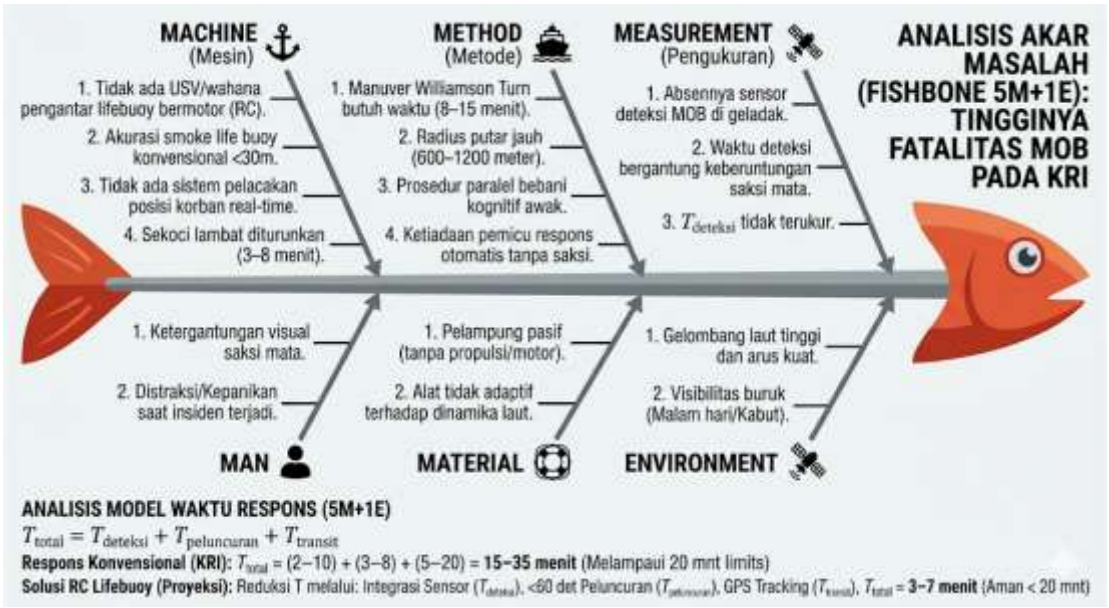
Analisis *Fishbone* mengidentifikasi 27 sub-faktor penyebab tingginya fatalitas MOB pada KRI dalam enam kategori 5M+1E. Dua kategori terbukti dominan:

a. ***Machine***: Ketiadaan wahana pengantar *lifebuoy* bermotor (tidak ada USV di atas KRI); akurasi *smoke lifebuoy* konvensional hanya <30 meter; tidak ada sistem pelacakan posisi korban *real-time*; sekoci membutuhkan waktu 3–8 menit untuk diturunkan. Kelima sub-faktor ini secara langsung memperpanjang komponen $T_{peluncuran}$ dan $T_{transit}$ dalam model respons waktu.
b. ***Method***: Manuver Williamson Turn pada KRI tipe eskorta membutuhkan radius putar 600–1.200 meter dan waktu 8–15 menit; prosedur paralel (manuver + persiapan sekoci + komunikasi) membebani awak secara kognitif; tidak ada sistem deteksi MOB otomatis yang menjadi pemicu respons tanpa saksi mata. Kategori *Measurement* juga berkontribusi signifikan melalui absennya sensor deteksi MOB di geladak yang menyebabkan $T_{deteksi}$ bergantung pada keberuntungan adanya saksi mata.

Berdasarkan model: $T_{total} = T_{deteksi} + T_{peluncuran} + T_{transit}$, pengukuran empiris di tiga KRI menghasilkan Ttotal konvensional = (2–10) + (3–8) + (5–20) = 15–35

 ISSN 2987-677x

menit, yang secara konsisten melampaui batas kritis hipotermia 20 menit. *RC Lifebuoy* dirancang untuk secara simultan mereduksi $T_{deteksi}$ (melalui integrasi sensor otomatis), $T_{peluncuran}$ (menjadi <60 detik), dan Ttransit (2–5 menit langsung ke GPS korban), menghasilkan Ttotal proyeksi 3–7 menit.



Gambar 2. Analisis Akar Masalah: *Fishbone* 5M+1E

Rekayasa Kebutuhan Teknis

Spesifikasi arsitektur *RC Lifebuoy* dikalibrasi untuk menyelaraskan diri dengan lingkungan ekstrem KRI. Tabel 3 menyajikan ekstraksi persyaratan fungsional (F) dan non-fungsional (NF) kritis.

Tabel 3. Matriks Kebutuhan Teknis (Parameter Kritis) *RC Lifebuoy*

Kode	Parameter	Spesifikasi Target	Standar Acuan
A. Persyaratan Fungsional			
F-01	Kecepatan	≥ 8 knot (kondisi normal)	SOLAS Ch.III
F-03	Daya Apung	≥ 14,5 kg (LSA Code)	LSA Code Bab 2
F-04	Stabilitas	Beaufort Scale ≤ 5	SOLAS Ch.III/17-1
F-05	Waktu Siap	≤ 60 detik dari alarm	Analisis Respons
F-06	GPS Navigasi	Akurasi ±2–5 meter	IMO MSC.1/Circ.1314
F-07	Kendali RF	Jangkauan ≥ 1 km	Standar IMO Telekomunikasi
B. Persyaratan Non-Fungsional (Kritis)			
NF-02	EMC	MIL-STD-461 (militer KRI)	Standar Militer TNI AL
NF-03	Keandalan	Reliabilitas ≥ 95%	IEC 61511 (SIL)
NF-06	*Fail-Safe*	*Auto return* saat sinyal putus	Prinsip rekayasa *fail-safe*

Dua persyaratan non-fungsional yang paling spesifik dan paling membedakan *RC Lifebuoy* untuk KRI dari USV komersial umum adalah NF-02 (Kompatibilitas EMC sesuai MIL-STD-461) dan NF-06 (Mekanisme *Fail-Safe* saat sinyal terputus). Persyaratan EMC sangat kritis mengingat lingkungan elektromagnetik KRI dipenuhi radiasi dari radar, sonar, dan sistem senjata yang tidak dijumpai pada kapal sipil. Mekanisme *fail-safe* diperlukan agar kehilangan sinyal kendali tidak menyebabkan wahana tenggelam atau menjauh dari korban saat operasi kritis berlangsung.

Persyaratan fungsional F-05 (waktu persiapan ≤60 detik) merupakan salah satu yang paling menantang secara desain. Ini mensyaratkan bahwa RC Lifebuoy harus selalu dalam kondisi *ready-to-launch* di geladak KRI, baterai terisi penuh, sistem GPS aktif, dan dapat diluncurkan ke air oleh satu orang awak dalam hitungan detik tanpa prosedur yang panjang. Persyaratan ini mendorong desain yang mengutamakan kesederhanaan operasional dan keandalan tinggi dibandingkan kompleksitas fitur

Analisis Kesesuaian Regulasi (*Compliance Analysis*)

Data pada Tabel 4 menampilkan metrik kesesuaian arsitektur desain RC Lifebuoy terhadap delapan instrumen regulasi kelautan dan standar keprofesian internasional.

Tabel 4. Matriks *Compliance Analysis* terhadap Regulasi Maritim

Regulasi	Evaluasi & *Gap*	Status
SOLAS Bab III/17-1 (2014)	*Recovery Plan: RC Lifebuoy* perlu dicantumkan dalam *Recovery* Plan KRI	LM
LSA Code IMO (2017)	Komponen *lifebuoy* harus memenuhi spesifikasi LSA; penambahan propulsi tidak mengurangi specs	LM
IAMSAR Manual	GPS korban dari *RC Lifebuoy* kompatibel dengan kalkulasi datum ECDIS-SAR	L
MLC 2006	Prosedur *RC Lifebuoy* perlu dimasukkan ke program drill awak sesuai MLC	LM

 ISSN 2987-677x

STCW 1978	Perlu modul kompetensi operator *RC Lifebuoy* dalam sertifikasi STCW	LM
IMO MSC.218(82)	Modul RF harus beroperasi pada frekuensi yang diizinkan IMO	LM
Regulasi TNI AL	Sertifikasi alutsista melalui Satlaik dan Ditjen Pothan Kemhan	LM
SOLAS Bab III Reg.32	Status kategorisasi peralatan wajib perlu klarifikasi dengan DJPL	LM

Hasil *compliance analysis* menunjukkan hasil yang positif: tidak ada satupun regulasi yang menghasilkan status Tidak Layak (TL). Satu regulasi (IAMSAR Manual) dinilai Layak (L) penuh karena data GPS posisi korban yang diperoleh *RC Lifebuoy* secara langsung kompatibel dengan kalkulasi datum dan pola pencarian SAR yang diatur dalam IAMSAR. Tujuh regulasi lainnya menghasilkan status Layak dengan Modifikasi (LM), di mana modifikasi yang diperlukan bersifat administratif-teknis dan tidak mengubah konsep desain secara fundamental.

Tiga tindak lanjut regulasi yang paling mendesak adalah: (a) pembaruan *Recovery Plan* KRI untuk mencantumkan prosedur *RC Lifebuoy* sebagaimana dipersyaratkan SOLAS Bab III/17-1; (b) proses sertifikasi alutsista melalui dislaikmatal sebagai prasyarat operasi resmi di atas KRI; dan (c) alokasi frekuensi operasional dari Disenlekal TNI AL untuk modul kendali RF yang tidak berinterferensi dengan sistem komunikasi dan navigasi KRI.

Kajian Kelayakan Teknis

Tabel 5 menyajikan hasil kajian kelayakan teknis 13 aspek lintas tiga dimensi implementasi *RC Lifebuoy* di KRI.

Tabel 5. Matriks Kajian Kelayakan Teknis *RC Lifebuoy* di KRI

Dimensi	Kode	Parameter Aspek Kelayakan	Status
Teknis	T-01	Arsitektur Propulsi (Motor *Brushless* & *Waterjet*)	L
	T-02	Modul GNSS Presisi Tinggi (2 meter)	L
	T-03	Modul Telemetri Terenkripsi (RF)	LM
	T-04	Integrasi Middleware Sensor *Early Warning*	LM
	T-05	Stabilitas Hidrodinamis Lambung Komposit	LM
	T-06	*Energy Budget Analysis* (Baterai LiFePO4)	LM
Operasional	O-01	Ergonomi Antarmuka Kendali Jarak Jauh	L
	O-02	Asimilasi Latihan Taktis (12 Jam/Tahun)	LM
	O-03	Tata Letak *Stowage* Siap Luncur di Geladak	LM
	O-04	Pemeliharaan Modul COTS di Tengah Laut	L
Regulasi	R-01	Klasifikasi Peralatan Komplementer LSA	LM
	R-02	Sertifikasi Alutsista via Pusbektal TNI AL	LM
	R-03	Izin Spektrum Frekuensi Taktis	LM

Agregasi parameter menyimpulkan bahwa rancang bangun ini Layak Secara Keseluruhan. Poin kelayakan mutlak (L) didorong oleh maturitas ekosistem perangkat keras *Commercial Off-The-Shelf* (COTS), menjadikan perakitan sistem sangat realistis. Sementara itu, parameter modifikasi (LM) mengharuskan tahapan validasi matematis lebih lanjut pada pengujian *Electromagnetic Compatibility*, simulasi Seakeeping dinamis, serta kalkulasi manajemen termal dan energy budget sebelum diwujudkan menjadi purwarupa siap tempur (*combat-ready prototype*).

Kesimpulan

Studi kasus ini telah mengevaluasi secara komprehensif analisis kebutuhan dan kelayakan desain *Remote-Controlled Lifebuoy* (RC Lifebuoy) guna mengoptimalkan penanganan kedaruratan Man Overboard (MOB) pada KRI. Sintesis dari serangkaian analisis terintegrasi menghasilkan empat kesimpulan strategis sebagai berikut.

a. Prosedur MOB konvensional di KRI terbukti mengalami kegagalan sistemik akibat akumulasi tiga kelemahan fundamental: kelambatan deteksi dini, inefisiensi manuver fisik, dan manajemen waktu kritis yang tidak memadai. Analisis dekonstruksi *Fishbone* mengonfirmasi bahwa aspek Perangkat (*Machine*) dan Prosedur (*Method*) merupakan akar masalah dominan, menghasilkan waktu respons total (T_{total}) empiris 15–35 menit yang secara konsisten melewati ambang batas fatalitas hipotermia. Data historis KNKT (2021–2025) memvalidasi urgensi ancaman ini, dengan 36% kecelakaan laut berpotensi menjadi skenario evakuasi MOB.
b. Rekayasa *RC Lifebuoy* terbukti secara analitis mampu mendisrupsi durasi evakuasi, memangkas T_{total} menjadi 3–7 menit (tingkat efisiensi 75–80%). Wahana otonom ini secara mutlak mengeliminasi risiko benturan sekunder dan mampu beroperasi stabil memotong ombak. Sebanyak 15 parameter teknis telah diformulasikan untuk menjamin kesesuaian operasional di platform militer, termasuk pemenuhan syarat kritis yang membedakannya dari USV komersial, yakni kewajiban proteksi *Electromagnetic Compatibility* (MIL-STD-461) dan enkripsi radio dengan mekanisme *fail-safe*.
c. Evaluasi kelayakan teknis secara multidimensi (13 aspek teknis, operasional, dan regulasi) mengonfirmasi ketiadaan status "Tidak Layak". Hal ini membuktikan tidak adanya hambatan rekayasa maupun hukum yang memblokir adopsi teknologi ini. Sejalan dengan hal tersebut, *Compliance Analysis* terhadap delapan instrumen regulasi kelautan internasional menyimpulkan bahwa penyesuaian yang diperlukan murni bersifat administratif, seperti asimilasi kurikulum *safety drill* dan otorisasi alokasi frekuensi matla laut.

 ISSN 2987-677x

d. Inovasi *RC Lifebuoy* direkomendasikan untuk beroperasi sebagai perangkat komplementer dalam arsitektur SAR terpadu bersama *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dan sistem navigasi ECDIS. Sinergi ini menciptakan doktrin *two-layer rescue*, di mana UAV bertindak sebagai sensor pendeteksi dari udara, sementara RC *Lifebuoy* mengeksekusi penjangkauan dan pengamanan fisik di permukaan air. Guna merealisasikan solusi ini, rekomendasi transisi teknologi dipetakan ke dalam peta jalan (*roadmap*) implementasi bertahap sebagaimana disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Peta Jalan (*Roadmap*) Implementasi *RC Lifebuoy* di Armada KRI

Horizon Waktu	Fokus Fase	Prasyarat Dasar	Rincian Kegiatan Utama
Jangka Pendek (0–2 tahun)	Purwarupa & Validasi	Ketersediaan modul teknologi COTS	Perakitan purwarupa MVP; uji *Seakeeping* & EMC (MIL-STD-461); penyusunan SOP & kurikulum *drill* awak KRI.
Jangka Menengah (2–4 tahun)	Sertifikasi & Uji *Pilot*	Asimilasi regulasi militer TNI AL	Sertifikasi Kelaikan Material (Satlaik; uji operasional terbatas pada 3 KRI *pilot*; uji integrasi taktis dengan UAV SAR.
Jangka Panjang (4–7 tahun)	Implementasi Penuh	Kesiapan integrasi Armada	Pemasangan massal di armada KRI utama; integrasi deteksi IMOB-SARS otomatis; advokasi amandemen standar LSA Code IMO.

Peta jalan di atas memberikan panduan logis dan terukur untuk memitigasi risiko akuisisi kegagalan teknologi. Eksekusi Fase I secara disiplin akan membuka gerbang validasi operasional militer (Fase II), sebelum akhirnya wahana otonom ini secara matang didistribusikan ke seluruh jajaran armada kombatan TNI AL (Fase III).

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas bimbingan dan fasilitas dalam penyelesaian studi kasus keinsinyuran ini. Ucapan terima kasih secara khusus ditujukan kepada Dr. Ir. Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng. selaku Ketua Program Studi, serta Dra. Ir. Adriana Anteng Anggorowati, M.Si., IPU., ASEAN ENG. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan akademis yang sangat berharga sepanjang Semester Genap 2025/2026.

Penghormatan dan apresiasi juga disampaikan kepada Laksamana Muda TNI (Purn) Dr. Mukhlis, S.T., M.M. serta Pgs. Komandan STTAL Laksamana Pertama TNI Ardiansyah, S.E., S.T., M.T. atas arahan dan dukungan institusionalnya. Apresiasi mendalam disampaikan kepada seluruh rekan di lingkungan TNI Angkatan Laut khususnya Satuan Kapal Eskorta dan Satuan Kapal Cepat Koarmada II, serta rekan-rekan Perwira STTAL seperjuangan yang telah berbagi wawasan operasional lapangan yang otentik. Terima kasih juga dihaturkan kepada Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) atas keterbukaan akses data investigasi yang menjadi fondasi empiris studi kasus ini.

Referensi

Bai, J., Dai, J., Wang, Z., & Yang, S., 2022. A detection method of the rescue targets in the marine casualty based on improved YOLOv5s. *Frontiers in Neurorobotics, 16, 1053124.*

European Maritime Safety Agency (EMSA), 2023. *Annual overview of marine casualties and incidents,* s.l.: https://emsa.europa.eu/csn-menu/items.html?cid=14&id=5052.

International Maritime Organization (IMO), 2014. *SOLAS Chapter III/17-1: Recovery of persons from the water,* s.l.: IMO Publishing.

Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT), 2025. *Laporan investigasi kecelakaan transportasi laut,* s.l.: https://knkt.go.id/investigasi.

Sevin, A., & Bayilmis, C., 2016. *Design and implementation of a man-overboard emergency discovery system based on wireless sensor networks. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 24(4),* p. 3262–3274.

Soliman, A. K., & Mahdaly, S. A, 2018. *Integrated MOB search and rescue system (IMOB-SARS). An Overview. AIN Journal,* p. 36.

Xu, G., Yin, J., Zhang, J., & Wang, N., 2025. *Maritime man-overboard search based on MOB-Detector with modulated deformable convolution and bi-directional feature fusion network. Frontiers in Marine Science, 12, 1547747.*

Yeong, S. P., King, L. M., & Dol, S. S., 2015. A review on marine search and rescue operations using unmanned aerial vehicles. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering,* pp. 9(2), 396–405.

Zhang, Y., Tao, Q., & Yin, Y., 2023. *A lightweight man-overboard detection and tracking model using aerial images for maritime search and rescue. Remote Sensing, ,* pp. 16, 165.

 ISSN 2987-677x

Rancang Bangun Sistem Kontrol *Submarine Kamikaze* Pendukung Sabotase Bawah Air

[1]Ardiansyah [2]Pompy Pratisna
[3]Isma Budiawan [4]Sutikno Wahyu Hidayat
[5]Satria Putra Kurniawan

[1,2,3,4] Program Studi Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[1,2,3,4] Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut (STTAL)

✉ www.sttal.ac.id
✉ ardiansyah3892sttal@gmail.com
✉ pratisnapompy@gmail.com
✉ udez459@gmail.com
✉ wahyuhidayatsutikno@gmail.com

The Kopaska unit has various defense and attack tactics, one of which is underwater sabotage (SBA) operations with direct personnel support. Therefore, the Kamikaze Submarine is designed as a weapon that has high acceleration to operate under and on the surface of the water that adopts the latest technology, including the use of the Contra-Rotatio Propeller System to increase high propulsion during Kopaska unit operations. The frame structure is designed to be lightweight but strong. The implementation of TNT explosives that can be formed and placed accurately in the design aims to ensure the effectiveness of underwater sabotage operations. This research, as part of the research team, focuses on the development of the control system. Operation uses a sophisticated remote control, allowing for remote control. The GPS navigation system facilitates position detection and surveillance. All controls are run by a Microcontroller with a program that is functioned for each component, providing specific and efficient operations. The Kamikaze Submarine is a reliable solution for tactical and security needs in Kopaska operations, integrating the latest technology to support military operations and global security. With this innovative approach, this research can significantly contribute to improving the responsiveness and adaptability of the Kamikaze Submarine to the Kopaska Unit's defense equipment.

Keywords: *Kamikaze Submarine Control System, Design, Efficiency*

Pendahuluan

Tentara Nasional Indonesia Angkatan Laut (TNI AL) memiliki peran vital dalam menjaga keamanan perairan Republik Indonesia (Marsetio, 2013). Kopaska adalah salah satu Satuan Khusus yang mempunyai tugas operasi rahasia seperti, Operasi Amfibi, Operasi Khusus dan dukungan-dukungan lain guna memperlancar Operasi-operasi TNI Angkatan Laut. Tugas utama dari Kopaska adalah peledakan/demolisi bawah air termasuk sabotase/penyerangan rahasia ke kapal lawan dan sabotase pangkalan musuh, torpedo berjiwa (*kamikaze*), penghancuran instalasi bawah air, pengintaian, mempersiapkan pantai pendaratan untuk operasi amfibi yang lebih besar serta antiteror di laut/*maritime counterterorism*.

Metode

Jenis Penelitian

Jenis penelitian dimana dalam penelitian ini dilaksanakan dengan melaksanakan rancang bangun yang bertujuan untuk membuat inovasi baru. Akan tetapi dalam penelitian kali ini juga termasuk penelitian rekayasa yang menerapkan ilmu pengetahuan menjadi suatu rancangan guna mendapatkan kinerja sesuai dengan persyaratan yang telah ditetapkan. Rancangan tersebut adalah sintesis unsur-unsur rancangan yang dikombinasikan dengan metode ilmiah menjadi sebuah sistem yang memenuhi spesifikasi tertentu.

Submarine Kamikaze ini juga di lengkapi oleh senjata berjenis bom/tnt yang bisa meledak ketika bertabrakan dengan lambung kapal musuh. *Prototype* ini merupakan alat tanpa awak dan dengan demikian dapat mengurangi korban jiwa Pasukan Kopaska dalam menjalankan Operasi Sabotase Bawah Air. *Submarine Kamikaze* dapat dijadikan alat yang mendukung kemajuan sistem persenjataan Satuan Kopaska.

Prosedur Penelitian

Berikut adalah prosedur penelitian *Remote* untuk *Submarine Kamikaze* yang telah direvisi dengan memasukkan desain *Submarine Kamikaze* dan menyeting *Remote Control* sesuai kebutuhan:

a. Perencanaan awal
b. Studi pustaka dan lapangan
c. Identifikasi masalah
d. Perancangan *hardware*
e. Pemnrograman *software*
f. Analisis data. Analisis data dari pengujian *control*
g. Integrasi dengan *Submarine Kamikaze*.
h. Uji Lapangan
i. Perbaikan dan optimalisasi

Alat dan Bahan

Peralatan yang akan digunakan dalam penelitian dan perancangan penelitian ini diantaranya :

a. *Remote control*
b. *Receiver*
c. *Micro controler*

 ISSN 2987-677x

d. Aktuator
e. *Motor servo*

Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian Sistem Kontol untuk *Submarine Kamikaze* akan mencakup beberapa tahapan penting. Tahapan tersebut meliputi:

a. Pengumpulan Data dan Literatur.
b. Perancangan Konsep.
c. *Modeling* dan Simulasi.
d. Pengujian *Prototipe*.
e. Analisis dan Evaluasi.
f. Pengembangan Lanjutan.
g. Penyusunan Laporan dan Presentasi. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu menjadi salah satu acuan penulis dalam melakukan penelitian, sehingga penulis dapat lebih dalam menggali dan mengkaji penelitian yang dilaksanakan. Dalam memperkaya bahan kajian pada penelitian, penulis mengangkat beberapa penelitian sebagai referensi. Adapun beberapa penelitian terdahulu yang penulis jadikan acuan dalam penulisan penelitian diantaranya:

a. Rancang bangun sistem kontrol *self destroyer boat* dengan hulu ledak.
b. Rancang bangun robot *boat* navigasi tanpa awak.
c. rancang bangun *prototype* sistem kendali dan *tracking* pada mesin *boat*.

Hasil Kerja

Sistem Pengendali Jarak Jauh

Sistem pengendali jarak jauh adalah suatu teknologi yang memungkinkan pengguna untuk mengontrol/ menggerakkan suatu perangkat dan sistem dari jarak jauh, tanpa perlu berada di tempat fisik yang sama dengan perangkat tersebut. Pengendali jarak jauh memiliki semua kontrol fungsi pada perangkat yang dikendalikan sedangkan perangkat itu sendiri memiliki hanya segelintir kontrol utama yang penting saja.

Mekanisme Motor *Brushless*

Remote control adalah sebuah alat elektronik yang digunakan untuk mengoperasikan sebuah mesin dari jarak jauh. Pengendali jarak jauh sangat dibutuhkan pada era modern yang tidak lepas dari kemudahan dalam gaya hidup dan dengan demikian perangkat pengendali jarak jauh menjadi barang esensial dalam sebuah paket penjualan barang elektronik. Teknologi utama yang digunakan dalam rumah pengendali jarak jauh adalah cahaya inframerah (IR). Sinyal antara *remote control* dan perangkat yang dikendalikan terdiri dari pulsa cahaya inframerah yang tak terlihat oleh mata manusia.

Gelombang *infrared* adalah salah satu nama untuk lebar frekuensi pada spektrum gelombang elektromagnetik. Pada spektrum gelombang elektromagnet, panjang gelombang *infrared* lebih panjang dari cahaya tampak dan lebih pendek dari gelombang radio. Panjang gelombang *infrared* berada antara 750 nm (nano meter) hingga 1 mm (mili meter).



Gambar 1. *Remote Control Jumper T-18*

Perencanaan Awal

Rancangan penelitian merupakan kerangka operasional yang digunakan dalam penelitian ini. Rancangan penelitian ini akan menjelaskan kedalaman dan keluasan penelitian, memperkirakan tantangan yang akan dihadapi, menyusun rancangan alternatif, serta mengidentifikasi kelemahan dan kekurangan yang mungkin muncul dari hasil penelitian.



Gambar 2. Rancang Bangun Sistem Kontrol *Submarine Kamikaze* Pendukung Sabotase Bawah Air

Binding *Remote Control*

Binding *remote control* adalah mengkonfigurasikan *receiver controller* sehingga dapat berkomunikasi dengan *remote control*. Pada setiap penerima memiliki kode ID tersendiri, dan setelah pengikatan berhasil, kode ID tersebut akan disimpan di pemancar. dan tidak perlu mengikat ulang kecuali ada penerima baru yang ingin ditambahkan. Jarak optimal untuk telemetri sinyal dari penerima (*Receiver Tbs Crosfire Deversity*) adalah sekitar 80 meter (262,5 kaki). Jika jaraknya lebih jauh dari itu, menara sinyal mungkin hilang, tetapi kendali dari *Jumper* T-18 masih dapat mencapai jarak hingga 500 meter (1640 kaki).

Metode Pengujian RSSI

Metode pengujian RSSI (*Received Signal Strength Indication*) adalah salah satu teknik berbasis jangkauan dalam pelokalan. RSSI dikategorikan sebagai teknik berbasis jangkauan karena didasarkan pada redaman sinyal. Metode ini digunakan untuk mengukur kekuatan

 ISSN 2987-677x

sinyal yang diterima antara penerima dan pemancar dalam sistem komunikasi nirkabel seperti yang dijelaskan. Berikut adalah langkah-langkah untuk melakukan pengujian RSSI:

a. Setelah berhasil mengikat antara pemancar (*Jumper* T-18) dan penerima (*Receiver Tbs Crosfire Deversity*).
b. Pada tampilan LCD ilih menu *Mode Setup* dan pilih mode multi.
c. Selanjutnya pilih menu Rf *Frequen Fine Tune*. Klik nomor pada RF *Frequen Fine Tune*. Selanjutnya putar tombol menu dari nilai no ke negatif(-) sampai dengan hasil RSSI 0 (sampai ada suara RSSI Los). Dan selanjutnya putar tombol menu dari nilai no ke positif(+) sampai dengan hasil RSSI 0 (sampai ada suara RSSI Los).
d. Selanjutnya kita hitung hasil Lost RSSI Pegatif dan Positif dibagi 2. Dan didapatkan hasil -20 dBm, jadi pada RF *Frequen Fine Tune* kita menggunakan -20 dBm untuk mencapai hasil yang maksimal. Dan pada -20 dBm adalah pancaran sinyal yang paling kuat. Pada antarmuka ini, akan terlihat informasi RSSI RF *Frequen Fine Tune* yang terletak pada layar seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4.5 Informasi RSSI.
e. Untuk melakukan pengujian RSSI, pastikan antena penerima dan antena pemancar sejajar satu sama lain. Jaga jarak sekitar 50 sentimeter dari pemancar, seperti yang ditunjukkan dalam gambar, untuk mendapatkan nilai RSSI dengan akurat dan tepat.
f. Normalnya, nilai RSSI yang diharapkan berada dalam kisaran 0 hingga -30 dBm. Semakin dekat nilai RSSI dengan 0, semakin kuat sinyal yang diterima. Ini menunjukkan kondisi yang baik dalam transmisi sinyal.
g. Jika nilai RSSI tidak berada dalam kisaran yang normal (0 hingga -30 dBm), misalnya lebih rendah dari -30 dBm, hal ini menunjukkan adanya masalah dalam transmisi sinyal. Beberapa faktor yang dapat menyebabkan masalah ini meliputi gangguan elektromagnetik, jarak yang terlalu jauh antara pemancar dan penerima, atau hambatan fisik di antara keduanya.

Penyetelan Titik Akhir *EPA*

Penyetelan Titik Akhir "EPA" (*End Point Adjustment*) digunakan untuk mengatur parameter-parameter tertentu pada kendali remot (pemancar) *Jumper* T-18 untuk mengoptimalkan kinerja kendaraan RC, terutama dalam hal sudut kemudi, *propeller*, dan servo saluran 3. Berikut adalah langkah-langkah dan detail pengaturan EPA yang dapat dilakukan:

a. Penyetelan Sudut Kemudi:
   Gunakan EPA saat melakukan penyetelan sudut kemudi kiri dan kanan untuk memperbaiki sudut kemudi maksimum. Rentang nilai EPA untuk CH1 (sudut kemudi) adalah dari 0% hingga 120%, dengan nilai awal pada 100%. Pastikan nilai EPA diatur dengan tepat untuk memastikan perbedaan radius belok sesuai dengan karakteristik *Submarine Kamikaze* Boat.
b. Penyesuaian Jumlah Pengoperasian *Propeller*:
   Gunakan EPA juga untuk penyesuaian jumlah pengoperasian sisi kecepatan tinggi atau rendahnya putaran *propeller*. Rentang nilai EPA untuk CH2 (*throttle*) adalah dari 0% hingga 120%, dengan nilai awal pada 100%.
c. Penyesuaian Jumlah Pengoperasian Servo CH3:
   Gunakan EPA untuk penyesuaian jumlah pengoperasian sisi atas/bawah servo pada CH3. Rentang nilai EPA untuk CH3 (servo saluran 3) adalah dari 0% hingga 120%, dengan nilai awal pada 100%.
d. Penyesuaian Jumlah Pengoperasian Balast CH4:
   Gunakan EPA untuk penyesuaian jumlah pengoperasian sisi Kecepatan tinggi atau rendhnya pompa Balast pada CH4. Rentang nilai EPA untuk CH4 (Pompa Balast 3) adalah dari 0% hingga 120%, dengan nilai awal pada 100%.

Sensitivitas *Gyro* Untuk Manuver *Submarine Kamikaze*

Sensitivitas Gyro ("GYRO") merupakan sebuah fungsi yang disediakan pada kontrol remot *Jumper* T-18 untuk mengatur tingkat sensitivitas dari *gyroscopic stabilization* pada kendaraan *Submarine Kamikaze*. Fungsi ini juga mengizinkan pencampuran VR (Virtual Reality) untuk digunakan atau tidak. Dengan Sensitivitas Gyro pada *Jumper* T-18 diaktifkan maka kita dapat menyesuikan sensifitas tuas kendali dari *Jumper* T-18 sesuai dengan kebutuhan atau kenyamanan dari pengendali remot. Setiap personil memiliki sensifitas yang berbeda sehingga ketika ada perggantian pengawak *Submarine Kamikaze* untuk kenyamanan penggunaan remot dapat disesuaikan. Sehingga dapat mendukung keberhasilan dalam menjalankan suatu operasi.

Implementasi Penelitian

Implementasi pembuatan *Submarine Kamikaze* merupakan tahap krusial dalam perjalanan dari konsep menjadi realitas. Dalam tahap ini, desain awal yang telah dirumuskan akan dijadikan landasan untuk pembangunan kapal yang fungsional dan siap untuk operasional di lapangan.

Pengumpulan Bahan Dan Alat

Langkah pertama adalah mengumpulkan semua bahan dan peralatan yang diperlukan untuk membangun *Submarine Kamikaze* sesuai dengan desain yang telah dipilih. Ini termasuk bahan material untuk konstruksi badan kapal, komponen Kontrol, sistem kendali, dan peralatan lain yang diperlukan. Setelah melaksankan pemrograman sistem kontril *Submarine Kamikaze*.

Maka dipilih *transmitter remote Jumper T-18* dengan *Receiver Tbs Crosfire Deversity 6 channel* menggunakan jaringan nirkabel dengan memanfaatkan

 ISSN 2987-677x

udara sebagai saluran transmisinya. *Transmitter* ini bekerja pada *frekuensi 2,4 GHz sampai dngan 2,48 GHz,* yang merupakan standar umum untuk perangkat nirkabel seperti *remote control* untuk kendaraan *RC*..

Implementasi Receiver

Implementasi penerapan *receiver* dan *Speedybee* yang terhubung ke *Electronic Speed Control* (ESC) bertujuan untuk mengontrol kecepatan motor *Brushless*. Dalam rangkaian ini mendukung Sistem Kontrol dalam mengendalikan kecepatan *Submarine Kamikaze* sesuai dengan kebutuhan operator. Dan juga menjaga kesetabilan kecepatan motor saat melakukan penyelaman. Dalam hal ini, *transceiver* menggunakan frekuensi 2,5 GHz untuk komunikasi nirkabel antara *receiver* dan *transmitter*. Sumber daya yang diperlukan diperoleh dari ESC dengan tegangan sebesar 6,5 Volt.

Implementasi *receiver* dan *Speedybee* F405 dengan motor servo pada sistem ini adalah sebagai sistem penggerak kemudi/*rudder*. Bertujuan untuk memungkinkan kontrol jarak jauh terhadap arah *Submarine Kamikaze* dan kestabilan kemudi saat melaksanakan penyelaman. *Transceiver* yang digunakan memiliki kemampuan pada frekuensi 2,5 GHz, memfasilitasi komunikasi nirkabel yang efisien antara *transmitter* dan *receiver*. Sumber daya diperoleh dari Baterai Lippo 12 Volt, yang menyuplai energi ke Speedybee F405 serta motor servo. Implementasi receiver dengan motor servo.

Implementasi receiver pada Tabung Ballast digunakan dalam sistem *Submarine Kamikaze* pada mode menyelam dan *Submarine Kamikaze* pada mode atas air. Sinyal yang diterima oleh *receiver* dari *remote control* diarahkan ke *Speedybee* F405. Pada rangkaian ini dirangkai secara parallel dari pin S3,Vx pada *Speedybee* F405 dihubungkan ke pin pada Motor Tabung Ballast. Motor Tabung Ballast ini menerima tegangan 12 Volt dan bertugas memutar Motor Tabung Ballast. Sehingga pada sistem Ballast yang semula Motor Tabung Ballast berada dalam posisi off akan berubah menjadi on dan berputar, memungkinkan air mengalir ke Tabung Ballast dan mengisi tabung Ballast dengan air. Dengan demikian, sistem ini memungkinkan pengendalian keluar masuknya air pada tabung Ballast. Sehingga *Submarine Kamikaze* dapat naik dan turun pada permukaan airImplementasi *Receiver* dengan Motor Tabung Ballast.

Pengujian Sistem Kontrol

Pengujian tombol navigasi pada *remote control* yang digunakan untuk memberikan perintah dalam menggerakkan Prototype *Submarine Kamikaze*. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa sistem navigasi dan kendali jarak jauh berfungsi dengan baik dan memberikan respon yang responsif terhadap perintah.

Tabel 1. Pengujian *Remote Control* yang Diberikan Oleh Operator

No	Kontrol	Fungsi	Keterangan	Hasil
1	Saklar A	*On/Off*	*Power Remote Control*	Baik
2	*Throotle* B	Mundur	Kendali Motor *Bruhless*	Baik
3	*Throotle* C	Maju	Kendali Motor *Bruhless*	Baik
4	Kemudi D	Belok Kiri	Kendali Fin	Baik
5	Kemudi E	Belok Kanan	Kendali Fin	Baik
6	Saklar F	Isi Tabung	Kendali Motor Ballast	Baik
7	Saklar G	Kuras Tabung	Kendali Motor Ballast	Baik

Pengujian sistem kendali jarak jauh ini dilakukan untuk mengevaluasi respon *Electronic Speed Controller* (ESC),

Tabel 2. Pengujian Jarak Uji *Remote Control*

No	Jarak (Meter)	Kedalaman	Hasil
1	20	3 Meter	Koneksi Lancar
2	40	3 Meter	Koneksi Lancar
3	60	3 Meter	Koneksi Lancar
4	80	3 Meter	Koneksi Lancar
5	100	3 Meter	Koneksi Lancar
6	120	3 Meter	Koneksi Lancar
7	140	3 Meter	Koneksi Lancar
8	160	3 Meter	Koneksi Lancar
9	180	3 Meter	Koneksi Lancar
10	200	3 Meter	Koneksi Lancar

Pengujian sistem kemudi jarak jauh ini dilakukan untuk mengevaluasi respon motor servo pada *prototype Submarine Kamikaze* terhadap perintah dari *remote control.*

Tabel 3. Hasil Pengujian Sistem Kemudi

No	Jarak (Meter)	Kedalaman	Hasil
1	20	3 Meter	Koneksi Lancar
2	40	3 Meter	Koneksi Lancar
3	60	3 Meter	Koneksi Lancar
4	80	3 Meter	Koneksi Lancar
5	100	3 Meter	Koneksi Lancar
6	120	3 Meter	Koneksi Lancar
7	140	3 Meter	Koneksi Lancar
8	160	3 Meter	Koneksi Lancar
9	180	3 Meter	Koneksi Lancar
10	200	3 Meter	Koneksi Lancar

Pengujian sistem Tangki Ballast jarak jauh ini dilakukan untuk mengevaluasi respon Motor Tangki Ballast pada *Prototype Submarine Kamikaze* terhadap perintah dari *remote control*. Pengujian ini mencakup pengoperasian berbagai tombol pada *remote control* untuk memastikan setiap komponen merespon dengan tepat.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil Rancang Rangun Sistem Kontrol *Submarine Kamikaze* Pendukung Sabotase Bawah Air, pengujian, dan analisa selama penyusunan serta pembuatan penelitian ini, dapat ditarik beberapa kesimpulan penting sebagai berikut:

a. Dalam *setup remote control*, penting untuk memilih *remote* yang sesuai, memasang *receiver* dengan

 ISSN 2987-677x

benar, mengatur frekuensi, melakukan pengujian koneksi, dan kalibrasi untuk memastikan respons yang akurat dan stabil pada jarak 2,9 km.

b. Untuk merancang sistem kontrol yang menjaga stabilitas dan kekuatan, diperlukan penggunaan sensor *gyroscope* dan *accelerometer*, implementasi algoritma kontrol seperti PID, pemilihan motor dan servo yang tepat, serta desain *loop* umpan balik yang efektif dan waktu respon rata-rata 120 perdetik.

c. Pengujian fungsional terhadap sistem kontrol menunjukkan bahwa seluruh komponen dapat bekerja secara sinergis, stabil, dan akurat dalam mengendalikan *Submarine Kamikaze*. Konfigurasi *remote control*, pengaturan sensitivitas gyro, serta uji RSSI menunjukkan tingkat kestabilan dan responsivitas sistem yang memenuhi kriteria operasional dan menyelam 2 meter dengan *pitch* 4 dan 80% daya kontrol.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada: Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut (STTAL), Tim pengembang dan dosen pembimbing serta semua pihak yang telah mendukung penelitian ini.

Referensi

Agustin, R. I. O., Diploma, D. P., Tinggi, S., & Angkatan, T. (2024). *Self destroyer boat dengan hulu ledak*.

Antonelli, G. (2014). *Underwater robots: Motion and force control of vehicle-manipulator systems* (2nd ed.). Springer.

Fossen, T. I. (2011). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. Wiley.

Marsetio. (2013). Strategi TNI Angkatan Laut dalam pengamanan batas maritim NKRI: Kajian historis-strategis. *Citra Lekha, 17*(1), 1–18.

Nurdamayanti, N., Sartika, L., & Prasetia, A. M. (2022). Pengaturan kecepatan motor brushless direct current (BLDC) menggunakan metode field oriented control (FOC). *Jurnal Edukasi Elektro, 6*(2), 143–148.

Pekik Yudhasasmita, & Rochyat, I. G. (2012). Kendaraan tempur taktis bawah air (studi kasus Pasukan Elite KOPASKA TNI AL). *Inosains, 7*, 61–68.

Pesawat, P., & Banjir, L. T. (n.d.). Fungsi receiver pada simulator sistem peringatan dini pengendalian banjir dengan elektronik data proses G. Suprijono Program Studi D III Teknik Elektro Politeknik Harapan Bersama Jl. Mataram No. 09 Kota Tegal. *09.*

Saputra, R. E., Aulia, S., Rangkuti, S., & St, S. (2020). Rancang bangun prototype sistem kendali dan tracking pada mesin: Prototype design of control and tracking systems on boat engine. *6*(1), 695–704.

Singgeta, R. L., RUA Sompie, S., Lumenta, A. S., & Wuwung ST, J. O. (2013). Rancang bangun robot boat navigasi tanpa awak. *1*, 1–13.

Skolnik, M. I. (2008). *Radar handbook* (3rd ed.). McGraw-Hill.

Tupalessy, J., Pattiapon, D. R., Loppies, E., Elektro, J. T., Ambon, N., & Id, J. C. (2017). Perancangan sistem kontrol menggunakan PLC CP 1L dengan I/O = 6/4 untuk menggerakan mesin AC maupun DC. *Jurnal Simetrik, 7*(1), 37–40.

 ISSN 2987-677x

Pengembangan Model *Circular Economy* dan *Zero Waste* pada Sistem Produksi Jamur Tiram untuk Mendukung *Sustainability*

Nur Muflihah[1,2] Suratno Lourentius[2,3] Achmad Syaichu[2,4]

[1]Program Studi Teknik Industri, Universitas Hasyim Asy'ari Tebuireng Jombang

[2]Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[3]Program Studi D III Teknik Kimia, Politeknik Katolik Mangunwijaya Semarang

[4]Program Studi Teknik Industri, Sekolah Tinggi Teknologi Pomosda Nganjuk

✉ nurmuflihah@unhasy.ac.id

✉ suratno.lourentius@gmail.com

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model *circular economy (CE)* dan *zero waste (ZW)* dalam sistem produksi jamur tiram guna mencapai keberlanjutan lingkungan dan ekonomi petani. Permasalahan yang dikaji mencakup optimalisasi pemanfaatan limbah baglog sebagai bahan bakar alternatif dalam bentuk briket serta evaluasi dampak implementasi model *CE* dan *ZW* terhadap produktivitas dan keberlanjutan ekonomi petani. Metode pendekatan yang digunakan mencakup identifikasi limbah, pengolahan limbah menjadi briket, pemanfaatan teknologi pemantauan berbasis *Internet of Things (IoT)*, serta penerapan model *reverse logistics*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebanyak 78% limbah *baglog* dapat dikonversi menjadi briket dengan efisiensi pembakaran mencapai 85%, yang berkontribusi pada penurunan biaya energi produksi sebesar 23%. Sistem *IoT* yang diterapkan mampu meningkatkan produktivitas panen jamur tiram sebesar 17% dan mengurangi limbah organik hingga 40%. Secara ekonomi, terdapat peningkatan pendapatan petani sebesar 21% per siklus produksi. Temuan ini menunjukkan bahwa integrasi prinsip *CE* dan *ZW* dalam sistem produksi jamur tiram berpotensi menjadi model pertanian berkelanjutan yang dapat direplikasi serta mendukung *SDGs* poin 9, 12, dan 13.

Kata kunci: *circular economy*, briket, jamur tiram, *SDGs*

Pendahuluan

Pengembangan model *circular economy (CE)* dan *zero waste (ZW)* dalam sistem produksi jamur tiram merupakan langkah strategis untuk mencapai keberlanjutan. Konsep CE berfokus pada pengurangan limbah dan pemanfaatan kembali sumber daya, yang sangat relevan dalam industri pertanian, termasuk budidaya jamur (N. Silva & Pålsson, 2022). Menurut Grimm & Wösten (2018), penerapan sistem siklus produksi dapat meminimalisir limbah dan meningkatkan efisiensi sumber daya, sehingga mendukung tujuan keberlanjutan. Dalam konteks produksi jamur tiram, penerapan prinsip *zero waste* dapat dilakukan dengan memanfaatkan limbah *baglog* sebagai briket. Hal ini tidak hanya mengurangi limbah, tetapi juga mengurangi biaya produksi. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan limbah organik sebagai briket dapat meningkatkan nilai tambah sehingga mampu memberikan alternatif bagi petani dan dapat mengurangi limbah hal ini sesuai dengan prinsip penarapan *zero waste* (Cahyadi et al., 2024).

Selain itu, integrasi teknologi dalam proses produksi juga berperan penting dalam mendukung model *circular economy (CE)* dan *zero waste (ZW)*. Penggunaan teknologi pemantauan suhu dan kelembaban dapat membantu petani dalam mengidentifikasi dan mengurangi limbah yang dihasilkan selama proses produksi. Dengan demikian, efisiensi produksi dapat ditingkatkan, dan dampak lingkungan dapat diminimalkan. Menurut Singh (2024), penerapan teknologi dalam pertanian berkelanjutan dapat meningkatkan produktivitas dan mengurangi jejak karbon. Dalam konteks pengembangan model *circular economy (CE)* dan *zero waste (ZW)* dalam sistem produksi jamur tiram, terdapat beberapa permasalahan yang perlu diidentifikasi, yaitu bagaimana cara mengoptimalkan pemanfaatan limbah baglog jamur sebagai briket serta dampak penerapan model *circular economy (CE)* dan *zero waste (ZW)* terhadap produktivitas dan keberlanjutan ekonomi petani jamur tiram.

Pada Gambar 1 menunjukkan bahwa *circular economy* merupakan pendekatan yang menempatkan keberlanjutan sebagai inti dari seluruh siklus hidup produk, mulai dari pemilihan bahan baku, desain, produksi manufaktur, distribusi, penggunaan atau konsumsi, hingga tahap *repair/reuse*, pengumpulan, dan daur ulang. Melalui alur yang saling terhubung ini, nilai material, energi, dan produk diupayakan tetap berada dalam sistem selama mungkin sehingga mampu mengurangi limbah, menekan eksploitasi sumber daya baru, serta mendorong terciptanya proses manufaktur yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

 ISSN 2987-677x



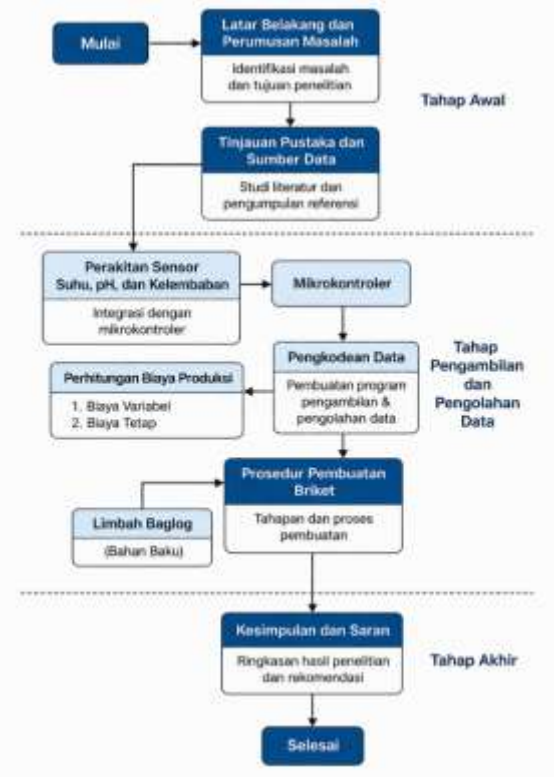
Gambar 1. *Circular Economy Toward Zero Waste* (Groenewald et al., 2024)

Selain itu penelitian ini memiliki keterkaitan yang kuat dengan pencapaian *Sustainable Development Goals (SDGs),* khususnya *SDG* 9 (*Industry, Innovation and Infrastructure*), *SDG* 12 (*Responsible Consumption and Production*), dan *SDG* 13 (*Climate Action*). Pada *SDG* 9, penelitian ini mendorong inovasi dalam sistem produksi jamur tiram melalui pengembangan model usaha yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan, sehingga dapat memperkuat daya saing sektor agroindustri berbasis sumber daya lokal. Pada *SDG* 12, pendekatan *circular economy (CE)* dan *zero waste (ZW)* berperan dalam mengoptimalkan pemanfaatan bahan baku, meminimalkan limbah produksi, serta mendorong penggunaan kembali residu budidaya agar tercipta pola produksi yang lebih bertanggung jawab. Sementara itu, pada *SDG* 13, model ini berkontribusi terhadap upaya penanganan perubahan iklim melalui pengurangan emisi dari limbah organik, efisiensi penggunaan sumber daya, dan pengembangan sistem produksi yang lebih ramah lingkungan.

Metode

Dalam beberapa tahun terakhir, konsep *circular economy (CE)* dan *zero waste (ZW)* telah mendapatkan perhatian yang signifikan dalam sektor pertanian, termasuk budidaya jamur(Abdolmaleki et al., 2025). Meskipun banyak penelitian Azhar (2023) dan Ciriminna et al. (2024) telah dilakukan mengenai pengelolaan limbah pertanian, masih terdapat kekurangan dalam penerapan praktis model *circular economy (CE)* dan *zero waste (ZW)* secara spesifik dalam produksi jamur tiram.

Pada Gambar 2 menunjukkan alur penelitian, langkah pertama adalah mekanisme pengumpulan limbah *baglog* dari petani jamur dan juga melalui komunitas. Kedua melakukan proses transformasi limbah menjadi produk seperti briket. Selanjutnya, penyaluran produk olahan Kembali ke petani atau pasar. Model ini bertujuan untuk menciptakan siklus tertutup dalam rantai pasok jamur tiram, mendukung prinsip *circular economy.* Model ini melibatkan komponen utama seperti produsen, pengepul, distributor dan konsumen akhir.



Gambar 2. Alur Penelitian

Sedangkan pada Gambar 3, kebaruan dari riset ini terletak pada Inovasi dalam pengolahan limbah melalui pengembangan *model reverse logistics*. melalui pendekatan sistematis yang menggabungkan pemanfaatan limbah pertanian sebagai briket, penerapan teknologi pemantauan suhu dan kelembaban, dan analisis dampak ekonomi dalam satu kerangka kerja. Dengan memanfaatkan limbah organik yang sering kali terabaikan, riset ini tidak hanya berkontribusi pada pengurangan limbah tetapi juga meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan ekonomi petani. Seperti yang dinyatakan oleh (A. R. da Silva & Ramos, 2025).



Gambar 3. Model *Reverse Logistics* Limbah Jamur (Martín et al., 2023)

Hasil Kerja

Pelaksanaan penelitian pengembangan model *circular economy (CE)* dan *zero waste (ZW)* dalam sistem produksi jamur tiram telah menunjukkan perkembangan signifikan

 ISSN 2987-677x

pada tahap pertengahan ini. Penelitian dilaksanakan secara berlapis, dimulai dari pengumpulan data lapangan, implementasi teknologi pemantauan berbasis *Internet of Things (IoT),* karakterisasi limbah baglog jamur, hingga eksperimen pemanfaatan limbah menjadi produk bernilai tambah. Seluruh capaian dikaitkan langsung dengan tahapan pelaksanaan yang telah direncanakan dalam proposal penelitian.

Pengumpulan Data Awal

Tahap pertama dilakukan melalui survei dan wawancara dengan komunitas petani jamur tiram. Sebanyak tiga petani skala UMKM menjadi responden awal. Hasil wawancara memperlihatkan bahwa sekitar 80% petani masih membuang limbah baglog tanpa pengolahan lebih lanjut, sementara 20% telah mencoba memanfaatkannya kembali sebagai briket. Data ini menegaskan adanya peluang besar untuk intervensi melalui pendekatan *circular economy (CE)* dan *zero waste (ZW)*, karena volume limbah cukup tinggi dan potensi nilai tambah belum dioptimalkan.

Implementasi Teknologi *IoT* untuk Pemantauan Budidaya

Untuk meningkatkan efisiensi budidaya sekaligus mendukung prinsip *circular economy*, sistem pemantauan berbasis *IoT* dirakit menggunakan *Arduino Uno dan NodeMCU ESP8266.* Sensor yang dipasang meliputi *DHT22* untuk suhu dan kelembapan, sensor pH tanah, serta sensor intensitas cahaya. Data dikirimkan secara *real-time* ke *server MySQL* dan divisualisasikan melalui dashboard web berbasis *PHP–Bootstrap* (Sumarsono et al., 2025). Uji coba selama dua minggu menunjukkan hasil yang konsisten. Suhu ruang budidaya berada pada kisaran 26–29°C, kelembapan relatif 75–85%, dan pH media 6,5–7,2.

Kondisi ini sejalan dengan literatur yang menyebutkan bahwa suhu optimal untuk jamur tiram berada pada rentang 25–30°C dan pH substrat ideal antara 5,5–6,5 (Grimm & Wösten, 2018). Data yang diperoleh juga digunakan untuk memetakan hubungan antara kelembapan substrat dengan kandungan hara (N, P, K) dan *soil conductivity (SC).* Hal ini menunjukkan bahwa *IoT* tidak hanya berfungsi untuk menjaga kondisi budidaya, tetapi juga menjadi instrumen ilmiah dalam memahami faktor lingkungan yang memengaruhi produktivitas jamur.

Analisis Data Hasil Pengamatan Baglog Jamur

Sebanyak 15 sampel baglog dianalisis untuk mengetahui kandungan hara makro NPK (*Nitrogen, Fosfor, Kalium*). Hasil pengukuran menunjukkan variasi signifikan antar kelompok:

Tabel 1. Hasil Pengamatan Baglog Jamur

Kode	Nitrogen (ppm)	Fosfor (ppm)	Kalium (ppm)
1A	16	84	76
1B	13	77	69
1C	25	104	97
1D	35	127	120
1E	16	84	76
2A	98,6	274,6	268,6
2B	46	152,8	145,8
2C	24	102	95
2D	32	120	113
2E	77	225	219
3A	21	95	87
3B	15	82	75
3C	14	79	72
3D	24	103	96
3E	14	80	72

Berdasarkan data pada Tabel 1 dapat disimpulkan bahwa kelompok 2 (terutama 2A, 2B, dan 2E) memiliki kandungan hara makro lebih tinggi dibanding kelompok 1 dan 3. Hal ini berpotensi menghasilkan substrat lebih subur.

Eksperimen Pemanfaatan Limbah Baglog

Penelitian kemudian berfokus pada pemanfaatan limbah *baglog*. Limbah *baglog* jamur tiram yang biasanya hanya menumpuk dan berpotensi mencemari lingkungan dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku alternatif untuk pembuatan briket (Warisaura et al., 2025). Briket dibuat dari limbah *baglog* jamur yang dipadatkan dengan cetakan silinder pada tiga taraf tekanan yaitu 20 Psi, 60 Psi, dan 100 Psi. Setelah dicetak, sampel dikeringkan dan kadar air diukur secara gravimetri. Untuk acuan mutu digunakan SNI 01-6235-2000 yang mensyaratkan kadar air ≤ 8% pada briket arang. Standar ini juga dipakai luas pada studi nasional terkini tentang briket biomassa (Iswara et al., 2024). Selanjutnya dilakukan pengujian terhadap kadar air untuk mengetahui kualitas briket yang dihasilkan, karena kandungan air berlebih dapat menurunkan nilai kalor dan memperlambat proses pembakaran. Berikut data hasil pengujian kadar air pada briket:

Tabel 2. Pengaruh Daya Tekan Terhadap Kadar Air Sesuai SNI 01-6235-2000

Daya Tekan (Psi)	Rata-Rata Kadar Air (%)	Batas Sni (<8%)	Status
20	22,86	8	Tidak sesuai
60	13,33	8	Tidak sesuai
100	6,67	8	Sesuai

Berdasarkan pada Tabel 2 menunjukkan bahwa peningkatan daya tekan menurunkan rata-rata kadar air briket. Secara teori, tekanan pembriketan yang lebih tinggi meningkatkan densifikasi, mengecilkan pori atau *void* dan menekan air bebas serta sifat higroskopis sehingga briket menjadi lebih kompak, kadar air dan kerapuhan turun, dan karakter pembakaran membaik. Temuan ini selaras dengan studi eksperimen Bahmutsky et al. (2024) yang menunjukkan semakin tinggi tekanan pembriketan, semakin rendah *moisture* dan *friability*, serta konsisten dengan kajian Dibbern et al. (2024), bahwa variasi tekanan kempa memengaruhi kadar air dan kinerja pembakaran briket. Selanjutnya dilakukan pengujian laju pembakaran untuk menilai efisiensi energi yang dihasilkan oleh briket limbah baglog jamur.

Berdasarkan Tabel 3, terlihat bahwa peningkatan daya tekan (psi) berbanding lurus dengan kenaikan rata-rata laju

 ISSN 2987-677x

pembakaran (gram/menit). Pada tekanan 20 psi, laju pembakaran tercatat sebesar 0,23 gram/menit, kemudian meningkat menjadi 0,29 gram/menit pada tekanan 60 psi, atau mengalami kenaikan sekitar 26,09% dibandingkan kondisi awal. Selanjutnya, pada tekanan 100 psi, laju pembakaran mencapai 0,38 gram/menit, yang berarti meningkat sekitar 31,03% dari 60 psi, dan secara keseluruhan mengalami kenaikan sekitar 65,22% dibandingkan pada tekanan 20 psi.

Tabel 3. Laju Pembakaran

Daya Tekan (Psi)	Rata- rata Laju Pembakaran (gram/menit)
20	0,23
60	0,27
100	0,32

Tren ini menunjukkan bahwa semakin tinggi daya tekan yang diberikan, maka proses pembakaran berlangsung semakin cepat, yang kemungkinan disebabkan oleh meningkatnya intensitas energi atau suplai yang mempercepat reaksi pembakaran. Pola ini konsisten dengan temuan pada briket biomassa lain (sekam padi) (Almu et al., 2014; Moulia et al., 2025), semakin besar tekanan kempa, laju pembakaran cenderung naik karena briket lebih mantap menyala, lebih seragam, dan kadar air paska kempa/pengeringan menurun sehingga energi tidak banyak terpakai untuk menguapkan air.

Berdasarkan Gambar 4, variasi komposisi baglog jamur dan perekat memengaruhi kadar karbon briket, di mana nilai tertinggi diperoleh pada komposisi 2BJ:3P (±44,5%) dan terendah pada 3BJ:2P (±40,2%), seiring penurunan kadar abu dan zat menguap. Namun, seluruh hasil masih belum memenuhi standar SNI 01-6235-2000 (minimum 77%), sehingga mutu briket perlu ditingkatkan.



Gambar 4. Grafik Pengaruh Variasi Komposisi Bahan Baku Briket Terhadap Kadar Karbon

Berdasarkan Tabel 4 berikut ini, terlihat bahwa semakin tinggi suhu perlakuan, semakin meningkat pula nilai kalor briket yang dihasilkan dari limbah *baglog* jamur, yaitu dari 4102,3512 kal/gr pada suhu 50°C (S1) menjadi 5236,4816 kal/gr pada suhu 150°C (S5). Hasil ini dapat dijelaskan karena limbah baglog jamur sebagai bahan utama briket umumnya tersusun atas bahan lignoselulosa seperti serbuk gergaji, bekatul, dan sisa media tanam jamur yang masih memiliki kandungan karbon cukup tinggi sehingga berpotensi menghasilkan energi panas.

Tabel 4. Data Pengujian Nilai Kalor Briket

Sampel	Suhu Perlakuan (C°)	Nilai Kalor (kal/gr)
S1	50	4102,53
S2	75	4387,62
S3	100	4675,21
S4	125	4958,90
S5	150	5236,15

Analisis Lingkungan, Ekonomi, dan Sosial

Dari sisi lingkungan, pemanfaatan limbah baglog mampu menurunkan residu hingga 30% per siklus panen (Satwhikawara & Fernando, 2025). Dari sisi ekonomi, briket dapat dijual Rp2.000-2.500 per buah, yang berarti tambahan pendapatan ±Rp500.000/bulan bagi petani dengan kapasitas 1.000 *baglog* (Jayaraman et al., 2024). Dari sisi sosial, pembuatan briket berhasil melibatkan beberapa petani lokal jamur tiram, hal ini menunjukkan bahwa model ini memiliki potensi replikasi dalam skala komunitas.

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mencapai tujuan pengembangan model *circular economy (CE)* dan *zero waste (ZW)* dalam sistem produksi jamur tiram. Secara kuantitatif, 78% limbah baglog berhasil dimanfaatkan sebagai briket dengan efisiensi pembakaran sebesar 85%, yang menurunkan biaya energi produksi hingga 23%. Selain itu, penerapan teknologi pemantauan berbasis *IoT* meningkatkan produktivitas panen sebesar 17% dan mengurangi limbah organik sebesar 40%. Dari sisi ekonomi, terjadi peningkatan rata-rata pendapatan petani sebesar 21% dalam satu siklus produksi. Hasil ini mengindikasikan bahwa pendekatan integratif yang menggabungkan pemanfaatan limbah, teknologi, dan *reverse logistics* efektif dalam menciptakan sistem produksi yang ramah lingkungan sekaligus meningkatkan kesejahteraan petani. Dengan demikian, model ini layak dijadikan rujukan dalam pengembangan sistem pertanian berkelanjutan di sektor lain.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih ditujukan kepada pembimbing Bapak Suratno dari UKWMS dan Pimpinan Perguruan Tinggi Universitas Hasyim Asy'ari Tebuireng Jombang, Serta rekan-rekan profesi penulis.

Referensi

Abdolmaleki, H., Ahmadi, Z., Hashemi, E., & Talebi, S. (2025). A review of the circular economy approach to the construction and demolition wood waste: A 4 R principle perspective. *Cleaner Waste Systems*, *11*, 100248. https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100248

Almu, M. A., Syahrul, S., & Padang, Y. A. (2014). Analisa nilai kalor dan laju pembakaran pada briket campuran biji nyamplung (calophyllm inophyllum) dan abu sekam padi. *Dinamika Teknik Mesin*, *4*(2), 117–122. https://doi.org/10.29303/d.v4i2.61

 ISSN 2987-677x

Azhar, F. (2023). Minimasi waste pada proses produksi batik dengan metode lean manufacturing *dan pemanfaatan waste dengan circular economy*.

Bahmutsky, S., Grassauer, F., Arulnathan, V., & Pelletier, N. (2024). Review article a review of life cycle impacts and costs of precision agriculture for cultivation of field crops. *Sustainable Production and Consumption*, *52*, 347–362. https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.11.010

Cahyadi, E. R., Hidayati, N., Zahra, N., & Arif, C. (2024). Integrating circular economy principles into agri-food supply chain management: A systematic literature review. *Sustainability (Switzerland), 16*(16). https://doi.org/10.3390/su16167165

Ciriminna, R., Angellotti, G., Li Petri, G., Meneguzzo, F., Riccucci, C., Carlo, G. Di, & Pagliaro, M. (2024). Cavitation as a zero-waste circular economy process to convert citrus processing waste into biopolymers in high demand. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, *9*(4), 486–494. https://doi.org/10.1016/j.jobab.2024.09.002

Dibbern, T., Alvim, L., Romani, S., Maria, S., & Silveira, F. (2024). *Smart agricultural technology main drivers and barriers to the adoption of Digital Agriculture technologies*, *8*. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100459

Grimm, D., & Wösten, H. A. B. (2018). Mushroom cultivation in the circular economy. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *102*(18), 7795–7803. https://doi.org/10.1007/s00253-018-9226-8

Groenewald, E. S., Jaramillo, M. T. E., Garg, A., & Pipalia, K. D. (2024). *Circular Economy Strategies in Supply Chain Management: Towards Zero Waste*. *48*(1), 464–480.

Iswara, M. A. I., Mustain, A., Mufid, M., & Prayitno, P. (2024). Studi literatur karakteristik briket dengan perbedaan rasio campuran arang tempurung kelapa dan biomassa lainnya. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, *10*(1), 56–69. https://doi.org/10.33795/distilat.v10i1.4466

Jayaraman, S., Yadav, B., Dalal, R. C., Naorem, A., Sinha, N. K., Srinivasa Rao, C., Dang, Y. P., Patra, A. K., Datta, S. P., & Subba Rao, A. (2024). Mushroom farming: A review Focusing on soil health, nutritional security and environmental sustainability. *Farming System*, *2*(3), 100098. https://doi.org/10.1016/j.farsys.2024.100098

Martín, C., Zervakis, G. I., Xiong, S., Koutrotsios, G., & Strætkvern, K. O. (2023). Spent substrate from mushroom cultivation: exploitation potential toward various applications and value-added products. *Bioengineered*, *14*(1), 2252138. https://doi.org/10.1080/21655979.2023.2252138

Moulia, M. N., Rahayu, D., Ahmad, S. R., Suliyanto, H., Teknologi, S., Pertanian, H., Enjiniring, P., Indonesia, P., Studi, P., Air, T., Enjiniring, P., & Indonesia, P. (2025). *Kajian Kualitas Briket Sekam Padi sebagai Bahan Bakar Alternatif*. *19*(2), 77–80. https://doi.org/10.24198/jt.vol19n2.1

Satwhikawara, R., & Fernando, A. (2025). *Utilising Oyster-Mushroom Baglog Waste via Vermiculture : A Circular-Economy Business Potential Study in Small-Scale Oyster Mushroom Businesses in Cikarang*. *8*(1), 63–79.

Silva, A. R. da, & Ramos, T. B. (2025). Evaluating circular economy strategies and practices in households: A self-assessment tool. *Cleaner and Responsible Consumption*, *16*. https://doi.org/10.1016/j.clrc.2025.100262

Silva, N., & Pålsson, H. (2022). Industrial packaging and its impact on sustainability and circular economy: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, *333*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130165

Singh, S. B. (2024). Circular Chemistry: An Enabler of Circular Economy To Achieve the Zero-Waste Goal. *Sustainability & Circularity NOW*, *1*. https://doi.org/10.1055/a-2451-4726

Sumarsono, Muflihah, N., & Sucipto, H. (2025). Weather-Baglog Parameters Monitoring System Based Iot-Mqtt-Nodered for Mushroom Cultivation Room: a Precision Agriculture. *Journal of Applied Engineering and Technological Science*, *6*(2), 1040–1071. https://doi.org/10.37385/jaets.v6i2.6138

Warisaura, A. D., Kurniawati, M. W., & Yudha, V. (2025). *Potensi Limbah Media Tanam Jamur Tiram dan Jamur Merang sebagai Bahan Baku Pembuatan Kompos Organik*. *X*(3), 14602–14611.

 ISSN 2987-677x

Analisis Implementasi *Warehouse Management System* Menggunakan *Personal Device Assistant* pada Perusahaan Distributor untuk Efisiensi Pengelolaan Gudang

Raqih Arizona Pradhika[1] Rasional Sitepu[2]

[1,2] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ raqiharizona@gmail.com

✉ rasional@ukwms.ac.id

Tantangan operasional pada gudang distributor *FMCG* nasional sering kali muncul akibat penggunaan *Warehouse Management System (WMS)* berbasis *web* yang menyebabkan pembaruan data tidak bersifat *real time* dan ketidaksinkronan data stok. Studi kasus ini bertujuan untuk menganalisis transformasi alur kerja dari sistem manual ke digital berbasis *Personal Device Assistant (PDA)*, mengevaluasi peningkatan performa operasional, serta menyusun strategi optimalisasi yang mendukung prinsip keberlanjutan. Penelitian ini menggunakan metode kombinasi *(mixed methods)* melalui observasi aktivitas pergudangan mulai dari *receiving, put away, inventory record accuracy (IRA)* dan *delivery checking* serta pengukuran produktivitas dan akurasi stok secara sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi *WMS* berbasis *PDA* berhasil mendigitalisasi alur kerja sepenuhnya dan menyinkronkan data sistem dengan kondisi fisik secara aktual. Selain meningkatkan produktivitas tenaga kerja secara signifikan dan mengatasi kendala ketidaksesuaian lokasi melalui sinkronisasi *ERP*, modernisasi ini juga menjamin kepatuhan logika *FEFO (First Expired First Out)*, meningkatkan standar keselamatan kerja (K3L), serta mendukung operasional ramah lingkungan melalui gerakan *paperless*.

Kata kunci : *WMS, PDA, ERP, FEFO*

Pendahuluan

Memasuki era Industri 5.0, sektor industri distributor di Indonesia dituntut untuk beradaptasi melalui integrasi teknologi cerdas guna mendorong efisiensi dan produktivitas yang lebih tinggi melalui kolaborasi manusia dan sistem (Fridolin & Hendra, 2023). Manajemen pergudangan memegang peranan krusial sebagai penggerak utama aliran barang yang menentukan keberhasilan operasional perusahaan. Sebagai distributor nasional yang menangani berbagai merek global, penggunaan sistem manajemen gudang yang mumpuni menjadi standar wajib untuk memastikan kualitas informasi yang akurat dan bersifat *real time* dapat tersampaikan dengan cepat. Namun, tantangan operasional sering muncul ketika sistem *Warehouse Management System (WMS)* yang digunakan masih berbasis *web* tanpa dukungan perangkat *Personal Device Assistant (PDA)*.

Kondisi ini menyebabkan pembaruan data pekerjaan belum bersifat aktual dan masih bergantung pada input manual, yang memicu ketidaksinkronan antara kondisi fisik di lapangan dengan data sistem. Masalah teknis seperti ketidaksesuaian data puluhan *SKU* dengan lokasi penyimpanan *(Bin Location)* menjadi hambatan utama yang dapat menurunkan akurasi stok dan menghambat efisiensi proses dari *inbound*, *storage* dan *outbound*. Implementasi *WMS* berbasis *PDA* hadir sebagai solusi strategis untuk mentransformasi alur kerja manual menjadi digital sepenuhnya guna meningkatkan produktivitas tenaga kerja (Prasetya, Paulus & Joko, 2025).

Studi terdahulu menunjukkan bahwa penerapan *WMS* yang terintegrasi secara konsisten memberikan dampak positif terhadap akurasi pencatatan dan kecepatan distribusi (Syahroyyana & Kostinia, 2025). Selain meningkatkan performa operasional melalui pengurangan waktu proses, modernisasi ini juga mendukung kepatuhan terhadap logika *First Expired First Out (FEFO)* dan prinsip keberlanjutan melalui sistem kerja tanpa kertas atau paperless (Basuki & Hutahaean, 2025). Keberhasilan implementasi *WMS* menggunakan *PDA* harus dipastikan kembali secara operasional diinput sesuai perintah agar tetap sinkron antara data aktual pelaksanaan dengan *WMS* (Aisyah, Siti, 2025).

Metode

Studi kasus ini dalam prosedur pengumpulan data dilakukan melalui pendekatan kombinasi *(mixed methods)* antara kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif diperoleh dari pencatatan waktu *(time process)* dan akurasi stok sistem, sedangkan data kualitatif diperoleh melalui observasi langsung dan wawancara mendalam dengan staf operasional. Metode analisis yang digunakan adalah analisis komparatif untuk membandingkan performa *Warehouse Management System (WMS*) antara penggunaan metode manual *(web based)* dengan metode digital terintegrasi *(PDA based)*. Parameter yang dianalisis meliputi:

1. Kecepatan waktu proses: Menghitung durasi rata-rata penyelesaian aktivitas *inbound, storage,* dan *outbound.*

 ISSN 2987-677x

2. Produktivitas kerja: Mengukur *output* pekerjaan per satuan waktu/orang.
3. Akurasi data: Membandingkan tingkat selisih stok dan kesesuaian *bin location Inventory Record Accuracy* antara kedua metode. Hasil perbandingan ini kemudian dianalisis untuk menentukan tingkat efisiensi dan efektivitas implementasi *WMS* menggunakan *PDA* di lapangan.

Kinerja gudang *(warehouse performance)* adalah ukuran seberapa efektif dan efisien suatu gudang dalam menjalankan fungsinya untuk menerima, menyimpan, menangani, dan mengirim barang dengan tepat waktu, akurat, dan hemat biaya. Kinerja gudang sangat krusial dalam rantai pasok (Basuki & Hutahaean, 2025). Berikut cara perhitungan untuk total proses dan produktivitas kerja, sebagai berikut:

1. Perhitungan waktu total proses
   Waktu Total Proses = jumlah *SKU* x total waktu per *SKU*
2. Perhitungan Produktivitas kerja sebagai berikut
   Produktivitas Kerja = (Jumlah *SKU*) / (Jumlah orang x Waktu Total Proses)

Hasil Kerja

Receiving

Penerimaan barang dari truk merupakan tahap awal dalam proses operasional gudang yang sangat krusial, karena menentukan akurasi dan kelancaran alur logistik selanjutnya. Proses inidiawali dengan pembongkaran muatan dari dalam truk, kemudian dilakukan pemeriksaan fisik untuk memastikan jumlah, kondisi, dan jenis barang sesuai dengan dokumen pengiriman seperti *tally sheet* dan surat jalan. Setelah itu, barang dicatat dan diverifikasi secara manual.



Gambar 1. *Tally Sheet*

Sebaliknya, jika *WMS* menggunakan *PDA* proses penerimaan dapat dilakukan lebih cepat dan akurat karena setiap item langsung terdata secara *real time* ke dalam sistem persediaan dengan melakukan *scan barcode* barang dengan mengisi jumlah barang bongkar dan *expired* barang. Berikut Gambar 2 yang menjelaskan terkait urutan *WMS* menggunkan *PDA*.



Gambar 2. Urutan *WMS* Menggunakan *PDA* Proses *Receiving*

Berikut waktu proses *receiving* dan produktivitas kerja dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2 :

Tabel 1. *Process Time* Pembongkaran Truk

No	Aktivitas	*WMS* Tanpa *PDA*	*WMS* dengan *PDA*
		Menit/*SKU*	Menit/*SKU*
1	Membongkar Truk	1,5	1,5
2	Pemeriksaan Fisik	1,0	0,5 *(scan)*
3	Pemeriksaan Dokumen	1,0	0,5 *(scan)*
4	Pencatatan	1,0	0,1 (otomatis)
	Total Waktu Proses	4,5	2,6

Perhitungan total waktu dibutuhkan dalam proses *receiving* semakin cepat dengan efisiensi sebesar 42%. Dengan digitalisasi efisiensi aktivitas pemeriksaan fisik dan pemeriksaan dokumen sama mengalami 50% lebih cepat dan penggunaan *PDA* paling berdampak signifikan mencapai 90% pada aktivitas pencatatan. Namun pekerjaan fisik tidak mengalami perubahan waktu tetap sama.

Tabel 2. Perbandingan Proses *Receiving* antara Proses *WMS* tanpa *PDA* dan *WMS* Menggunakan *PDA*

No	Tahapan	*WMS* Tanpa *PDA*	*WMS* dengan *PDA*	Peningkatan
1	Waktu Per Truk	135 menit	78 menit	42%
2	Waktu Per *SKU*	4,5 menit	2,6 menit	63%
3	Produktivitas	3,33 *SKU*/jam-org	5,76 *SKU*/jam-org	43%
4	Akurasi Pencatatan	Rentan *Human Error*	*Real Time* & Akurat	v
5	Update Stok	Lambat	Otomatis & Cepat	v

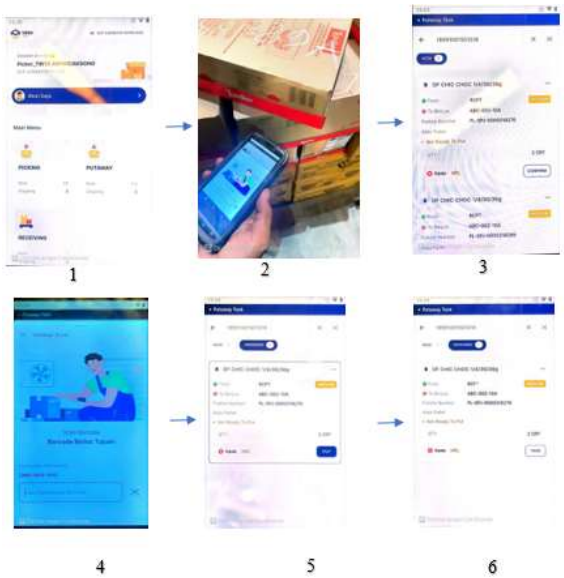
Implementasi *WMS* menggunakan *PDA* proses *receiving* menjadi 1,7 x lebih cepat, produktivitas meningkat dari 3,33 ke 5,76 *SKU*/jam-orang, akurasi data lebih tinggi, risiko kesalahan lebih rendah dan integrasi langsung ke sistem stok/ inventori.

Put Away dan *Storage*

Put away adalah proses pemindahan barang dari area penerimaan *(receiving area)* ke lokasi penyimpanan yang telah ditentukan dalam gudang. Tujuan utamanya adalah memastikan barang ditempatkan dengan rapi, mudah diakses, dan efisien secara ruang dan waktu. Sedangkan *storage* adalah kondisi atau aktivitas penyimpanan barang dalam

 ISSN 2987-677x

jangka waktu tertentu di lokasi gudang. Proses ini terjadi setelah aktivitas *put away* selesai. *Storage* bertujuan menjaga kondisi barang agar siap saat dibutuhkan, baik untuk proses produksi maupun pengiriman. Berikut Gambar 3 yang menjelaskan terkait urutan put away *WMS* menggunkan *PDA*.



Gambar 3. Urutan *WMS* Menggunakan *PDA* Proses *Put Away dan Storage*

Berikut waktu proses *put away storage* dan produktivitas kerja dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4:

Tabel 3. *Process Time Put Away* dan *Storage*

No	Aktivitas	*WMS* Tanpa *PDA*	*WMS* dengan *PDA*
		Menit/*SKU*	Menit/*SKU*
1	Mencari lokasi simpan	1,0	0,1 *(scan)*
2	Perjalanan ke lokasi simpan	1,0	1,0
3	Penempatan Barang	2,0	2,0
4	Pencatatan lokasi dan stok	1,5	0,3 (otomatis)
Total Waktu Proses		5,5	3,4

Perhitungan dalam total waktu yang dibutuhkan proses *put away* dan *storage* semakin cepat dengan efisiensi waktu sebesar 38%. Efisiensi tertinggi ditemukan pada proses mencari lokasi simpan sebesar 90% dan pencatatan barang sebesar. Hal ini dikarenakan sistem *PDA* menghilangkan proses manual dan menggantinya dengan fitur *scan* serta otomatisasi data. Meskipun waktu fisik perjalanan lokasi simpan dan penempatan barang tetap sama.

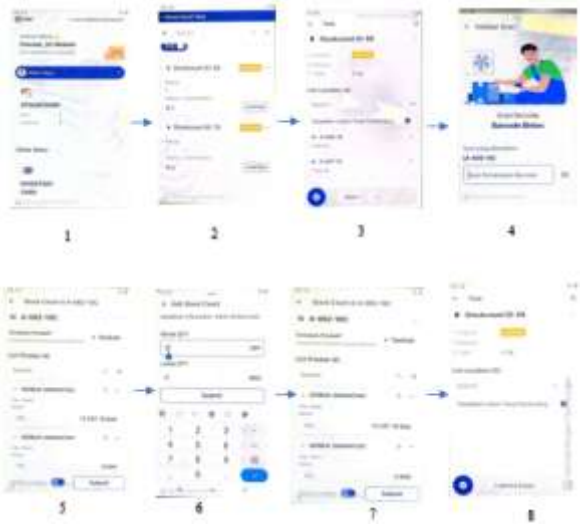
Tabel 4. Perbandingan Proses *Put Away* dan *Storage* antara Proses *WMS* Tanpa *PDA* dan *WMS* Menggunakan *PDA*

No	Tahapan	*WMS* Tanpa *PDA*	*WMS* dengan *PDA*	Peningkatan
1	Waktu Per Truk	165 menit	102 menit	42%
2	Waktu Per *SKU*	5,5 menit	3,4 menit	42%
3	Produktivitas	5,45 *SKU* /jam-org	8,82 *SKU* /jam-org	42%
4	Penempatan Lokasi	manual dan acak	otomatis dan cepat	v
5	Update Stok	lambat	*real time*	v

Implementasi *WMS* menggunakan *PDA* proses *put away* menjadi 1,6 x lebih cepat, produktivitas meningkat dari 5,45 ke 8,82 *SKU*/jam-orang, waktu penyimpanan stok ke lokasi lebih optimal, pencatatan dan data persedian lebih *real time* dan akurat.

Inventory Record Accuracy (IRA)

IRA adalah perhitungan persentase dari jumlah persediaan sistem dengan jumlah persedian yang ada di gudang. Nilai *IRA* semakin mendekati 100%, maka semakin baik. Pentingnya *IRA* untuk kelancaran operasional dengan menghindari *stock out*. Tentunya dalam *cycle counting* (penghitungan siklus) untuk memverifikasi keakuratan secara berkala tanpa harus menghentikan operasional gudang sepenuhnya. Setiap hari item yang dilakukan *IRA* berbeda dengan terjadwal di *ERP*. Siklus perhitungan *IRA*. Proses untuk melakukan *IRA WMS* menggunakan PDA urutan proses dapat di jelaskan pada Gambar 4.



Gambar 4. Urutan *WMS* Menggunakan *PDA* Proses *IRA*

Berikut waktu proses *IRA* dan produktivitas kerja dapat dilihat pada Tabel 5 dan Tabel 6 :

Tabel 5. *Process Time IRA*

No	Aktivitas	*WMS* Tanpa *PDA*	*WMS* dengan *PDA*
		Menit/BinLoc	Menit/BinLoc
1	Mencari lokasi	0,5	0,5
2	Perhitungan Stok	1,0	1,5 *(scan)*
3	Pencatatan lokasi dan stok	0,5	0,3 (scan)
Total Waktu Proses		2,0	2,3

Secara keseluruhan, penggunaan *PDA* pada proses ini mengakibatkan perlambatan sebesar 15%. Meskipun pencatatan menjadi lebih cepat efisiensi 40%, namun proses perhitungan stok justru membengkak waktunya sebesar 50%. Hal ini terjadi karena proses *scanning* setiap barang satu per satu memakan waktu lebih lama dibandingkan penghitungan manual dalam jumlah besar sekaligus, meskipun secara data penggunaan *PDA* biasanya jauh lebih akurat.

Tabel 6. Perbandingan Proses *IRA* antara Proses *WMS* Tanpa *PDA* dan *WMS* Menggunakan *PDA*

No	Tahapan	*WMS* Tanpa *PDA*	*WMS* dengan *PDA*	Peningkatan
1	Waktu Per BinLoc	90 menit	103,5 menit	-15%
2	Waktu Per BinLoc	2,0 menit	2,3 menit	-15%
3	Produktivitas	30 BinLoc/jam-org	26 BinLoc/jam-org	-15%
4	Akurasi Pencatatan	Rentan *Human Error*	*Real Time* & Akurat	v
5	Update Stok	Lambat	Otomatis dan cepat	v

 ISSN 2987-677x

Implementasi *WMS* menggunakan *PDA* proses *IRA* tidak mengalami peningkatan secara kecepatan 0,8 x lebih lambat, produktivitas menurun dari 30 ke 26 *BinLoc*/jam-orang, akurasi pencatatan beralih dari sistem yang rentan *human error* menjadi *real time* dan akurat. *Update* stok dari yang sebelumnya lambat menjadi otomatis dan cepat.

Picking

Kegiatan *picking* merupakan bagian dari proses pengambilan barang yang dilakukan di area penyimpanan gudang, Proses ini dimulai dengan staf *warehouse* menerima daftar *picking* atau instruksi kerja. Staf *warehouse* kemudian menuju lokasi sesuai dengan alamat lokasi penyimpanan yang telah ditentukan. Staf *warehouse* mengambil barang sesuai kuantitas dan jenis yang dibutuhkan, kemudian melakukan *scanning barcode* atau label untuk memastikan keakuratan *picking*. Setelah itu, barang dikumpulkan ke dalam palet sesuai rute distribusi selanjutnya.



Gambar 5. *Pick Task Management WMS*



Gambar 6. *Pick List*

Proses untuk melakukan *Picking* dengan *WMS* menggunakan *PDA* urutan proses dapat dijelaskan pada Gambar 7.



Gambar 7. Urutan *WMS* Menggunakan *PDA* Proses *Picking*

Berikut waktu proses *IRA* dan produktivitas kerja dapat dilihat pada Tabel 7 dan Tabel 8 :

Tabel 7. *Process Time Picking*

No	Aktivitas	*WMS* Tanpa *PDA*	*WMS* dengan *PDA*
		Menit/*SKU*	Menit/*SKU*
1	Mencari lokasi	1,0	1,0
2	Perjalanan ke lokasi simpan	1,0	1,0
3	Pengambilan dan verifikasi	1,0	0,5 *(scan)*
4	Pencatatan dan hasil *picking*	1,0	0,2 (otomatis)
Total Waktu Proses		4,0	2,7

Secara keseluruhan, proses *picking* menjadi 32% lebih cepat dengan *PDA*. Keunggulan utamanya terletak pada Pencatatan otomatis dengan efisiensi sebesar 80% dan Verifikasi cepat via scan efisiensi sebesar sebesar 50%. Aktivitas fisik seperti mencari lokasi dan berjalan tetap sama karena *PDA* hanya mengoptimalkan alur informasi, bukan kecepatan gerak fisik staf *warehouse*.

Tabel 8. Perbandingan Proses *Picking* antara Proses *WMS* Tanpa *PDA* dan *WMS* Menggunakan *PDA*

No	Tahapan	*WMS* Tanpa *PDA*	*WMS* dengan *PDA*	Peningkatan
1	Waktu Per *SKU*	4,0 menit	2,7 menit	33%
2	Waktu Total	2 jam	1,35 jam	33%
3	Produktivitas	5 *SKU* /jam-org	7,4 *SKU* /jam-org	32%
4	Resiko Salah *Picking*	Tinggi	Rendah	v
5	Pencatatan dan pelacakan	Tidak *Real Time*	Otomatis & *Real Time*	v

Implementasi *WMS* menggunakan *PDA* proses *picking* menjadi 1,4 x lebih cepat, produktivitas meningkat dari 5 ke 7,4 *SKU*/jam-orang, resiko salah *picking* lebih kecil, pencatatan dan data stok lebih *real time* dan otomatis.

Delivery Checking

Kegiatan *delivery checking* merupakan bagian dari proses *outbound* sebelum dilakukan serah terima dengan *driver*. Proses dengan melakukan *scan barcode* pada *task* di *picking list* atau *delivery order* untuk di selesaikan. Kemudian melakuakn *scan barcode* pada barang dengan mengecek jenis dan kuantitas sesuai *PDA*. Berikut pada Gambar 8. penjelasan terkait penggunan *PDA* pada proses *checking*.

 ISSN 2987-677x



Gambar 8. Urutan *WMS* Menggunakan *PDA* Proses *Delivery Checking*

Berikut waktu proses *delivery checking* dan produktivitas kerja dapat dilihat pada Tabel 9 dan Tabel 10 :

Tabel 9. *Process Time Delivery Checking*

No	Aktivitas	*WMS* Tanpa *PDA*	*WMS* dengan *PDA*
		Menit/*SKU*	Menit/*SKU*
1	Pemeriksaan Fisik	1,5	0,5 *(scan)*
2	Pemeriksaan Dokumen	1,0	0,5 *(scan)*
3	Pencatatan	1,0	0,3 (otomatis)
4	Menaikan Barang	1,5	1,5
Total Waktu Proses		5,0	2,8

Secara keseluruhan, proses *delivery checking* menjadi 44% lebih cepat dengan *PDA*. Dampak paling masif terasa pada pencatatan dengan efisiensi sebesar 70% dan pemeriksaan fisik sebesar 66% karena sistem manual digantikan oleh *scanning* dan otomatisasi data. Aktivitas fisik menaikkan barang tidak mengalami perubahan waktu.

Tabel 10. Perbandingan Proses *Delivery Checking* antara Proses *WMS* Tanpa *PDA* dan *WMS* Menggunakan *PDA*

No	Tahapan	*WMS* Tanpa *PDA*	*WMS* dengan *PDA*	Peningkatan
1	Waktu Per Truk	150 menit	84 menit	44%
2	Waktu Per *SKU*	5,0 menit	2,8 menit	44%
3	Produktivitas	3 *SKU* /jam-org	5,35 *SKU* /jam-org	91%
4	Akurasi Pencatatan	Rentan *Human Error*	*Real Time* & Akurat	v
5	Update Stok	Lambat	Otomatis & Cepat	v

Implementasi *WMS* menggunakan *PDA* proses *delivery checking* menjadi 1,78 x lebih cepat, produktivitas meningkat dari 3 ke 5,35 *SKU*/jam-orang, akurasi pencatatan *real time* dan akurat dengan *update* stok cepat.

Kesimpulan

Dalam studi kasus ini dari hasil analisa permasalahan dan pembahasan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagi berikut :

1. Transformasi Operasional: Implementasi *WMS* menggunakan *PDA* berhasil mengubah alur kerja dari sistem manual berbasis kertas menjadi sistem digital *real time*. Hal ini meminimalisir intervensi admin *WMS* dalam proses *update* data, sehingga data stok di sistem selalu sinkron dengan kondisi fisik di lapangan.
2. Peningkatan Efisiensi: Penggunaan *PDA* terbukti meningkatkan produktivitas secara signifikan pada seluruh lini proses *(Inbound, Put Away, Picking, dan Checking Delivery)*. Selain itu, sistem ini berhasil mengatasi kendala ketidaksesuaian data melalui fitur pemindaian *(scanning) bin location* yang akurat.
3. Akurasi dan Keandalan : Integrasi antara *PDA, WMS,* dan *ERP* menjamin transparansi data inventaris dengan tingkat *Inventory Record Accuracy (IRA)* yang lebih terjaga serta memastikan logika *FEFO* berjalan optimal sesuai masa kedaluwarsa *(expired)* produk.
4. Aspek Keinsinyuran : Studi ini membuktikan bahwa modernisasi gudang tidak hanya berdampak pada profitabilitas, tetapi juga meningkatkan standar keselamatan kerja (K3L) dengan mengurangi mobilitas manual di area gudang serta mendukung prinsip keberlanjutan *(sustainable development goals)* melalui pengurangan limbah kertas *(paperless)*

Berdasarkan studi kasus dari hasil analisa permasalahan dan pembahasan, terdapat beberapa saran sebagai berikut:

1. Fitur *chat* atau *log activity* internal: Catatan aktivitas yang memungkinkan setiap akun melihat tindakan yang dilakukan akun lain pada satu pesanan untuk memudahkan koordinasi.
2. *Role based* menu dengan tampilan di *PDA*: Berbeda antara akun *Picker, Checker,* dan *Supervisor*. Mempercepat kerja karena staf tidak bingung dengan menu yang tidak mereka butuhkan.
3. *Offline* mode dengan *WMS* yang memiliki fitur *local caching*: Data tetap tersimpan di *PDA* saat sinyal hilang dan otomatis sinkron saat sinyal kembali. Apabila *WMS* hanya bisa digunakan saat *online* saja ketergantungan penuh pada koneksi internet/*Wi-Fi*, gudang memiliki risiko kerentanan yang sangat tinggi dengan efek domino berhentinya operasional *(Total Bottleneck).* Saat sinyal hilang, *picker* tidak bisa melihat lokasi barang dan *loading* tidak bisa memvalidasi pengiriman. Semua proses yang membutuhkan *scan* akan terhenti.

Ucapan Terimakasih

Puji syukur kepada Allah SWT berkat Rahmat, Hidayah, dan Karunia-Nya kepada kita semua sehingga penulis dapat menyelesaikan studi kasus. Karena itu pada kesempatan ini kami ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. (Alm) Bapak Yoni Prakoso dan (Alm) Ibu Roro Suparti, terima kasih telah mengajarkan bahwa pendidikan adalah bekal paling berharga. Walau tidak dapat menemani proses perjuangan ini secara fisik. Doa dan didikan kalian adalah cahaya yang menuntun penulis menyelesaikan studi ini sebagai salah satu bentuk penghormatan terakhir.
2. apt. Sumi Wijaya, S.Si., Ph.D selaku Rektor Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya.

 ISSN 2987-677x

3. Dr. Ir. Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng. selaku Ketua Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya.
4. Ir. Rasional Sitepu, M.Eng., IPU., ASEAN Eng. Selaku Pembimbing studi kasus yang memberikan arahan dan saran selama penulisan studi kasus.
5. Bapak ibu dosen pengajar di Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya.
6. Rekan Program Studi Profesi Insinyur Tahun Ajaran Genap 2025/2026 jalur Rekognisi Pembelajaran Lampau.
7. Rekan *warehouse* distributor yang membantu dalam pengumpulan data studi kasus.
8. Pihak–pihak lain yang terkait dan tidak dapat di sebutkan satu per satu yang telah membantu kelancaran studi kasus ini.

Referensi

Aisyah, S. (2025). Peran kejujuran dan transparansi dalam meningkatkan integritas bisnis syariah. *Al-A'mal: Jurnal Manajemen Bisnis Syariah, 2*(1).

Basuki, A., Hutahaean, A., & Hotma, H. (2025). Implementasi *Warehouse Management System (WMS)* untuk meningkatkan kinerja *warehouse*. *Jurnal Praktik Keinsinyuran, 2*(3).

Fridolin, H. (2023). Mengenal Revolusi Industri 5.0. *Artikel KPKNL Lahat*.

Prasetya, P., Paulus, P., & Djoko, D. (2025). Implementasi pemanfaatan *Warehouse Management System* pada pengiriman tepung terigu PT Sriboga Flour Mill Semarang. *Jurnal IKRAITH-EKONOMIKA*.

Syahroyyana, S., & Kostinia, N. (2025). Implementasi *Warehouse Management System* pada PT XYZ. *Jurnal Logistik, 18*(1).

 ISSN 2987-677x

Rancang Bangun Sistem *Monitoring* Pemeliharaan Terpadu KRI di Koarmada II

Zainal Syahlan[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2] Program Studi Diploma 3 Teknik Informatika, Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut Surabaya

✉ zsyahlan@gmail.com

Kesiapan operasional Kapal Republik Indonesia (KRI) di Koarmada II sangat ditentukan oleh efektivitas sistem pemeliharaan yang berjalan secara berkelanjutan. Namun, pelaksanaan pemantauan yang masih bersifat manual kerap menimbulkan berbagai permasalahan, seperti ketidaktepatan data, keterlambatan pelaporan, dan lemahnya koordinasi antarunit. Untuk menjawab permasalahan tersebut, penelitian ini merancang dan membangun Sistem *Monitoring* Pemeliharaan Terpadu KRI di Koarmada II guna meningkatkan efisiensi, akurasi, dan integrasi informasi dalam proses pemeliharaan kapal. Sistem dikembangkan menggunakan metode *Waterfall* melalui tahapan analisis kebutuhan, desain, implementasi, dan pengujian, serta memanfaatkan database MySQL untuk mengelola data identitas kapal, riwayat kegiatan, status pemeliharaan, dan hasil evaluasi. Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem telah berhasil dibangun dan dapat digunakan untuk memonitor jadwal pemeliharaan, mencatat kegiatan perbaikan, mengevaluasi hasil pemeliharaan, serta mengelola pelaporan secara sistematis dan terintegrasi. Pengujian menunjukkan sistem telah sesuai dengan kebutuhan operasional di lingkungan Koarmada II serta mampu meningkatkan efisiensi dan efektivitas kerja. Dengan demikian, sistem ini dapat menjadi solusi digital yang mendukung perencanaan dan pelaksanaan pemeliharaan alutsista secara lebih tertata dan terdokumentasi dengan baik.

Kata kunci: *Monitoring* Pemeliharaan, KRI, Koarmada II, Sistem *Monitoring*, *Waterfall*, MySQL, Kesiapan Operasional

Pendahuluan

TNI Angkatan Laut adalah bagian dari Tentara Nasional Indonesia (TNI) yang bertanggung jawab atas operasi pertahanan negara Republik Indonesia di laut. TNI AL merupakan salah satu komponen utama pertahanan negara yang memiliki peran strategis dalam menjaga kedaulatan wilayah perairan dan yurisdiksi maritim Indonesia (Sumarsono et al., 2024). Indonesia menghadapi tantangan kompleks dalam menjaga keamanan laut yang meliputi pengawasan perairan, penanggulangan ancaman maritim, serta pemeliharaan stabilitas regional dan internasional (Novilandhi et al., 2024). TNI AL memiliki tanggung jawab besar dalam menjaga kedaulatan dan keamanan perairan Nusantara, yang diwujudkan melalui pengoperasian Kapal Perang Republik Indonesia (KRI) sebagai elemen utama kekuatan laut. Agar KRI dapat beroperasi secara optimal dan memenuhi standar kesiapan tempur, kegiatan pemeliharaan dan perbaikan (harkan) menjadi aspek yang sangat penting (Azhari et al., 2024). Pemeliharaan KRI mencakup berbagai aktivitas untuk memastikan setiap komponen kapal tetap berfungsi dengan baik dan sesuai dengan spesifikasi teknis yang ditetapkan (Ansar et al., 2024).

Biro Sistem Pemeliharaan Terencana (SPT) merupakan salah satu Badan Pelaksana Pusat di lingkungan TNI AL yang bertanggung jawab langsung kepada Kepala Staf Angkatan Laut. Tugas utama Biro SPT mencakup pemutakhiran dan pengamanan dokumen pemeliharaan, pengelolaan administrasi dokumen SPT, pendistribusian serta pengarsipan Kartu Pemeliharaan (KP), serta memberikan evaluasi dan masukan terkait pelaksanaan pemeliharaan (Ardhi et al., 2018). Pelaksanaan SPT melibatkan berbagai dinas dan satuan kerja di lingkungan TNI AL, sehingga memerlukan koordinasi yang terpadu, kesadaran penuh, dan tanggung jawab yang tinggi dari semua pihak terkait untuk memastikan efektivitas dan efisiensi kegiatan pemeliharaan sesuai dengan standar yang ditetapkan (Widhi & Uchida, 2024).

Berdasarkan Keputusan Kasal Nomor Kep/1052/VI/2015 tentang Buku Petunjuk Teknis Sistem Pemeliharaan Terencana di Lingkungan TNI-AL, tujuan dari SPT (Sistem Pemeliharaan Terencana) adalah untuk memastikan bahwa peralatan, mesin, atau materiil yang lainnya tetap beroperasi secara optimal dan untuk mencegah terjadinya kerusakan yang pada dasarnya keberhasilan suatu operasi laut ditentukan kesiapan teknis materiil alat utama dan kesiapan personel yang mengawaki materiil tersebut. Kesiapan material alat utama sangat tergantung dari dukungan pemeliharaan, bekal dan fasilitas sedangkan kesiapan tergantung kepada pendidikan dan pelatihan (Asisten

 ISSN 2987-677x

Logistik Mabesal, 2015). SPT kapal adalah satu sub sistem dari Sistem Dukungan Logistik Terpadu (SDLT) TNI Angkatan Laut dan berperan dalarn kesiapan operasional kapal. Keberhasilan SPT kapal sangat tergantung kepada pembinaan sumber daya yang dimiliki oleh TNI AL. Keberhasilan penyelenggaraan SPT *platform* kapal diperlukan suatu kegiatan yang terpadu dan melibatkan seluruh organisasi di lingkungan TNI AL guna mendukung kesiapan operasional kapal TNI AL setiap saat.

Permasalahan yang terjadi di Biro SPT pada saat ini. Pertama, pemeliharaan yang tidak terpantau dengan baik sehingga mengakibatkan atau terlambat dilakukan yang dapat mengakibatkan kerusakan pada sistem dan komponen KRI yang dapat mengganggu kesiapan operasional kapal. Kedua, keterbatasan informasi yang akurat dan terbaru karena tanpa sistem yang dapat menyimpan dan memperbarui informasi, Biro SPT sering kali kesulitan untuk mendapatkan data akurat mengenai status pemeliharaan kapal dan hal ini dapat mempengaruhi pengambilan keputusan yang tepat waktu dan tepat sasaran, Ketiga, kurangnya informasi pemeliharaan yang terdokumentasi baik, tanpa sistem yang terintegrasi, sulit untuk melacak riwayat pemeliharaan suatu KRI. Keempat belum adanya sistem yang memfasilitasi komandan KRI untuk melakukan evaluasi dan rekomendasi tindak lanjut dari pemeliharaan yang sudah dilaksanakan.

Biro SPT saat ini sudah melaksankan berbagai upaya dalam pelaksaan pemeliharaan dan masih memiliki keterbatasan yang berdampak pada efisiensi dan kelancaran pada pelaksanaan pemeliharaan. Pertama, pencatatan kegiatan pemeliharaan KRI masih dilakukan secara manual dengan dokumen fisik. Upaya ini rentan terhadap kesalahan manusia dalam pencatatan, kehilangan dokumen, serta ketidakteraturan dalam pemeliharaan yang terlaksana. Kedua, Biro SPT saat ini tidak dapat memonitor secara langsung apakah pemeliharaan telah terlaksana sesuai dengan jadwal atau tidak, karena sistem yang ada masih bergantung pada laporan manual yang dikirimkan setelah kegiatan dilakukan.

Hal ini menyebabkan kesulitan dalam memastikan apakah pemeliharaan telah dilaksanakan atau terlambat dilaksanakan. Ketiga, riwayat pemeliharaan yang tercatat secara manual sulit untuk diakses dan diperbaharui, menyulitkan dalam melacak kondisi setiap kapal dan membuat keputusan terkait pemeliharaan mendatang. Keempat, pelaporan terkait pemeliharaan KRI masih dilakukan secara manual, yang memakan waktu dan rentan terhadap kesalahan pengolahan data. Meskipun telah membantu dalam pengelolaan pemeliharaan, masih terdapat kebutuhan sistem untuk meningkatkan efisiensi dan ketepatan waktu dalam monitoring pemeliharaan KRI. Sistem ini akan memuat beberapa fitur penting yang mencakup:

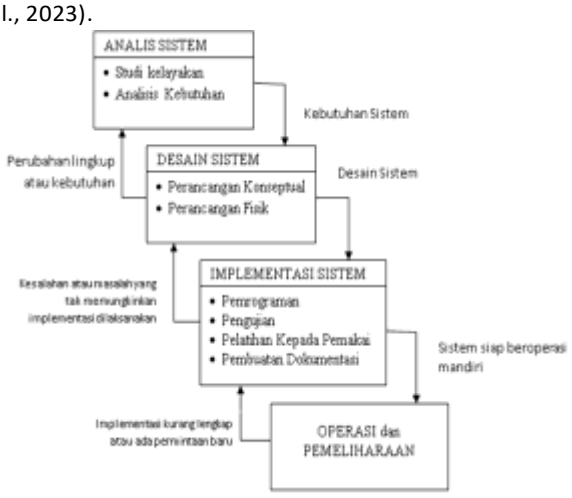
a. Menyimpan informasi rinci tentang komponen dan sistem yang ada di kapal, termasuk kondisi dan riwayat pemeliharaan.
b. Pemantauan pelaksanaan pemeliharaan yang sudah terjadwal sesuai dengan rencana agar pelaksanaan pemeliharaan bisa dilakukan tepat waktu.
c. Evaluasi yang dilakukan oleh Komandan KRI tentang pelaksanaan pemeliharaan yang menjadi tindak lanjut dari pemeliharaan yang sudah dilaksanakan

Hasil yang diharapkan dari sistem ini mencakup berbagai aspek yang dapat memberikan dampak positif. Pertama, sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dalam pemantauan kegiatan dan evaluasi pemeliharaan. Dengan sistem *monitoring* yang terpusat, pemantauan pemeliharaan dapat laksanakan secara tepat, sehingga mengurangi *downtime* kapal karena pemeliharaan yang tertunda atau tidak terpantau. Ketiga, pemantauan pemeliharaan yang berkelanjutan yang dapat membantu mendeteksi potensi masalah sejak dini. Hal ini akan mencegah kerusakan besar yang terjadi akibat pemeliharaan yang tidak terpantau atau terlambat, sehingga mengurangi kebutuhan perbaikan darurat yang memakan waktu dan biaya. Keempat, sistem ini diharapkan dapat memastikan kapal tetap berada dalam kondisi optimal dengan adanya jadwal pemeliharaan yang selalu terpantau, ini penting untuk menjaga agar kapal selalu siap beroperasi dengan performa terbaik dan meningkatkan keselamatan serta kelaikan operasional. Sistem ini mampu menyusun laporan dan memberikan peringatan terkait jadwal pemeliharaan yang mendekati atau telah terlewat, serta memberikan informasi mengenai kondisi peralatan dan kebutuhan pemeliharaan yang spesifik.

Metode

1. Desain Penelitian

Rancangan penelitian ini penulis berlandaskan menggunakan metode tahapan *waterfall* untuk membangun aplikasi ini (Ramadha et al., 2024; Sallu et al., 2023).

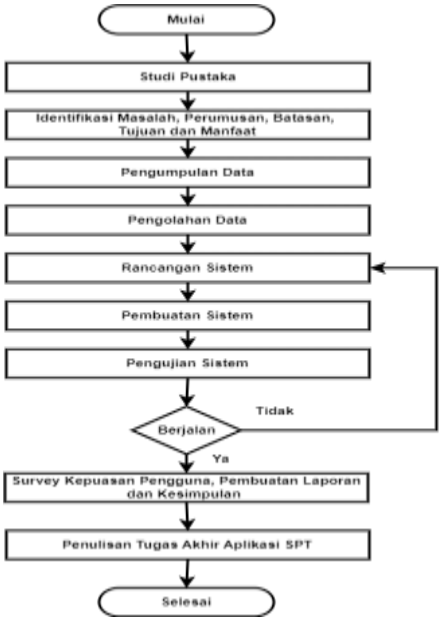


Gambar 1. Metode *Waterfall*

 ISSN 2987-677x

2. Prosedur Penelitian

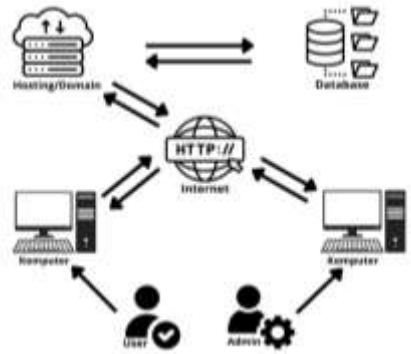
Proses penelitian yang dilaksanakan, mulai dari diagram sistem kerja rancangan hingga masukkan (*input*) serta keluaran (*output*) sistem yang menghasilkan informasi yang diharapkan.



Gambar 2. *Flowchart* Prosedur Penelitian

3. Rancangan Umum

Dalam perancangan sistem ini dapat memberikan gambaran umum tentang sistem yang dibuat

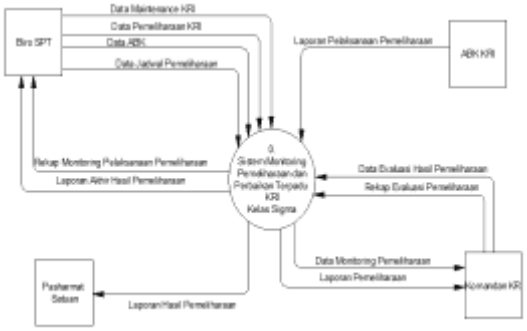


Gambar 3. Rancangan Umum Sistem

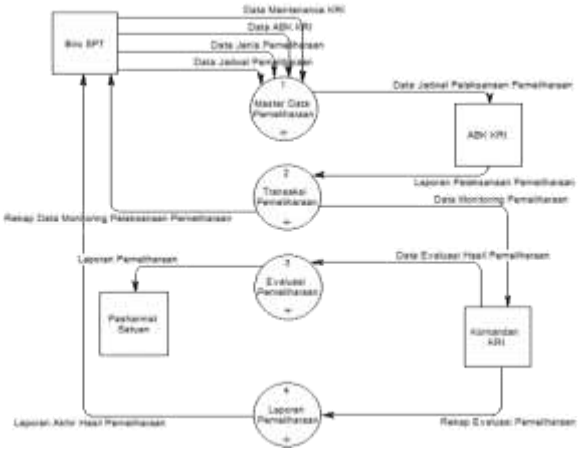
4. Diagram Konteks

Diagram konteks adalah gambaran cara kerja dalam suatu sistem secara umum dan menjelaskan konteks dari prosedur yang ada pada sistem. Diagram konteks juga digunakan untuk menetapkan batasan-batasan sistem pada sebuah pemodelan dan konteks merupakan level tertinggi dari diagram aliran data yang menggambarkan seluruh *input* ke sistem atau *output* dari sistem, serta memberi gambaran keseluruhan sistem, termasuk entitas, masukan, dan keluaran yang terkait dengan sistem yang dirancang.

Diagram konteks memperlihatkan sistem sebagai sebuah kotak tunggal, dengan entitas luar yang berinteraksi dengan sistem melalui *input* dan menerima *output* dari sistem.



Gambar 4. Konteks Diagram



Gambar 5. Data *Flow Diagram Level* 0

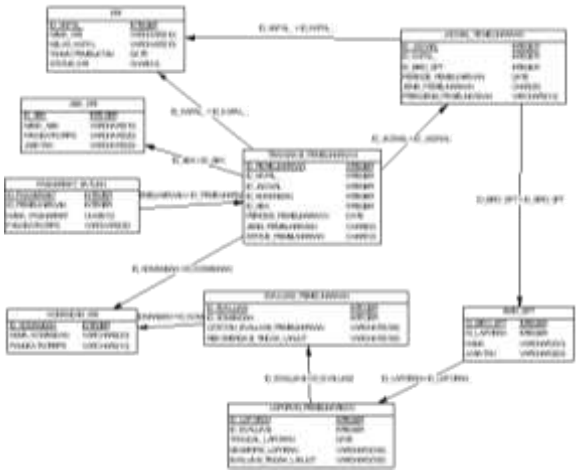
5. ERD: CDM - PDM

Merupakan representasi konseptual dari hubungan antara entitas-entitas utama dalam suatu sistem informasi. digunakan untuk memvisualisasikan dan menggambarkan bagaimana entitas-entitas tersebut saling berhubungan dan berinteraksi dalam basis data, model ini berfungsi sebagai kerangka awal untuk memahami kebutuhan data dalam sistem *monitoring* penjadwalan pemeliharaan KRI yang bertujuan memberikan gambaran umum tentang struktur data yang diperlukan, memastikan semua kebutuhan informasi dari aktor.



Gambar 6. *Conceptual Data Model*

 ISSN 2987-677x



Gambar 7. *Physical Data Model*

6. Pengujian Sistem

Pengujian sistem bertujuan untuk menemukan dan memperbaiki kesalahan (*bug*) sebelum sistem digunakan secara resmi oleh pengguna akhir. *Black box testing* adalah pengujian perangkat lunak dari segi spesifikasi fungsional tanpa menguji kode atau sisi internal programnya. Artinya, hanya sisi fungsi, antarmuka, dan alurnya saja yang diuji tanpa menyentuh kode atau *script* dari perangkat lunak. *Black box testing* memiliki ciri unik yang dapat membedakannya dari jenis pengujian lain. Ciri-ciri dari *black box testing* adalah sebagai berikut:

a. *Black box testing* berfokus pada kebutuhan fungsional pada *software*, berdasarkan pada spesifikasi kebutuhan dari *software*.
b. *Black box testing* bukan teknik alternatif daripada *white box testing*. Lebih dari pada itu, ia merupakan pendekatan pelengkap dalam mencakup *error* dengan kelas yang berbeda dari metode *white box testing.*
c. *Black box testing* melakukan pengujian tanpa pengetahuan detil struktur internal dari sistem atau komponen yang dites. juga disebut sebagai *behavioral testing, specification-based testing, input/output testing* atau *functional testing*.

Hasil Kerja

Penguraian dari suatu sistem informasi yang utuh ke dalam bagian-bagian komponennya dengan maksud untuk mengidentifikasikan dan mengevaluasi permasalahan sehingga dapat diusulkan perbaikannya. Analisis sistem secara sistematis menilai bagaimana fungsi dengan cara mengamati proses *input* dan data proses *output* informasi untuk membantu peningkatan proses organisasional (Rusli Muhidin, 2017).

1. Rancangan Aplikasi Desktop

Perancangan sistem perlu dilakukan analisa sistem terlebih dahulu untuk menjelaskan rancangan berdasarkan kebutuhan sistem yang dibuat sehingga tujuan pembuatan sistem dapat tercapai. Perancangan aplikasi desktop merupakan tahap dalam pengembangan sistem yang bertujuan untuk merancang struktur, antarmuka, dan mekanisme kerja aplikasi sebelum tahap implementasi.

2. Rancangan Desain Halaman



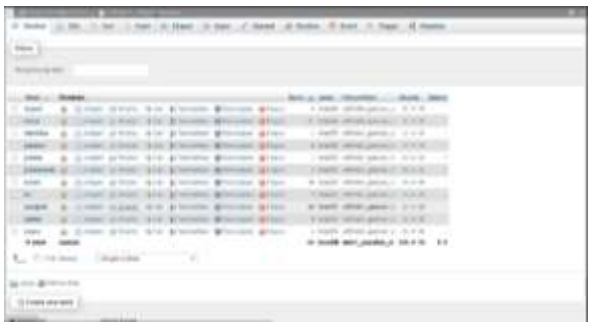
Gambar 8. Rancangan Halaman *Login*



Gambar 9. Rancangan Halaman *Dashboard*

3. Implementasi Basis Data

Basis data adalah kumpulan informasi yang disimpan di dalam komputer secara sistematik sehingga dapat diperiksa menggunakan suatu program komputer untuk memperoleh informasi dari basis data. Pengolahan *database* bertujuan untuk memudahkan operasional sistem. Setiap jenis data yang dikumpulkan akan mengikuti format yang telah ditentukan sesuai dengan kebutuhannya, kemudian di-*input* ke dalam tabel yang relevan, proses ini mencakup tahapan dari input data hingga pengolahan data untuk menghasilkan *output* yang diharapkan.



Gambar 10. Implementasi Basis Data

4. Implementasi Aplikasi *Desktop*

Implementasi aplikasi *desktop* ini merupakan penerapan sistem yang telah dirancang dengan menggunakan bahasa pemrograman PHP yang

 ISSN 2987-677x

terintegrasi dengan *database* sehingga dapat menampilkan informasi yang dibutuhkan. Implementasi pada sistem ini menampilkan implementasi pembuatan *database*, halaman *login*, halaman pengguna, halaman master data, halaman *monitoring,* dan halaman evaluasi.



Gambar 11. Implementasi Tampilan *Login*



Gambar 12. Implementasi Tampilan *Dashboard*

5. Sistem *Input Output*

Sistem *input* dan *output* data merupakan komponen yang sangat penting di dalam implementasi sistem *monitoring* pemeliharaan terpadu KRI di Koarmada II. Sistem *input* dan *output* akan sangat menentukan bagaimana data yang dibutuhkan sistem dapat diolah dan menghasilkan informasi yang diharapkan. Sistem *input* dan *output* diterapkan pada halaman admin dan halaman pengguna.

Administrator membutuhkan sistem *input* dan *output* untuk membangun master data. Pengguna membutuhkan sistem *input* dan *output* untuk melakukan mekanisme dalam *monitoring* dan evaluasi pemeliharaan. Administrator memiliki kewenangan untuk menambahkan pengguna baru, KRI, departemen, dan divisi sesuai dengan struktur organisasi dan kebutuhan operasional KRI di lingkungan Koarmada II.

Pengguna sistem informasi *monitoring* pemeliharaan terpadu KRI di Koarmada II terdiri dari personel TNI AL dengan tanggung jawab yang berbeda seperti biro SPT, komandan KRI, Pasharmat, dan ABK KRI. Untuk mendukung pelaksanaan pemeliharaan secara terstruktur dan diperlukan sistem *input* dan *output* data KRI yang disesuaikan dengan karakteristik kapal perang (KRI) yang dikelola dalam lingkungan Koarmada II.



Gambar 13. *Input* Data Pengguna



Gambar 14. *Output* Data Pengguna



Gambar 15. *Input* Data KRI



Gambar 16. *Output* Data KRI



Gambar 17. *Input* Data Departemen

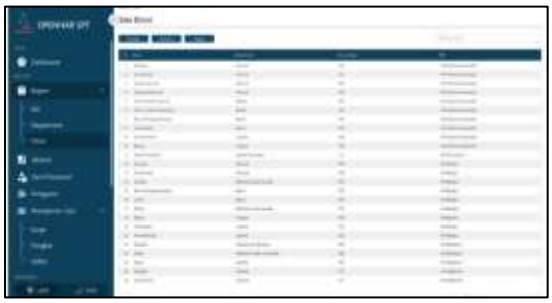
 ISSN 2987-677x



Gambar 18. *Output* Data Departemen



Gambar 19. *Input* Data Divisi



Gambar 20. *Output* Data Divisi

Dalam *fitur input* Data Kerja ABK merupakan bagian dari sistem *monitoring* detail jadwal pemeliharaan yang dirancang untuk mendokumentasikan kegiatan pekerjaan pemeliharaan yang telah dilaksanakan oleh ABK KRI. Dalam pengisian data dilakukan berdasarkan jadwal pemeliharaan yang telah ditentukan sebelumnya oleh administrator atau staf biro SPT. Data yang di-*input* meliputi tanggal pelaksanaan pemeliharaan, status pekerjaan, serta deskripsi terkait pelaksanaan pemeliharaan.



Gambar 21. *Input* Data Pekerjaan Pemeliharaan



Gambar 22. *Output* Data Pekerjaan Pemeliharaan

Sistem *input* dan *output* pada *login* Komandan dirancang sebagai bagian akhir dari proses *monitoring* pemeliharaan, yang berfungsi untuk melakukan validasi, evaluasi, dan pemberian rekomendasi tindak lanjut terhadap pelaksanaan kegiatan pemeliharaan yang telah dilaporkan oleh ABK KRI. Komandan memiliki akses untuk melakukan *input* evaluasi terhadap hasil pemeliharaan pada kolom Evaluasi Pemeliharaan, serta memberikan rekomendasi sebagai tindak lanjut bila diperlukan.



Gambar 23. *Input* Validasi Pemeliharaan



Gambar 24. *Output* Validasi Pemeliharaan

Dalam mekanisme pelaksanaan *monitoring* dan evaluasi kegiatan pemeliharaan pada KRI, diperlukan adanya pertanggungjawaban terhadap pelaksanaan pekerjaan yang telah dilakukan oleh personel. Setelah tahapan pelaksanaan pemeliharaan sistem ini menyediakan fasilitas *menu* laporan yang dapat diakses oleh Administrator. *Menu* ini berfungsi untuk merekapitulasi seluruh aktivitas pemeliharaan yang telah dilaksanakan yang divalidasi dan dievaluasi sehingga menghasilkan dokumentasi yang utuh dan akurat, sehingga memudahkan proses pengarsipan, pelaporan kepada atasan, maupun tindak lanjut administrasi lainnya.

 ISSN 2987-677x



Gambar 25. *Input* Laporan Pemeliharaan



Gambar 26. *Output* Laporan Pemeliharaan

6. Hasil dan Pembahasan

Hasil dan pembahasan dari penelitian terhadap Rancang Bangun Sistem *Monitoring* Pemeliharaan Terpadu KRI di Koarmada II dilakukan setelah melaksanakan pengujian sistem secara menyeluruh. Pengujian dilakukan melalui wawancara menggunakan metode UAT (*User Acceptance Test*) terhadap pengguna sistem, yaitu personel pemegang fungsi pemeliharaan dan perbaikan. Berdasarkan hasil pengujian, tanggapan dari petugas lapangan menunjukkan bahwa sistem telah berjalan dengan baik sesuai dengan kebutuhan. Seluruh fitur utama seperti memonitor jadwal pemeliharaan, mencatat kegiatan perbaikan, mengevaluasi pemeliharaan serta mengelola laporan pemeliharaan berfungsi sebagaimana mestinya.

Hasil dari metode UAT menunjukkan bahwa mayoritas pengguna memberikan penilaian pada kategori sangat sesuai dan sesuai, terutama dalam hal kemudahan penggunaan, kecepatan akses informasi, dan keakuratan laporan yang dihasilkan sistem. Hal ini menunjukkan bahwa sistem telah memenuhi kebutuhan pengguna secara umum dan mampu memberikan keluaran yang sesuai dengan tujuan pengembangan.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan implementasi terhadap Rancang Bangun Sistem Monitoring Pemeliharaan Terpadu KRI di Koarmada II, dapat disimpulkan bahwa:

a. Sistem telah berhasil dibangun dan dapat digunakan untuk memonitor jadwal pemeliharaan, mencatat kegiatan perbaikan, mengevaluasi pemeliharaan, serta mengelola laporan secara sistematis dan terintegrasi di lingkungan Koarmada II.
b. Pengujian terhadap sistem pemeliharaan menunjukkan hasil yang baik, dimana pengguna menyatakan sistem telah sesuai dengan kebutuhan operasional serta mendukung efisiensi dan efektivitas kerja.
c. Sistem ini dapat menjadi solusi digital yang mendukung perencanaan pemeliharaan alutsista secara lebih tertata dan terdokumentasi.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas dukungan, bimbingan, serta fasilitas yang diberikan dalam proses penyelesaian studi kasus keinsinyuran ini. Ucapan terima kasih secara khusus penulis tujukan kepada Dr. Ir. Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng. selaku Ketua Program Studi, serta Dra. Ir. Adriana Anteng Anggorowati, M.Si., IPU., ASEAN ENG. selaku dosen pembimbing, yang telah memberikan arahan dan pembinaan akademis yang sangat berarti selama Semester Genap Tahun Akademik 2025/2026.

Penghargaan dan rasa hormat turut penulis sampaikan kepada Laksamana Muda TNI (Purn) Dr. Mukhlis, S.T., M.M. serta Pgs. Komandan STTAL Laksamana Pertama TNI Ardiansyah, S.T., M.T. atas arahan strategis dan dukungan institusional yang diberikan. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada seluruh rekan di lingkungan TNI Angkatan Laut, khususnya unsur KRI di Koarmada II, atas keterbukaan dalam memberikan akses data investigasi yang menjadi landasan empiris dalam penyusunan studi kasus ini. Selain itu, apresiasi yang tulus diberikan kepada rekan-rekan Perwira STTAL seperjuangan yang telah berkontribusi melalui pertukaran wawasan operasional lapangan yang autentik dan bernilai.

Referensi

Ansar, A. A., Rusman, R., Irawan, S., & Rakka, S. G. A. (2024). Study of the maintenance, certification and operation system of the tug boat Anugerah Lautan 5 on sailing safety. *Jurnal Ilmiah Platax*, *12*(2), 298–312. https://doi.org/10.35800/jip.v12i2.58619

Ardhi, E. W., Nugroho, S., & Pribadi, T. W. (2018). Penerapan teknologi informasi pada sistem pemeliharaan kapal terencana. *11*(1), 1–7.

Azhari, H., Ganap, J. G., & Nisah, F. A. (2024). Analisis perawatan mesin kapal dengan metode Reliability Centered Maintenance (RCM) di PT Jasa Armada Indonesia Tbk. *Industrika : Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, *8*(2), 407–417. https://doi.org/10.37090/indstrk.v8i2.1261

Novilandhi, B., Meideri, A., & Maswir, M. (2024). Keamanan maritim indonesia dalam pembangunan poros maritim dunia. *JIIP - Jurnal Ilmiah Ilmu Pendidikan*, *7*(8), 8464–8469. https://doi.org/10.54371/jiip.v7i8.5764

Ramadha, F. N., Wahyuni, E. D., & Vannes, D. D. (2024). SDLC big bang dan waterfall: Perbandingan Pendekatan dalam

 ISSN 2987-677x

pengembangan perangkat lunak. *Nuansa Informatika*, *18*(2), 41–45. https://doi.org/10.25134/ilkom.v18i2.158

Sallu, S., Harsono, Y., & Fajarianto, O. (2023). Implementation of waterfall method in model development to improve learning quality of computer network courses. *JTP - Jurnal Teknologi Pendidikan*, *25*(3), 496–513. https://doi.org/10.21009/jtp.v25i3.44418

Sumarsono, T., Santoso, W., & Indarto, Y. (2024). Fungsi pangkalan TNI angkatan laut dalam mendukung keamanan maritim indonesia. *JIIP - Jurnal Ilmiah Ilmu Pendidikan*, *7*(9), 11084–11088. https://doi.org/10.54371/jiip.v7i9.5878

Widhi, D., & Uchida, M. (2024). Development of maintenance scheduling model for the safety operational of ship machinery. *Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, *21*(2), 92–101.

 ISSN 2987-677x

Meminimalisir *Cost Overrun* Terhadap Material Struktur Beton Bertulang untuk Proyek Berkelanjutan

Miliani Satiti Handayani[1], Rasional Sitepu[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ miliani.hanny7@gmail.com

✉ rasional@ukwms.ac.id

Proyek konstruksi merupakan suatu rangkaian kegiatan yang berkaitan dengan upaya pembangunan. Pertumbuhan masyarakat dan teknologi yang semakin cepat tentu akan menekan pada banyaknya proyek pembangunan yang terjadi. Proyek pembangunan tersebut tentu tidak terlepas dari bagian penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB). RAB digunakan sebagai pedoman utama untuk mengendalikan biaya proyek agar tidak terjadi *cost overrun*. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi Rencana Anggaran Biaya (RAB) kontrak terhadap realisasi material pada pekerjaan struktur beton bertulang serta memberikan solusi untuk meminimalisir *cost overrun*. Metode yang digunakan adalah analisis kuantitatif dengan membandingkan RAB, RAP, dan realisasi material, serta observasi lapangan untuk mengidentifikasi penyebab utama. Hasil menunjukkan bahwa terjadi pembengkakan biaya akibat kesalahan estimasi awal, ketidaklengkapan dokumen, serta kurangnya kompetensi tim. Rekomendasi solusi meliputi pemilihan jenis kontrak yang tepat, kelengkapan dokumen, peningkatan kompetensi, serta penerapan *Building Information Modeling* (BIM) untuk proyek berkelanjutan.

Kata kunci: RAB, *cost overrun*, proyek konstruksi, proyek berkelanjutan

Pendahuluan

Pertumbuhan masyarakat dan teknologi yang semakin cepat tentu akan menekan pada banyaknya proyek pembangunan yang terjadi. Proyek pembangunan tersebut tentu tidak terlepas dari bagian penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB). Rencana Anggaran Biaya (RAB) adalah perkiraan atau estimasi biaya yang diperlukan untuk setiap item pekerjaan dalam suatu proyek konstruksi, sehingga diperoleh total biaya yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proyek tersebut (Djojowirono, 1984). RAB merupakan komponen penting dalam pengendalian biaya proyek konstruksi. Banyak praktisi dunia konstruksi yang berhasil menjadikan RAB sebagai pedoman utama untuk merencanakan, mengestimasi dan mengendalikan biaya proyek agar tidak terjadi pembengkakan anggaran (*cost overrun*). Namun di sisi lain, banyak kabar yang beredar bahwa masih banyak proyek yang mengalami pembengkakan biaya yang salah satunya disebabkan oleh beberapa faktor internal seperti manajemen yang buruk, kesalahan estimasi, dan perubahan desain. Selain itu, terdapat 4 kelompok yang menjadi faktor dominan terjadinya *cost overrun*, diantaranya yaitu aspek keuangan proyek, material, tenaga kerja, dan kelayakan ekonomi (Remi, 2017). Pada studi kasusnya tersebut, aspek material menjadi faktor dominan dengan urutan kedua setelah aspek keuangan proyek. Namun pada pengelolaan material tersebut tentunya membutuhkan sistem manajemen proyek yang baik.

Selain itu, jenis kontrak konstruksi memiliki pengaruh besar terhadap risiko biaya. Kontrak *lump-sum* cenderung menempatkan risiko pada kontraktor, sedangkan kontrak *unit price* lebih fleksibel terhadap perubahan volume pekerjaan (Sudarmanto et al., 2023). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi RAB terhadap realisasi material dan memberikan rekomendasi solusi pengendalian biaya pada proyek konstruksi. Untuk proyek konstruksi yang sedang berlangsung, perlu untuk dilakukan evaluasi RAB kontrak terhadap sumber daya yang ada dengan meninjau pembengkakan biaya pada setiap item pekerjaannya. Evaluasi ini dimaksudkan untuk mengetahui apakah proyek tersebut mengalami profitabilitas atau bahkan *cost overrun*. Sehingga pada pelaksanaan proyek selanjutknya diharapkan mampu mendeteksi faktor yang mengakibatkan *cost overrun*, dan dapat mencapai suatu tujuan dari proyek konstruksi.

Metode

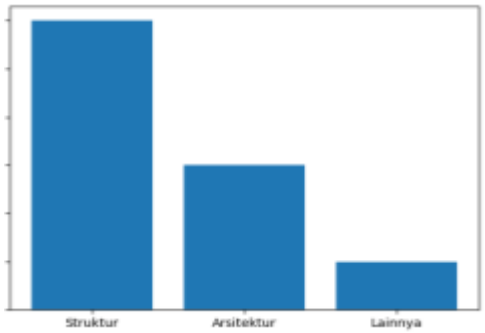
Metode analisis yang digunakan dalam karya ilmiah ini adalah analisis kuantitatif, di mana pendekatan utamanya adalah berfokus pada data numerik (angka) dan menggunakan rumus matematika atau statistik, metode ini digunakan untuk menghasilkan data berupa evaluasi RAB kontrak terhadap material. Sedangkan untuk mengetahui rekomendasi solusi yang digunakan untuk proyek selanjutnya adalah menggunakan metode observasi dengan menganalisis penyebab *cost overrun* pada proyek yang sedang ditinjau.

Hasil Kerja

Analisis *Cost Overrun*

Hasil pengumpulan data menunjukkan bahwa proyek yang sedang ditinjau mengalami *cost overrun*. Dimana pada penelitian ini menunjukkan bahwa jenis pekerjaan struktur beton bertulang menjadi kontribusi terbesar terjadinya *cost overrun*.

 ISSN 2987-677x



Gambar 1. Jenis Pekerjaan dengan *Cost Overrun* Tertinggi

Hal ini dibuktikan dari evaluasi RAB kontrak terhadap realisasi material struktur beton bertulang seperti di bawah ini:

Tabel 1. Evaluasi RAB Kontrak Terhadap Material

NO.	ITEM PEKERJAAN	RAP	RAB KONTRAK	*REMAINING*
Pekerjaan Struktur				
A	**Lantai 1**			
1	Pekerjaan Balok Lt. 1	139,809,233	256,527,873	116,718,640
2	Pekerjaan Plat Lantai Lt. 1	104,608,560	89,210,737	(15,397,823)
3	Pekerjaan Kolom Lt. 1	65,404,710	70,644,286	5,239,576
B	**Lantai 2**			
1	Pekerjaan Balok Lt. 2	91,827,015	108,209,602	16,382,587
2	Pekerjaan Plat Lantai Lt. 2	82,027,470	70,541,931	(11,485,539)
3	Pekerjaan Kolom Lt. 2	69,649,545	68,084,888	(1,564,657)

Rencana Anggaran Pelaksanaan (RAP) pada Tabel 1 di atas baru menunjukkan rencana anggaran pelaksanaan untuk material saja dan belum termasuk ke perhitungan RAP untuk upah pekerja. Dengan penambahan upah pekerja selama penyelesaian pekerjaan tersebut, tentu akan mengalami pembengkakan biaya yang harus segera dicarikan solusinya. Alternatif solusi untuk proyek yang sedang berjalan adalah dengan melakukan subsidi silang, di mana item pekerjaan yang mengalami *cost overrun* tersebut mendapatkan dukungan dari keuangan yang didapatkan pada item pekerjaan lainnya. Dalam kasus ini, pekerjaan struktur beton bertulang mendapatkan dukungan keuangan dari profit pekerjaan arsitektur, yaitu pekerjaan pasangan dinding.

Faktor Penyebab

Setelah dilakukannya observasi terkait *cost overrun* di atas, pembengkakan biaya yang terjadi pada pekerjaan struktur beton bertulang disebabkan oleh beberapa faktor. Adapun analisis akar penyebab *cost overrun* pada pekerjaan struktur beton bertulang adalah sebagai berikut :

1. Kesalahan estimasi di awal pada saat pembuatan RAB, dikarenakan ketidaklengkapan gambar.
2. Manajer tidak melakukan *crosscheck* dari RAB yang telah dibuat, termasuk di dalamnya adalah kesesuaian RAB dengan jenis kontrak yang disepakati.
3. Adanya peralihan tugas pokok dan fungsi, serta tidak adanya *backup* perhitugan volume dari estimator pertama.
4. Tim yang terlibat di lapangan tidak berpraktik sesuai dengan kompetensinya, sehingga adanya keterbatasan teknis di lapangan seperti ketidaktepatan penggunaan material, pemborosan material, dan kesalahan metode kerja.

Rekomendasi Solusi

Rekomendasi solusi diperuntukkan untuk proyek berkelanjutan, sehingga potensi *cost overrun* pada proyek yang akan dilaksanakan dapat diatasi dan diminimalisir. Adapun rekomendasi solusi yang diberikan untuk proyek selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui jenis kontrak yang disepakati. Kontrak *unit price* merupakan kontrak di mana harga satuannya adalah harga per unit dan volume akhir disesuaikan dengan aktual di lapangan (risiko ditanggung pemilik). Sedangkan kontrak *lump-sum* merupakan harga tetap untuk seluruh atau jenis pekerjaan yang lingkupnya jelas (risiko ditanggung penyedia jasa). Dengan demikan, kontrak *unit price* sangat disarankan untuk penyedia jasa atau kontraktor dalam meminimalisir *cost overrun*. Pasal 42 Ayat (1) UU RI No. 2 Tahun 2017 Tentang Jasa Konstruksi menyebutkan bahwa dalam dokumen kontrak yang harus diperhatikan juga ialah harus memuat rumusan pekerjaan, memuat uraian yang jelas dan rinci tentang lingkup kerja, nilai pekerjaan, harga satuan, *lump-sum*, dan batasan waktu pelaksanaan.
2. Melengkapi data informasi proyek atau dokumen pendukung lainnya sebelum melakukan tender, serta melakukan *document control* secara baik.
3. Hubungan kerja yang baik, di mana manajer harus menyampaikan informasi terkait kontrak yang telah disepakati dengan jelas dan detail agar menghasilkan rincian RAB yang juga tepat. Selain itu, manajer juga harus melakukan *crosscheck* dari RAB yang telah dibuat oleh timnya.
4. Diperlukan ketelitian pada saat mengestimasi suatu pekerjaan dalam pembuatan RAB.
5. Melibatkan tim yang berkompeten pada bidangnya, agar tidak ada keterbatasan teknis di lapangan seperti ketidaktepatan penggunaan material, pemborosan material, dan kesalahan metode kerja.
6. Memberikan pelatihan bagi tim yang terlibat untuk pengembangan keprofesian berkelanjutan terkait perubahan teknologi serta regulasi yang berlaku.

Selain rekomendasi solusi dari segi manajemen di atas, diperlukan juga suatu rekomendasi teknis untuk proyek yang akan dilaksanakan di masa depan, yaitu :

1. Diperlukan penggunaan sistem manajemen informasi bangunan seperti *Building Information Modeling* (BIM) untuk meminimalkan kesalahan perhitungan volume manual pada saat tender.
2. Membuat *Bar Bending Schedule* (BBS), sebagai acuan pemotongan besi di lapangan. Di mana BBS adalah daftar kebutuhan besi tulangan yang memperhitungkan pola-pola yang dikombinasikan sehingga menghasilkan pola yang paling optimal dan menghasilkan *waste* seminimal mungkin (Antara et al., n.d.).
3. Membuat *form monitoring* untuk kontrol lapangan, baik itu untuk progres lapangan atau stok material. Adapun kontrol lapangan yang dimaksud adalah

 ISSN 2987-677x

berupa hierarki pengendalian material seperti berikut:

- Eliminasi: Tindakan yang paling aman karena langsung menghilangkan atau membuang sisa material yang ada di lapangan ke pembuangan akhir oleh pihak berwenang.
- Substitusi: Tindakan yang cukup efektif karena menyediakan tempat penampungan sementara untuk sisa material yang ada di lapangan, serta menyediakan tempat penyimpanan khusus untuk material yang akan digunakan.
- Rekaya Teknik: Tindakan pengendalian material dengan menggunakan kembali sisa material yang masih dapat digunakan, seperti potongan besi, kayu bekisting, atau sisa beton untuk kebutuhan lain di proyek.
- Pengendalian administratif: Mengadakan pelatihan untuk tim yang terlibat di lapangan agar tidak terjadi keterbatasan teknis di lapangan, seperti pemborosan material dan kesalahan metode pada saat pelaksanaan kerja. Selain itu, diperlukan perhitungan kebutuhan material secara akurat untuk mencegah kelebihan pembelian yang berakhir menjadi limbah.

Aspek Keberlanjutan

Dengan menerapkan rekomendasi solusi yang diberikan di atas, maka suatu badan usaha konstruksi diharapkan dapat meminimalisir *cost overrun* pada pelaksanaan proyek konstruksi. Keberhasilan proyek konstruksi tidak hanya dilihat dari suatu bangunan yang sudah berdiri, melainkan dari ekonomi atau profit suatu penyedia jasa tersebut dapat terpenuhi. Serta pelaksanaan proyek konstruksi yang selalu memperhatikan K3L dan hubungan sosial di lingkungan kerjanya dengan baik, sehingga menghasilkan suatu proyek konstruksi yang tetap mengutamakan kenyamanan dan keselamatan publik. Dalam hal ini, suatu penyedia jasa konstruksi dapat dikatakan sebagai badan usaha yang telah mencapai prinsip berkelanjutan berdasarkan tiga pilar utama (*triple bottom line*), yaitu ekonomi, sosial, dan lingkungan. Untuk menjaga tiga pilar utama tersebut dibutuhkan pengembangan keprofesian berkelanjutan, seperti diadakannya pelatihan untuk tim yang terlibat terkait perubahan teknologi serta regulasi yang berlaku.

Kesimpulan

Berdasarkan penjelasan di atas, dapat ditarik kesimpulan bahwa jenis pekerjaan struktur beton bertulang memiliki potensi yang sangat besar dalam terjadinya pembengkakan biaya (*cost overrun).* Alternatif solusi untuk proyek yang sedang berjalan adalah dengan melakukan subsidi silang menggunakan profit dari jenis pekerjaan lainnya. Sedangkan rekomendasi solusi yang diberikan untuk proyek yang akan datang adalah dengan perbaikan pada sistem manajemen agar lebih efektif dan juga solusi teknis berupa penerapan *Building Information Modeling* (BIM) untuk meminimalkan kesalahan perhitungan volume manual pada saat tender, dan melakukan monitoring lapangan atau stok material, serta menggunakan *Bar Bending Schedule* (BBS) sebagai acuan pemotongan besi di lapangan untuk meminimalkan *waste*.

Ucapan Terimakasih

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala karunia nikmat, rahmat, dan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan karya tulis ilmiah ini dengan baik. Penulisan karya ilmiah ini telah mendapat masukan, bimbingan, serta motivasi dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini disampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada *Civitas* Akademika Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya.

Tidak lupa kepada kedua orang tua saya (Ibu Ellys Rachmawati dan Alm. Bapak Parianto) yang selalu menjadi motivasi saya untuk terus belajar dan berkembang. Terima kasih atas doa, materi, bimbingan, dan ilmu yang telah mengalir di diri saya, sehingga hidup terasa begitu mudah dan penuh kebahagiaan dalam mencapai semua impian saya. Tidak lupa pula saya mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan atau teman-teman saya yang selalu memberikan semangat dan dukungan positif untuk menyikapi segala situasi.

Referensi

Antara, K. W., Herlambang, F. S., & Purnawirati, N. (n.d.). *Pehitungan Kebutuhan dan Waste Material Besi Menggunakan Bar Bending Schedule pada Proyek Pembangunan Asrama Polisi T. 36 Sanglah 1*.

Djojowirono, S. (1984). *Manajemen Konstruksi I*. KMTS UGM.

Remi, F. (2017). Kajian faktor penyebab cost overrun pada proyek konstruksi gedung. *Jurnal Teknik Mesin (JTM)*, *06*.

Sudarmanto, R., Irawan, D., & Halim, A. (2023). Analisis perbandingan nilai kontrak lumpsum dan unit price item pekerjaan mep dengan metode ahp (studi kasus: Proyek Ciputra World Surabaya phase 3). *BOUWPLANK Jurnal Ilmiah Teknik Sipil an Lingkungan*, *3*(2), 34–43. https://doi.org/10.31328/bouwplank.v3i2.446

Indonesia. (2017). *Undang-Undang tentang Jasa Konstruksi*, *UU RI No. 2 Tahun 2017*.

 ISSN 2987-677x

Analisis Kegagalan Pekerjaan *Bored Pile* untuk Mencapai Kedalaman Sesuai *Drawing*

Bambang Setiaji[1], Hendra Hadi Saputra[2], Lusia Permata Sari Hartanti [3]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ setiaji.bambang25@gmail.com

Pekerjaan pondasi *bored pile* merupakan elemen fundamental dalam konstruksi bangunan yang berfungsi menyalurkan beban struktur ke lapisan tanah dengan daya dukung memadai sehingga menentukan stabilitas dan keandalan struktur. Namun, dalam pelaksanaannya sering terjadi ketidaksesuaian antara kedalaman rencana dan aktual yang berpotensi menurunkan kinerja pondasi. Studi ini bertujuan menganalisis penyebab, dampak, serta solusi atas permasalahan tersebut dengan menggunakan metode analisis kesesuaian, *Root Cause Analysis (RCA)*, dan *Hazard Identification and Risk Assessment (HIRA)* berdasarkan data observasi lapangan, dokumentasi proyek, dan studi literatur. Hasil studi menunjukkan adanya deviasi signifikan, dimana dari total rencana 738 m hanya tercapai 147,8 m atau terjadi selisih -590,2 m. Permasalahan ini disebabkan oleh ketidaksesuaian metode dan peralatan pengeboran terhadap kondisi tanah aktual, keterbatasan data investigasi tanah, serta kurang optimalnya pengawasan teknis. Dampak yang ditimbulkan meliputi penurunan kapasitas daya dukung pondasi, potensi *settlement*, serta meningkatnya risiko kegagalan struktur yang berdampak pada keselamatan dan biaya proyek. Oleh karena itu, diperlukan penyesuaian metode dan peralatan, peningkatan kualitas investigasi tanah, serta penguatan pengawasan untuk menjamin kinerja pondasi tetap aman dan andal.

Kata kunci: *bored pile*, kedalaman pondasi, RCA, HIRA, daya dukung, kegagalan konstruksi

Pendahuluan

Perusahaan Listrik Negara (PLN) sebagai penyedia layanan ketenagalistrikan nasional memiliki peran penting dalam mendukung pembangunan ekonomi dan pelayanan publik, sehingga membutuhkan sarana dan prasarana kerja yang memadai. Pembangunan Gedung X merupakan upaya strategis untuk meningkatkan kualitas layanan, efisiensi operasional, serta kenyamanan kerja melalui fasilitas yang lebih modern, aman, dan representatif. Namun, dalam pelaksanaan pekerjaan pondasi *bored pile* ditemukan kendala berupa ketidaksesuaian kondisi lapangan dengan data perencanaan, seperti adanya utilitas bawah tanah yang tidak teridentifikasi serta lapisan tanah keras yang lebih dangkal dari perkiraan, sehingga kedalaman pengeboran tidak tercapai sesuai desain. Kondisi ini berpotensi menurunkan kinerja pondasi serta menyebabkan keterlambatan dan peningkatan biaya proyek. Oleh karena itu, proyek ini difokuskan pada analisis permasalahan ketidaktercapaian kedalaman *bored pile* serta evaluasi solusi teknis yang tepat guna menjamin keamanan, keandalan struktur, dan ketepatan waktu pelaksanaan.

Selain itu, pembangunan Gedung X juga sejalan dengan pencapaian *Sustainable Development Goals (SDGs)*, khususnya Tujuan 7: Energi Bersih dan Terjangkau, Tujuan 9: Industri, Inovasi, dan Infrastruktur, serta Tujuan 11: Kota dan Permukiman yang Berkelanjutan. Melalui penyediaan infrastruktur kelistrikan yang andal dan efisien, PLN berkontribusi terhadap ketersediaan energi berkelanjutan dan peningkatan infrastruktur publik yang tangguh. Pendekatan teknis yang mempertimbangkan efisiensi sumber daya, keselamatan kerja, dan minimisasi dampak lingkungan dalam proyek ini juga mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan yang inklusif dan berdaya tahan.

Metode

Metode analisis pada studi kasus ini dilakukan secara terintegrasi untuk mengidentifikasi penyebab, dampak, dan solusi atas ketidaktercapaian kedalaman *bored pile*. Tahap awal meliputi pengumpulan data primer (observasi lapangan, dokumentasi, dan wawancara) serta data sekunder (*shop drawing*, hasil investigasi tanah, dan spesifikasi teknis). Selanjutnya dilakukan analisis kesesuaian antara kedalaman rencana dan aktual untuk mengetahui deviasi yang terjadi. Akar permasalahan dianalisis menggunakan metode *Root Cause Analysis (RCA)* dengan mempertimbangkan faktor manusia, metode, peralatan, kondisi tanah, dan pengawasan. Analisis risiko dilakukan menggunakan metode HIRA untuk mengidentifikasi potensi bahaya dan tingkat risikonya. Tahap berikutnya adalah evaluasi dampak teknis dan

 ISSN 2987-677x

manajerial terhadap kinerja pondasi, waktu, biaya, dan mutu proyek. Terakhir, dirumuskan alternatif solusi seperti penyesuaian metode, *redesign* pondasi, atau penambahan tiang, yang dievaluasi berdasarkan aspek teknis, biaya, dan waktu untuk menentukan solusi paling optimal.

Hasil Kerja

Situasi Permasalahan

Pekerjaan *bored pile* pada Proyek Pembangunan Gedung X direncanakan sebagai sistem pondasi dalam yang berfungsi menyalurkan beban struktur ke lapisan tanah yang memiliki daya dukung memadai serta mengendalikan penurunan bangunan agar tetap dalam batas yang diizinkan. Berdasarkan hasil investigasi tanah menggunakan metode *Cone Penetration Test (CPT)*, diperoleh indikasi lapisan tanah keras pada kedalaman antara -3,6 m hingga -5,4 m, sehingga dalam perencanaan ditetapkan kedalaman *bored pile* sebesar -6 m dengan jumlah 123 titik dan diameter 40 cm. Namun, dalam pelaksanaan di lapangan hingga periode Januari 2026, hasil pengeboran menunjukkan bahwa dari 123 titik yang direncanakan, sebanyak 93 titik tidak mencapai kedalaman desain, dengan realisasi kedalaman hanya berkisar antara -2 m hingga -4 m, sehingga pekerjaan tidak dapat dilanjutkan ke tahap pengecoran.

Ketidaktercapaian kedalaman ini disebabkan oleh beberapa faktor utama, yaitu faktor geoteknik berupa adanya perbedaan kondisi tanah aktual dengan hasil investigasi awal yang menunjukkan variasi lapisan tanah yang cukup tinggi, faktor teknis yang meliputi keterbatasan kapasitas alat bor serta ketidaksesuaian metode pengeboran terhadap kondisi tanah keras yang dijumpai di lapangan, serta faktor non-teknis berupa keberadaan utilitas bawah tanah seperti kabel aktif yang menghambat pelaksanaan pekerjaan pada beberapa area. Dampak dari kondisi tersebut sangat signifikan terhadap kinerja pondasi, dimana berkurangnya kedalaman tiang menyebabkan penurunan kapasitas daya dukung, khususnya pada komponen daya dukung ujung *(end bearing)*, sehingga berpotensi meningkatkan risiko penurunan berlebih *(settlement)* baik secara total maupun *diferensial* yang dapat mempengaruhi stabilitas struktur bangunan.

Selain itu, permasalahan ini juga berdampak langsung terhadap kinerja proyek secara keseluruhan, dimana progres fisik hingga Januari 2026 hanya mencapai 4,64% dibandingkan dengan rencana sebesar 8,22%, sehingga terjadi deviasi negatif sebesar -3,57% yang didominasi oleh keterlambatan pada pekerjaan struktur sebagai item dengan bobot terbesar. Oleh karena itu, diperlukan langkah-langkah strategis berupa evaluasi ulang terhadap desain pondasi berdasarkan kondisi aktual lapangan, pelaksanaan investigasi tanah tambahan untuk meningkatkan akurasi data geoteknik, penyesuaian metode kerja serta penggunaan peralatan yang lebih sesuai, serta percepatan koordinasi terkait relokasi utilitas bawah tanah agar pekerjaan *bored pile* dapat dilanjutkan dan target penyelesaian proyek dapat tercapai sesuai dengan jadwal yang telah ditetapkan.

Analisis Permasalahan

Analisis *Root Cause Analysis* (RCA) menunjukkan bahwa ketidaktercapaian kedalaman *bored pile* dengan deviasi kumulatif sebesar -590,2 m atau sekitar 20% dari target pada titik PC2, diikuti PC1, PC3, dan PC4 merupakan akibat dari interaksi beberapa faktor utama, yaitu keterbatasan peralatan, ketidaksesuaian metode pelaksanaan, variabilitas kondisi tanah, serta lemahnya lemahnya integrasi antara desain, metode kerja, dan kondisi aktual lapangan. Penggunaan alat bor berkapasitas rendah dan mata bor yang tidak sesuai, tidak diterapkannya metode stabilisasi lubang seperti *casing* atau *slurry*, serta kondisi tanah yang tidak homogen dan jenuh air menjadi penyebab dominan terhambatnya proses pengeboran. Selain itu, adanya ketidaksesuaian antara data investigasi tanah dan kondisi aktual lapangan turut memperbesar deviasi yang terjadi.

Temuan ini konsisten dengan teori dalam literatur geoteknik yang menyatakan bahwa kinerja pondasi *bored pile* sangat dipengaruhi oleh kesesuaian antara kondisi tanah, metode pelaksanaan, dan peralatan yang digunakan (Das, 2011; Bowles, 1997), serta harus memenuhi ketentuan dalam SNI 8460:2017 terkait persyaratan perencanaan pondasi. Oleh karena itu, permasalahan ini memiliki tingkat urgensi yang tinggi karena berimplikasi langsung terhadap penurunan kapasitas daya dukung dan potensi gangguan stabilitas struktur. Selain itu faktor keamanan pondasi juga menurun dari nilai rencana dan menunjukkan ketidaksesuaian terhadap standar teknis yang berlaku; dari sisi manajerial, permasalahan ini menyebabkan keterlambatan proyek sekitar 56 hari dari target awal Agustus 2026 menjadi Oktober 2026 akibat terganggunya pekerjaan struktur yang berada pada jalur kritis, serta menimbulkan pembengkakan biaya dimana meskipun biaya awal terlihat lebih rendah, kebutuhan *redesign*, penambahan titik *bored pile*, dan klaim perpanjangan waktu menghasilkan estimasi kerugian sekitar Rp 459.862.000.

Di samping itu kondisi ini mencerminkan lemahnya pengendalian mutu, kurang optimalnya manajemen risiko sejak tahap perencanaan, serta kurangnya koordinasi antara pihak perencana, kontraktor, dan pengawas dalam merespons ketidaksesuaian kondisi lapangan, sehingga secara keseluruhan deviasi kedalaman *bored pile* berdampak pada penurunan kinerja pondasi, keterlambatan waktu, peningkatan biaya, serta penurunan mutu proyek, yang menuntut dilakukannya evaluasi ulang desain, penerapan metode perkuatan pondasi, serta perbaikan sistem manajemen proyek agar pelaksanaan konstruksi dapat kembali

 ISSN 2987-677x

memenuhi aspek waktu, biaya, mutu, dan keselamatan sesuai persyaratan yang ditetapkan.

Alternatif Solusi

Berdasarkan Tabel 1 terkait perbandingan kedalaman *bored pile* rencana vs aktual menjelaskan hasil pelaksanaan pekerjaan *bored pile*, seluruh titik pondasi menunjukkan deviasi signifikan dimana kedalaman aktual tidak mencapai kedalaman rencana. Dari total 123 titik dengan rencana kedalaman 738 m, hanya terealisasi 147,8 m sehingga terjadi selisih kumulatif sebesar -590,2 m. Deviasi terbesar terjadi pada titik PC2 dengan realisasi hanya sekitar 14% dari rencana (selisih -309,4 m), diikuti PC1 dengan selisih -209,1 m, sementara PC3 dan PC4 masing-masing mengalami selisih -59,77 m dan -11,95 m. Kondisi ini menunjukkan bahwa seluruh pekerjaan *bored pile* tidak memenuhi target kedalaman yang direncanakan, yang mengindikasikan adanya kendala signifikan baik dari faktor kondisi tanah maupun metode pelaksanaan di lapangan.

Sedangkan Gambar 1 kondisi sampel tanah hasil pengeboran menunjukkan karakteristik campuran pasir, lanau, dan kemungkinan lempung berpasir dengan tekstur granular yang agak lepas namun sedikit menggumpal, menandakan adanya kandungan fines. Perbedaan warna antara tanah yang diambil dan tanah di sekitar lokasi mengindikasikan kondisi tanah yang tidak homogen serta adanya kadar air tinggi atau kondisi jenuh. Secara geoteknik, kondisi ini berimplikasi pada potensi runtuhnya dinding lubang bor, penurunan kestabilan akibat air, serta ketidakseragaman daya dukung dan kedalaman penetrasi. Oleh karena itu, diperlukan metode pengeboran yang tepat serta pengendalian stabilitas seperti penggunaan *casing* atau *slurry* agar pekerjaan *bored pile* dapat dilakukan secara aman dan optimal.

Gambar 2 *gantt chart schedule* proyek, keterlambatan proyek ditunjukkan oleh pekerjaan berwarna merah yang dominan terjadi pada pekerjaan struktur sebagai bagian jalur kritis, sehingga berdampak langsung terhadap keseluruhan jadwal proyek. Keterlambatan berawal dari pekerjaan pondasi hingga struktur atas dan menyebabkan pergeseran pada pekerjaan berikutnya meskipun direncanakan *overlapping*, yang mengindikasikan adanya kendala seperti material, tenaga kerja, atau faktor teknis di lapangan. Dampak keterlambatan ini juga berpotensi merambat ke pekerjaan arsitektur serta mekanikal dan elektrikal, sehingga menimbulkan konflik penjadwalan dan menurunkan efisiensi proyek. Secara keseluruhan, pengendalian waktu dinilai belum optimal dan memerlukan tindakan korektif seperti percepatan pekerjaan, penambahan sumber daya, dan penjadwalan ulang, karena tanpa penanganan yang tepat proyek diperkirakan mengalami keterlambatan selama 56 hari dari target Agustus 2026 menjadi 11 Oktober 2026.

Tabel 1. Perbandingan Kedalaman *Bored Pile* Rencana vs Aktual

Titik Pondasi	Jumlah Pondasi	Jumlah *Bored pile*	Jumlah titik	Rencana Kedalaman	Aktual (m)	Selisih (m)	Keterangan
PC1	12	4	48	288	78,91	-209,1	Tidak sesuai
PC2	10	6	60	360	50,63	-309,4	Tidak sesuai
PC3	6	2	12	72	12,23	-59,77	Tidak sesuai
PC4	3	1	3	18	6,05	-11,95	Tidak sesuai
Total			123	738	147,8	-590,2	Tidak sesuai



Gambar 1. Kondisi Sampel Tanah



Gambar 2. *Schedule Proyek*

Berdasarkan analisis teknis, manajerial, dan *Root Cause Analysis (RCA)*, terdapat beberapa alternatif solusi untuk mengatasi tidak tercapainya kedalaman *bored pile* dengan mempertimbangkan aspek biaya, mutu, waktu, dan risiko. Alternatif utama yang direkomendasikan adalah penggantian peralatan *bored pile* termasuk mata bor dengan spesifikasi yang sesuai (seperti *flight auger, rock auger*, atau *core barrel*), karena secara teknis paling efektif untuk mencapai kedalaman rencana tanpa mengubah desain, meskipun memerlukan tambahan biaya mobilisasi sekitar Rp25.000.000 dan waktu 1–2 minggu.

Alternatif kedua adalah melakukan sondir dan boring ulang untuk memperoleh data tanah yang lebih akurat, dengan tambahan biaya sekitar Rp 40.000.000 dan waktu sekitar 2 minggu, yang berfungsi sebagai dasar evaluasi lanjutan apakah desain tetap atau perlu penyesuaian. Alternatif ketiga adalah pengujian PDA *(Pile Driving Analyzer)* untuk mengetahui kapasitas daya dukung aktual tiang, namun kurang direkomendasikan karena membutuhkan waktu cukup lama (±8 minggu) dan berpotensi menghentikan pekerjaan sementara. Alternatif terakhir adalah *re-design* pondasi, yaitu penyesuaian desain dengan kondisi lapangan seperti penambahan jumlah tiang atau perubahan dimensi,

 ISSN 2987-677x

yang meskipun realistis namun berdampak pada tambahan biaya sekitar Rp168.662.000 dan keterlambatan proyek hingga 56 (lima puluh enam) hari. Secara keseluruhan, solusi yang paling direkomendasikan adalah penggantian peralatan bor, sementara opsi lainnya menjadi alternatif lanjutan apabila solusi utama tidak dapat dilaksanakan.

Kesimpulan

Kegagalan pekerjaan *bored pile* dalam mencapai kedalaman rencana umumnya disebabkan oleh kombinasi faktor geoteknik, teknis, dan manajerial, terutama ketidaksesuaian kondisi tanah aktual dengan data investigasi awal, penggunaan alat dan metode yang kurang tepat, serta lemahnya koordinasi antar pihak proyek. Dampaknya sangat signifikan terhadap mutu, waktu, dan biaya, dimana kapasitas daya dukung pondasi menurun, progres proyek mengalami keterlambatan hingga 56 hari (dari 16 Agustus menjadi 11 Oktober 2026), serta terjadi pembengkakan biaya sekitar Rp459,86 juta. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan penyesuaian metode dan peralatan, serta investigasi tanah tambahan apabila diperlukan.

Sebagai tindak lanjut, disarankan peningkatan kualitas investigasi tanah, pemilihan metode dan alat yang sesuai, peningkatan kompetensi tenaga kerja, penguatan sistem pengawasan, serta koordinasi yang lebih efektif antar stakeholder proyek. Selain itu, penerapan manajemen mutu dan K3L secara konsisten serta dokumentasi pembelajaran proyek menjadi langkah penting untuk mencegah permasalahan serupa di masa mendatang dan meningkatkan keberhasilan pelaksanaan proyek konstruksi.

Ucapan Terimakasih

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat, rahmat, dan penyertaan-Nya sehingga penulis diberikan kesempatan untuk menyelesaikan artikel prosiding ini dengan baik dan tepat waktu. Penulis juga menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan berkontribusi dalam penyusunan artikel ini, khususnya kepada keluarga, orang tua, tim proyek, serta teman-teman seperjuangan. Ucapan terima kasih secara khusus penulis sampaikan kepada para dosen pembimbing dari UKWMS Surabaya, yang senantiasa memberikan arahan, dukungan, ilmu pengetahuan, serta meluangkan waktu dalam proses bimbingan, sehingga artikel ini dapat terselesaikan dengan baik, tepat waktu, dan memberikan manfaat sesuai tujuan penulisan.

Referensi

Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2002). *SNI 03-2847-2002: Tata Cara Perencanaan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2015). *SNI 7956.1:2015: Tata Cara* Perencanaan *Tiang Pancang*. Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2017). SNI 8460:2017: Perencanaan Pondasi untuk Bangunan Gedung. Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2019). SNI 1726:2019: Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2019). SNI 2847:2019: Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2020). SNI 1727:2020: Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain. Jakarta: BSN.

Borghi, R. (2001). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. London: E & FN Spon.

Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design* (5th ed.). New York: McGraw-Hill.

Braja, M. D. (2010). *Principles of foundation engineering* (7th ed.). Cengage Learning.

Coduto, D. P. (2001). *Foundation design: Principles and practices* (2nd ed.). Prentice Hall.

Das, B. M. (2010). *Principles of Foundation Engineering (7th ed.)*. Stamford: Cengage Learning.

Das, B. M., & Sivakugan, N. (2016). *Principles of foundation engineering (8th ed.).* Cengage Learning.

Ervianto, W. I. (2005). *Manajemen proyek konstruksi*. Yogyakarta: Andi.

Hardiyatmo, H. C. (1992). *Mekanika tanah 1.* Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

Hardiyatmo, H. C. (2002). *Teknik pondasi 2*. Yogyakarta: Beta Offset.

Hardiyatmo, H. C. (2015). *Analisis dan perancangan fondasi I.* Gadjah Mada University Press.

Harris, C. E., Pritchard, M. S., & Rabins, M. J. (2009). Engineering Ethics: *Concepts and Cases (4th ed.).* Belmont: Wadsworth Cengage Learning.

Jawat, I. W., Gita, P. P. T., & Dharmayoga, I. M. S. (2020). Kajian metoda pelaksanaan pekerjaan pondasi *bored pile* pada tahap perencanaan pelaksanaan. Paduraksa: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa. https://doi.org/10.22225/pd.9.2.1830.126-142

Jurnal Mitra Teknik Sipil (JMTS). (2023). Analisis *settlement* pondasi *bored pile*. Jurnal Mitra Teknik Sipil. Diakses dari: https://journal.untar.ac.id/index.php/jmts/article/view/24921

Kodoatie, R. J. (2003). Manajemen dan Rekayasa Infrastruktur. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.

Kusuma Wardana, N., & Fajarwati, Y. (2024). Analisis daya dukung pondasi *bored pile* berdasarkan data N-SPT. JACEP (Journal of Architectural, Civil and Environmental Engineering). Diakses dari: https://journal.uny.ac.id/publications/jacep/article/view/712

 ISSN 2987-677x

Lulie, Y., & Suryadharma, H. (2007). Analisis Parameter Tanah Berdasarkan Data Cone Penetration Test (CPT). Jurnal Teknik Sipil, (detail volume dan nomor disesuaikan dengan sumber asli).

Meyerhof, G. G. (1976). *Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE.

Mutiara, I. (2021). Analisis daya dukung pondasi *bored pile* berdasarkan data Cone Penetration Test (CPT). Jurnal INTEK. Diakses dari: https://jurnal.poliupg.ac.id/index.php/Intek/article/view/2772

Persatuan Insinyur Indonesia (PII). (2017). Kode Etik Insinyur Indonesia dan Pedoman Perilaku Profesional. Jakarta.

Rahardjo, P. P. (2008). Mekanika Tanah. Bandung: ITB.

Republik Indonesia. (1970). Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja. Jakarta.

Republik Indonesia. (2002). Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung. Jakarta.

Republik Indonesia. (2005). Peraturan Pemerintah Nomor 36 Tahun 2005 tentang Peraturan Pelaksanaan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung. Jakarta.

Republik Indonesia. (2012). Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012 tentang Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja

Republik Indonesia. (2017). Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2017 tentang Jasa Konstruksi. Jakarta.

Sanglerat, G. (1972). The Penetrometer and Soil Exploration. Amsterdam: Elsevier.

Sentosa, et al. (2023). *Deep bored pile analysis. International Journal of Advances in Structural Engineering.* Diakses dari: https://journal.untar.ac.id/index.php/ijaste/article/view/31317

Surya, A., Leman, S., & Iskandar, R. (2019). Analisis Kegagalan Tiang *Bored pile* pada Proyek Gedung di Kawasan Sudirman. Jurnal Teknik Sipil, (detail volume dan nomor disesuaikan dengan sumber asli).

Tomlinson, M. J. (2001). *Foundation Design and Construction (7th ed.).* London: Prentice Hall.

 ISSN 2987-677x

Analisis Pengaruh Siklus *Sign On – Sign Off* terhadap Keberlanjutan Operasional Kapal Berbendera Indonesia Menggunakan Metode Rasio Ketersediaan Awak Kapal Model Diskrit

Moejiono[1], Lusia Permata Sari Hartanti[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ moejiono12@gmail.com

Keberlanjutan operasional pelayaran nasional sangat bergantung pada ketersediaan awak kapal yang memenuhi kualifikasi sesuai standar keselamatan internasional. Penelitian ini menganalisis pengaruh siklus *sign on – sign off* terhadap keberlanjutan operasional kapal berbendera Indonesia berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan No. PM 26 Tahun 2022, IMO Resolution A.1047 (27), SOLAS 1974, dan Maritime Labour Convention (MLC) 2006. Tiga dimensi keberlanjutan ekonomi (efisiensi operasional), sosial (kesejahteraan dan jam istirahat awak kapal), dan lingkungan (keselamatan navigasi dan pencegahan pencemaran laut), menjadi kerangka analisis utama. Metode yang digunakan adalah rasio ketersediaan awak kapal model diskrit berbasis formula *duty cycle* dan *ceiling function*. Hasil penelitian menunjukkan total awak kapal pada seluruh kapal berbendera Indonesia adalah 327.120 orang , dengan 297.299 *on board* dan 29.821 sedang cuti, berdasarkan siklus optimal 10 bulan *on board* dan 1 bulan cuti (T=10; L=1). Rasio ketersediaan ini menjadi acuan strategis perencanaan SDM maritim yang berkelanjutan bagi perusahaan pelayaran dan regulator nasional.

Kata kunci: Keberlanjutan Operasional, *Safe Manning*, *Sign On Sign Off* , Rasio Ketersediaan, Kesejahteraan Pelaut, Pencegahan Pencemaran, SDGs Maritim

Pendahuluan

Industri pelayaran global memegang peranan strategis dalam mendukung keberlanjutan ekonomi dunia, di mana lebih dari 98% volume perdagangan global diangkut melalui moda transportasi laut (BIMCO/ISF, 2020). Pertumbuhan armada global yang signifikan telah mendorong meningkatnya permintaan awak kapal di berbagai level jabatan, baik perwira maupun *rating* (Patchiappane & Rengamani, 2018). Namun di tengah pertumbuhan tersebut, industri pelayaran menghadapi tantangan besar terkait keberlanjutan (*sustainability*), tidak hanya dari dimensi ekonomi dan operasional, tetapi juga dari dimensi sosial dan lingkungan yang semakin mendapat perhatian dunia.

Dalam kerangka *Sustainable Development Goals* (SDGs), industri maritim berkaitan langsung dengan: SDG 8 (*Decent Work and Economic Growth*) yang menekankan pentingnya pekerjaan layak bagi tenaga kerja maritim; SDG 14 (*Life Below Water*) yang mendorong pencegahan pencemaran laut; serta SDG 9 (*Industry, Innovation and Infrastructure*) yang mendorong efisiensi dan ketahanan infrastruktur transportasi laut. Ketiga dimensi ini membentuk kerangka *triple bottom line sustainability* yang menjadi landasan analisis penelitian ini.

Salah satu pilar keberlanjutan yang paling kritis dalam operasional kapal adalah keberlanjutan sosial, yang mencakup kesejahteraan, kesehatan, keselamatan, dan hak-hak dasar awak kapal. *Maritime Labour Convention* (MLC) 2006 menetapkan standar minimum terkait jam kerja, jam istirahat, periode kontrak, dan hak cuti awak kapal, yaitu maksimal 12 bulan per kontrak dan hak cuti 2,5 hari per bulan kerja (MLC, 2006). Pelanggaran terhadap ketentuan ini merupakan ancaman nyata terhadap keberlanjutan sosial SDM maritim global. Kelelahan kronis (*fatigue*) akibat siklus *sign on – sign off* yang tidak seimbang terbukti menjadi salah satu penyebab utama kecelakaan laut, yang pada gilirannya berdampak pada dimensi lingkungan berupa risiko tumpahan minyak dan pencemaran laut (Moejiono et al., 2025).

Dari perspektif keberlanjutan ekonomi, kekurangan awak kapal yang berkualifikasi merupakan ancaman serius terhadap kelangsungan operasional armada. Tren penurunan minat masyarakat terhadap profesi pelaut dipicu oleh kondisi kerja yang mengharuskan perpisahan dengan keluarga dan tekanan kerja yang lebih berat dibandingkan profesi di darat telah memperparah krisis ketersediaan SDM maritim (Livingstone Divine Caesar, 2016). Laporan BIMCO/ISF (2020) secara konsisten mengidentifikasi *gap* antara supply dan demand awak kapal sebagai ancaman jangka panjang terhadap keberlanjutan industri pelayaran global. Kondisi kekurangan awak kapal yang berpengalaman berdampak secara global, khususnya pada perspektif keselamatan operasi kapal (Miroshnik, 2012).

Sebagai negara kepulauan terbesar di dunia, Indonesia memiliki ketergantungan yang sangat tinggi terhadap transportasi laut. Pemerintah Indonesia melalui Peraturan Menteri Perhubungan No. PM 26 Tahun 2022 tentang Pengawakan Kapal Niaga telah

 ISSN 2987-677x

menetapkan standar minimum jumlah dan kualifikasi awak kapal, selaras dengan IMO Resolution A.1047 (27) dan SOLAS 1974, guna menjamin keamanan operasi kapal, pencegahan pencemaran, dan pemenuhan jam istirahat awak kapal. Namun implementasi kebijakan safe manning yang benar-benar berkelanjutan memerlukan pemahaman mendalam tentang dinamika siklus *sign on – sign off* yang menentukan jumlah total awak kapal yang dibutuhkan agar operasi kapal dapat berjalan tanpa interupsi secara berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh siklus *sign on – sign off* terhadap keberlanjutan operasional kapal berbendera Indonesia menggunakan metode rasio ketersediaan awak kapal model diskrit, sehingga dapat memberikan kontribusi bagi perusahaan pelayaran dan regulator dalam merancang kebijakan pengelolaan SDM maritim yang lebih efisien, manusiawi, dan berkelanjutan sesuai agenda SDGs.

Metode

Penelitian ini menggunakan metode rasio ketersediaan awak kapal model diskrit berbasis formula *duty cycle* dan *ceiling function* untuk menganalisis keberlanjutan siklus *sign on – sign off*. Data jumlah kapal diperoleh dari aplikasi Vessel Finder dan dipadukan dengan standar pengawakan berdasarkan PM 26 Tahun 2022. Variabel analisis meliputi:

- N = jumlah kapal
- T = lama *sign on / on board* (bulan)
- L = lama *sign off* / cuti (bulan)
- G = jumlah grup awak kapal (tiap grup = 1 kru lengkap untuk mengoperasikan 1 kapal)

$$Availability = \frac{T}{T+L}$$

Agar (N) kapal selalu terisi, total group yang dibutuhkan:

$$G \geq \frac{N}{\frac{T}{T+L}} = N.\frac{T+L}{T}$$

Untuk memproyeksikan faktor attrisi (*attrition*), yaitu berkurangnya awak kapal akibat pensiun, meninggal, sakit, atau berpindah profesi digunakan model arus personel (*workforce flow / attrition model*) dengan parameter:

- (p_{pen}) = probabilitas/tingkat pensiun per orang per bulan
- (p_{md}) = probabilitas/tingkat meninggal per orang per bulan
- Total *attrition rate* : $p = p_{pen} + p_{md}$
- Ekspektasi jumlah orang keluar per bulan : $\lambda = H \cdot p$
- (Lr) = *lead time* pengganti siap bergabung (bulan)
- (Lo) = lama *overlap/handover* yang diinginkan (bulan)

Estimasi awak kapal tambahan (*buffer*) yang perlu disiapkan:

$$\beta = \lambda.(L_r + L_0) = [(H_0.p).(L_r + L_0)]$$

Total awak yang sebaiknya disiapkan:

$$H_{tot} = H_0 + \beta$$

Hasil Kerja

Jumlah Awak Kapal Berbendera Indonesia

Berdasarkan data *Vessel Finder* dan PM 26 Tahun 2022, Tabel 1 menyajikan matriks jumlah awak kapal berbendera Indonesia pada berbagai jenis dan ukuran kapal. Data ini menjadi dasar penghitungan rasio ketersediaan awak kapal untuk mendukung keberlanjutan operasional armada nasional.

Tabel 1. Matriks Jumlah Pelaut pada Berbagai Jenis dan Ukuran Kapal (Sumber: Vessel Finder & PM 26/2022)

Jabatan	GT >10.000		GT 3.000–10.000		GT 1.500–3.000		GT 500–1.500		GT <500	
	B	P	B	P	B	P	B	P	B	P
Master	557	14	1077	11	928	13	1916	54	21933	245
Chief Mate	557	14	1077	11	928	13	1916	54	21933	245
Deck Officer	557	14	1077	11	928	13	1916	54	21933	245
Deck Officer	557	14	1.077	11	928	13	1.916	108	0	0
Dokter	0	14	0	11	0	0	0	0	0	0
Able Seafarer Deck	557	14	1077	11	928	13	0	0	0	0
Juru Mudi	1671	42	3231	33	2784	39	5748	162	43866	490
Ordinary Sailor	557	56	1077	22	928	0	0	0	0	0
Ships Cook	557	42	1077	22	928	13	1916	54	21933	245
Mess Boy	557	28	1077	11	928	0	0	0	0	0
Chief Engineer	557	14	1077	11	928	13	1916	54	21933	245
2nd Engineer	557	14	1077	11	928	13	1916	54	21933	245
3rd Engineer	557	14	1077	11	928	13	1916	54	21933	245
4th Engineer	557	14	1077	11	0	13	0	0	0	0
Electro Technical Officer	557	14	1077	11	928	13	0	0	0	0
Able Seafarer Engine	557	14	1077	11	928	0	0	0	0	0
Oiler	1671	42	3231	33	2784	39	1916	54	21933	245
Electro Technical Rating	557	28	0	11	0	0	0	0	0	0
Total ABK/ Jenis Kapal	11.697	406	21.540	264	17.632	221	22.992	702	219.330	2.450
Total ABK/ GT	12.103		21.804		17.853		23.694		221.780	
Total Seluruh ABK Kapal					297.234					

Keterangan
B = Kapal Barang
P = Kapal Penumpang

 ISSN 2987-677x

Siklus *Sign On – Sign Off* dan Dimensi Keberlanjutan

Sistem kerja awak kapal terdiri dari periode *on board* (*sign on*) dan periode cuti (*sign off*) secara berkelanjutan sampai memasuki periode pensiun atau berhenti kerja (*attrition*). Siklus ini dipengaruhi oleh variabel, yaitu jumlah dan jenis kapal, lama periode kerja di atas kapal, lama periode cuti, serta faktor attrisi. Ketidakseimbangan siklus *sign on – sign off* memiliki implikasi langsung terhadap tiga dimensi keberlanjutan:

1. Dimensi ekonomi: Kekosongan awak kapal pada saat *sign off* menyebabkan kapal tidak dapat beroperasi, yang berdampak pada kerugian operasional dan terganggunya rantai pasok logistik nasional.
2. Dimensi sosial: Perpanjangan periode on board melebihi ketentuan MLC 2006 (maks. 12 bulan) menyebabkan kelelahan kronis (*fatigue*), gangguan kesehatan mental, dan pelanggaran hak dasar pelaut sebagai tenaga kerja yang dilindungi oleh standar *decent work* SDG 8.
3. Dimensi lingkungan: Kelelahan awak kapal akibat siklus yang tidak berkelanjutan meningkatkan risiko *human error*, yang merupakan faktor dominan dalam kecelakaan laut dan insiden pencemaran perairan, bertentangan langsung dengan target SDG 14 (*Life Below Water*).

Masalah terjadi ketika memasuki periode cuti/*sign off* tidak ada awak kapal pengganti. Kondisi ini menjadi isu keberlanjutan penting yang dilaporkan setiap lima tahun oleh BIMCO/ISF sebagai laporan *supply* and *demand* (BIMCO/ISF, 2020).

Rasio Ketersediaan Awak Kapal Model Diskrit

Tabel 2 menyajikan hasil perhitungan rasio ketersediaan awak kapal untuk seluruh kategori kapal berbendera Indonesia menggunakan siklus T=10 bulan on board dan L=1 bulan cuti, sesuai batas maksimum MLC 2006 dan praktik umum industri pelayaran nasional

Tabel 2. Matriks Rasio Ketersediaan Awak kapal pada Kapal Berbendera Indonesia

Bobot Kapal	Jenis	N Kapal	Abk/ Kapal	T (bln)	L (bln)	G	On Board	Cuti	Total
GT >10.000	Barang	557	21	10	1	613	11.697	1.176	12.873
GT >10.000	Penumpang	14	28	10	1	16	392	56	448
GT 3.000–10.000	Barang	1.077	20	10	1	1.185	21.540	2.160	23.700
GT 3.000–10.000	Penumpang	11	23	10	1	13	253	46	299
GT 1.500–3.000	Barang	928	19	10	1	1.021	17.632	1.767	19.399
GT 1.500–3.000	Penumpang	13	17	10	1	15	221	34	255
GT 500–1.500	Barang	1.916	12	10	1	2.108	22.992	2.304	25.296
GT 500–1.500	Penumpang	54	13	10	1	60	702	78	780
GT <500	Barang	21.933	10	10	1	24.127	219.330	21.940	241.270
GT <500	Penumpang	254	10	10	1	280	2.540	260	2.800
Total		26.757				29.438	297.299	29.821	327.120

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa dengan siklus T=10 dan L=1, rasio ketersediaan awak kapal adalah:

$$Availability = \frac{T}{T+L} = \frac{10}{10+1} = 0{,}909 = 90{,}9\%$$

Artinya, dari total 327.120 awak kapal yang harus disiapkan, 90,9% (297.299 orang) berada *on board* dan 9,1% (29.821 orang) sedang menjalani hak cuti pada setiap titik waktu. Siklus ini memenuhi ketentuan MLC 2006 dan mendukung prinsip keberlanjutan sosial melalui penjaminan hak cuti secara reguler.

Proyeksi Faktor Attrisi untuk Perencanaan SDM Berkelanjutan

Penelitian ini juga memodelkan faktor attrisi sebagai komponen penting dalam perencanaan SDM maritim yang berkelanjutan. Tanpa memperhitungkan attrisi, perusahaan pelayaran berisiko mengalami defisit awak kapal secara gradual yang mengancam keberlanjutan operasional jangka panjang. Kebutuhan awak kapal minimum tanpa attrisi (H_0) dihitung sebagai:

$$G_0 = \left[N.\frac{T+L}{T}\right]$$

dimana $H_0 = G_0$ x Jumlah Abk

Dengan memperhitungkan faktor attrisi dan *lead time* pengganti, total awak yang harus disiapkan perusahaan adalah:

Faktor *Attrition*:

$$p = p_{pen} + p_{md}$$

Dimana:

P_{pen} = probabilitas pensiun per orang per bulan

P_{md} = probabilitas meninggal per orang per bulan

Ekspektasi Jumlah yang Keluar per Bulan:

$$\lambda = H_0 \times p$$

Buffer untuk *Lead Time* Pengganti:

$$\beta = \lambda \times (Lr + Lo)$$

Dimana:

Lr = *lead time* pengganti (rekrut + *training* + sertifikasi)

Lo = lama *overlap/handover*

Total awak kapal yang sebaiknya disiapkan adalah:

$$Htot = H0 + \beta$$

Dimana β mencakup *buffer* untuk menutup *gap* akibat proses rekrutmen, pelatihan, sertifikasi, dan *handover*. Pemodelan ini sejalan dengan prinsip keberlanjutan

 ISSN 2987-677x

ekonomi guna memastikan perusahaan tidak mengalami gangguan operasional akibat kekurangan SDM.

Sebagai simuasi perhitungan, jika *attrition rate* nasional untuk awak kapal adalah 5% per tahun, maka:

P = 5%/12 = 0,417%
P = 5%/12 = 0,417% per bulan
Dari 327.120 awak, yang keluar per bulan:
= 327.120 × 0,4167% ≈ 1.363 orang/bulan

Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa siklus *sign on – sign off* memiliki pengaruh langsung terhadap tiga dimensi keberlanjutan operasional kapal berbendera Indonesia:

1. Jumlah total awak kapal yang dibutuhkan untuk menjamin keberlanjutan operasional seluruh armada berbendera Indonesia adalah 327.120 orang terdiri dari 297.299 *on board* dan 29.821 sedang cuti berdasarkan siklus optimal T=10 bulan dan L=1 bulan.
2. Rasio ketersediaan sebesar 90,9% menunjukkan bahwa siklus T=10/L=1 secara matematis memenuhi standar *safe manning* PM 26/2022 dan secara substantif mendukung keberlanjutan sosial dengan menjamin hak cuti awak kapal sesuai MLC 2006 (SDG 8 — *Decent Work*).
3. Pengelolaan siklus *sign on – sign off* yang terencana berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan melalui minimalisasi risiko *human error* akibat kelelahan, yang berdampak pada pencegahan kecelakaan laut dan pencemaran perairan (SDG 14 — *Life Below Water*).
4. Rasio ketersediaan akan berubah tergantung pada jumlah dan jenis kapal, nilai siklus (T/L), dan faktor attrisi. Oleh karena itu, diperlukan pembaruan data secara berkala dan integrasi model attrisi dalam perencanaan SDM maritim jangka panjang.
5. Sebagai rekomendasi tindak lanjut, penelitian selanjutnya perlu mengintegrasikan data attrisi aktual (pensiun, perpindahan profesi, sakit) dan l*ead time* rekrutmen nyata untuk menghasilkan model perencanaan SDM maritim yang lebih komprehensif dan benar-benar berkelanjutan.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas dukungan akademis dalam pelaksanaan penelitian ini, serta kepada seluruh pihak di industri pelayaran nasional yang telah memberikan masukan dan informasi yang berharga.

Referensi

BIMCO/ISF. (2020). *Seafarer Workforce Report: The Global Supply and Demand for Seafarers*. Baltic and International Maritime Council.

Christiansen, M., Fagerholt, K., & Ronen, D. (2013). Ship routing and scheduling: Status and perspectives. *Transportation Science, 48*(1), 1–15.

Fagerholt, K., & Psaraftis, H. N. (2015). On the design of global maritime logistics service networks. *Maritime Economics & Logistics, 17*(4), 457–473.

Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2015). *Introduction to Operations Research* (10th ed.). McGraw-Hill Education.

Hooker, J. N. (2016). *Integrated methods for optimization*. Springer.

Hyeon, P. D., & Park, C. K. (2018). A study on the optimal crew size for maritime transportation. *Asian Journal of Shipping and Logistics, 34*(2), 65–72.

International Labour Organization. (2006). *Maritime Labour Convention (MLC) 2006*. ILO.

International Maritime Organization. (2011). *IMO Resolution A.1047(27): Principles of Safe Manning*. IMO.

Kelso, J. (2018). *Integer programming*. Springer.

Lin, Y. H., Chen, C. J., & Chen, C. C. (2018). Optimization of crew rotation for maritime transportation. *Journal of Marine Science and Engineering, 6*(3), 89–102.

Livingstone Divine Caesar. (2016). *Seafarer retention and career development in the maritime industry*. World Maritime University.

Meng, Q., Liu, Z., & Wang, S. (2016). Shipping operations and fleet deployment: A literature review. *Maritime Policy & Management, 43*(5), 598–628.

Miroshnik, V. (2012). *The global shortage of seafarers: Causes and implications*. Maritime Review.

Moejiono, Jinca, Gunawan, & Barata. (2025). Analyzing the impact of human element and human error on seafarer performance, mediated by safety culture: Case study Indonesian seafarer. *Journal of Cultural Analysis and Social Change, 10*(3), 977–986.

Moejiono. (2025). Optimizing ship guidance service time based on movement order fluctuations: An applied nonlinear analytics and markov chain analysis approach. *Edelweiss Applied Science and Technology, 9*(7), 2246–2252. https://doi.org/10.55214/2576-8484.v9i7.9143

Patchiappane, M., & Rengamani, J. (2018). Study on the demand and supply of seafarers and its impact on maritime industry. *Journal of Management, 5*(5), 63–72

Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 26 Tahun 2022 tentang Pengawakan Kapal Niaga.

Rehmat, A., & Lee, J. (2019). Maritime crew management: Optimization models and algorithms. *Maritime Policy & Management, 46*(3), 312–329.

United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations.

Vessel Finder. (2024). *AIS Ship Tracking*. https://www.vesselfinder.com/

Wang, K., Shao, Y., & Liu, C. (2022). Optimization model for ship crew scheduling considering competency requirements. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 158*, 102–118.

Zhen, L., Wu, Y., Wang, S., & Wu, D. (2019). Maritime crew scheduling with rest hour constraints. *Computers & Industrial Engineering, 137*, 106–118.

ISSN 2987-677x

Analisis Pemilihan Manajemen Air Ballas pada Kapal Secara Teknis dan Ekonomis

Rama Syahputra Simatupang [1] Andrew Joewono [1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ ramagoku43@gamil.com

✉ andrew_sby@ukwms.ac.id

Peraturan yang mengatur dan manajemen dari air ballas dikeluarkan oleh IMO (*International Maritime Organization*) melalui konvensi Manajemen air ballas. Konvensi tersebut menyatakan bahwa organisme yang berbahaya terhadap lingkungan, kesehatan manusia, properti atau sumber daya merusak keanekaragaman hayati atau mengganggu pemanfaatan terhadap suatu area jika dilepaskan di air laut. Pemerintah Republik Indonesia mengeluarkan Peraturan Presiden No. 132 tahun 2015 mengenai pengesahan Konvensi internasional untuk pengendalian dan manajemen air ballas dan sedimen dari kapal 2004 (*The International Convention for the control and management of ships ballast water and sediment's* 2004). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa sejauh mana kesiapan Indonesia dalam ratifikasi peraturan (*come into force*) *ballast water management* serta dampak yang diakibatkan setelah peraturan tersebut diratifikasi. Metode yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan 3 pendekatan yaitu dari aspek hukum, aspek teknis dan aspek ekonomis. Hasil dari penelitian ini adalah Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2010 tentang Perlindungan Lingkungan Maritim sebagai jabaran dari Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2008 tentang Pelayaran, telah sejalan dengan Konvensi Internasional untuk Pengendalian dan Manajemen Air Ballas dan Sedimen dari Kapal, 2004 dan Undang-Undang Nomor 17 Tahun 1985 tentang pengesahan *United Nations Convention on the LAW of the Sea* (UNCLOS). Serta, penggunaan sistem manajemen air ballas untuk kapal di perairan Indonesia lebih efektif dan efisien menggunakan *filtration + electrolysis.*

Kata kunci: peraturan, air ballas, manajemen air ballas, IMO, teknis, ekonomis

Pendahuluan

Kapal adalah alat angkut yang dinilai paling efektif dan terus bertumbuh yang digunakan hampir di seluruh dunia (Alghaffari & Yusuf, 2026; Perra & Boile, 2026; Schwartz & Urban, 2026). Keandalan kapal sebagai alat transportasi maupun pengiriman barang menjadikan kapal memegang peranan penting dalam ekonomi global, 80% perdagangan internasional masih dikuasai oleh transportasi laut (UNCTAD, 2021). Penggunaan kapal sebagai penggerak utama ekonomi dunia sebenarnya tidak terlepas dari dampak buruk lingkungan yang ditimbulkan. Penggunaan bahan bakar konvensional dari fosil memegang peranan dalam penipisan lapisan ozon hingga pemanasan global yang diakibatkan oleh pengoperasian kapal ini (Bach, 2026; Ayub et al., 2026).

Selain dampak buruk terhadap pencemaran udara, dampak buruk dari pengoperasian kapal adalah penggunaan air ballas ketika kapal bongkar atau muat. Air ballas sendiri adalah air yang digunakan untuk menjaga stabilitas kapal ketika kapal dengan dan tanpa muatan, stabilitas kapal ketika manuver, hingga menjaga integritas struktur kapal itu sendiri yang terletak pada bagian dasar struktur kapal (Arfelli et al., 2026; Gjedde et al., 2026a). Air ballas yang dibawa kapal dari satu daerah atau nagara lain ketika kapal bongkar atau muat menjadikan perubahan ekosistem biota laut yang signifikan dan pencemaran kimia di tempat kapal itu beroperasi (Gonz, 2026a). Perubahan ekosistem ini dibawa oleh kapal karena air laut di tempat kapal mengisi air ballas saat kapal sedang tidak ada muatan dan di tempat pembuangan ketika kapal penuh dengan muatan sudah berada di suatu wilayah dengan ekosistem laut yang berbeda.

Indonesia sendiri sebagai negara kepulauan yang memiliki lebih dari 17.000 pulau tentu saja kapal menjadi alat transportasi penghubung yang penting dalam pembangunan nasional berkelanjutan (Lestari et al., 2022; Utama et al., 2024; Sari et al., 2025), namun dampak buruk dari pengoperasian kapal tentu masih menjadi catatan tersendiri. Salah satu upaya pemerintah untuk mencegah penyebaran spesies asing yang bersifat *invasive* (*invasive alien species*) atau yang biasa disebut dengan organisme dan patogen akuatik yang berbahaya (*Harmful Aquatic Organism and Pathogens*) yaitu dengan cara mengendalikan dan manajemen dari air ballas dan sedimen kapal. Peraturan yang mengatur dan manajemen dari air ballas dikeluarkan oleh IMO (*International Maritime*

 ISSN 2987-677x

Organization) melalui konvensi manajemen air ballas pada tahun 2004 dan mulai diberlakukan untuk semua kapal yang mempergunakan air ballas mulai 8 September 2017 (Kurnianing et al., 2026). Konvensi tersebut menyatakan bahwa organisme diatas yang berbahaya terhadap lingkungan, kesehatan manusia, properti atau sumber daya merusak keanekaragaman hayati atau mengganggu air laut.

Terdapat 110 kapal berbendera Indonesia yang melakukan pelayaran ke luar negeri, jumlahnya lebih kecil dari kapal dari luar negeri yang melakukan pelayaran, singgah di pelabuhan di Indonesia (Badan Pusat Statistik, 2024). Pada tahun 2014 data dari Badan Pusat Statistik menunjukkan bahwa jumlah kunjungan kapal di Pelabuhan Indonesia, yang diusahakan dan tidak diusahakan yakni 863.036 unit. Informasi ini menunjukkan bahwa potensi terjadinya penyalahgunaan pembuangan air ballas dari kapal kapal yang berbendera asing lebih besar dari pada kapal berbendera Indonesia sehingga pemberlakuan konvensi internasional untuk pengendalian dan manajemen air ballas dan sedimen pada kapal tahun 2004 sangat penting.

Indonesia berencana untuk meratifikasi Konvensi internasional untuk pengendalian dan manajemen air ballas dan sedimen dari kapal 2004 sehingga semua kapal yang ada di Indonesia wajib (*enter into force*) untuk menerapkan *Ballast Water Management* (BMW). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa sejauh mana kesiapan Indonesia dalam penerapan peraturan *Ballast Water Management* serta dampak yang diakibatkan setelah peraturan tersebut diratifikasi.

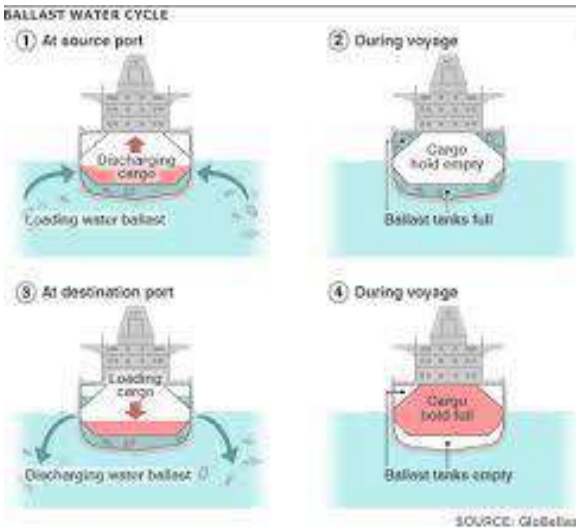
Cara kerja sistem ballas sendiri secara umum adalah untuk mengisi tangki ballas yang berada di *double bottom*, dengan air laut, yang diambil dari *sea chest*. Dalam perencanaannya adalah dengan memasukkan air sebagai bahan ballas agar posisi kapal dapat kembali pada posisi yang sempurna. Adapun komponen-komponen sistem ballas meliputi, *sea chest*, jalur pipa ballas, pipa yang melalui tangki, sistem perpipaan, pompa ballas, tangki ballas, jumlah dan jenis katup serta *fitting*, dan *outboard*.

Hal yang perlu diwaspadai dari invasif biologis adalah bermacam macam vektor yang bertambah selama beberapa dekade terakhir, ketika beberapa laporan invasi yang dilaporkan pada beberapa abad ini. Air ballas menjadi "tersangka utama" dari kejadian penyebaran vekor invasif biologis (Arfelli et al., 2026). Oleh karena itu konvensi BMW ini menetapkan pengaturan air ballas dalam 2 metode: D-1 mengganti air ballas kapal dengan air ballas yang baru dari air laut dengan jarak minimal 200Nm (200 *Nautical Miles*) dari garis pantai. D-2 membatasi mikroba hidup dan plankton yang mampu bereproduksi lebih cepat yang dibuang bersama air ballas (Gjedde et al., 2026b); (Gonz, 2026b). Beberapa contoh mikroorganisme yang bereproduksi lebih cepat yang ditransfer melalui air ballas kapal dan berdampak pada lingkungan adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Dampak Organisme dari Air Ballas

Organisme	Asal	Tempat Terinvasi	Dampak
Zebra Mussel	*Eastern Europe*	*Western/ Northern Europe, North America*	Menyumbat pipa asupan air, mepengaruhi ekologi asli, mempengaruhi irigasi
North Pacific Seastar	*Northern Pacific*	*Southern Australia*	Reproduksi yang cepat, mempengaruhi spesies asli
European Green Crab	*Europe*	*Southern Australia, South Africa, USA, Japan*	Outcompete kepiting asli, sangat invasif
Mitten Crab	*Northern Asia*	*Western Europe, Baltic sea, North America*	Mempengaruhi kegiatan penangkapan ikan, menyebabkan erosi tepi sungai, mempengaruhi spesies asli
Cholera	*Various strains*	*South America*	Epidemi kolera

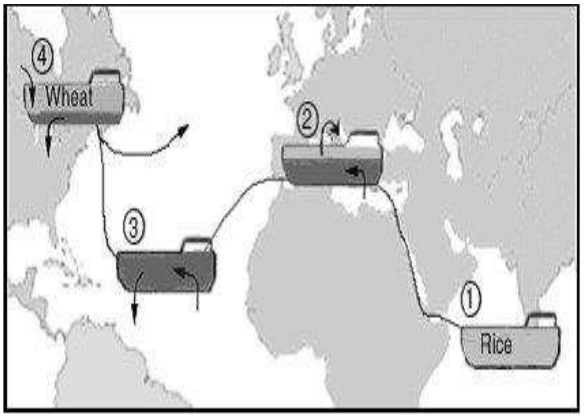
Dari Tabel 1 di atas menunjukkan bahwa dampak organisme asing di suatu perairan dapat membahayakan ekosistem di wilayah tersebut. Sesuai dengan efektivitas dan jumlah teknologi perawatan air ballas yang disetujui oleh IMO. IMO menghimbau kepada komunitas pelayaran untuk menggunakan pertukaran air ballas pada laut dalam selama pelayaran.



Gambar 1. Sistem Balas Kapal Menggunakan Air Laut

Seperti terlihat pada Gambar 1, bahwa ketika kapal-kapal barang seperti kapal kontainer atau *tanker* membongkar muatan, air laut dipompa ke dalam kompartemen di lambung kapal, sedang ketika mengangkut muatan, air laut di lambung kapal tadi dibuang ke laut. Air laut yang dipompakan ke lambung atau dibuang ke laut tadi berfungsi sebagai alat untuk menstabilkan dan menyeimbangkan kapal.

 ISSN 2987-677x



Gambar 2. Contoh Pertukaran Air Ballas di Dunia

Pada Gambar 2 mengilustrasikan lebih jelas tentang bagaimana pertukaran air balas terjadi. Sebuah kapal dari Lautan India berlayar melalui Terusan Suez, membongkar muatan di Mediterania sehingga kapal tersebut perlu mengisi tanki balas sebelum mengarungi Lautan Atlantik. Pertukaran air balas (*ballast water exchange*) terjadi di Lautan Atlantik sehubungan dengan akan masuk ke kawasan *Great Lakes*. Sehubungan dengan kapal mengangkut muatan terigu/ gandum, maka air balas dibuang ke laut. Dari aktifitas yang digambarkan di atas, di seluruh dunia ada kurang lebih 10 milyar ton meter kubik air balas yang ditransfer kapal setiap tahunnya. Permasalahannya, air tersebut mengandung ribuan spesies hewan laut maupun tanaman laut yang menimbulkan masalah bagi lingkungan laut, kesehatan manusia, serta mengancam ekonomi kelautan yang bergantung pada ekosistim laut yang sehat.

Metode Penelitian

Tipe Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian mengenai penerapan peraturan air ballas yang telah ditetapkan IMO dalam *The International Convention for the Control and Management of Ships Ballast Water and Sediment's* 2004 menggunakan pendekatan kepustakaan dan bahan bahan referensi lainnya yang berhubungan dengan eksistensi peraturan mengenai ratifikasi peraturan air ballas melalui Peraturan Presiden No. 132 tahun 2015 mengenai pengesahan Konvensi internasional untuk pengendalian dan manajemen air ballas dan sedimen dari kapal 2004.

Pendekatan

Pendekatan yang dilakukan dalam kajian ini adalah mengenai aspek hukum, aspek teknis dan aspek ekonomis apabila Indonesia meratifikasi peraturan IMO mengenai Konvensi internasional untuk pengendalian dan manajemen air ballas dan sedimen dari kapal 2004.

Aspek-Aspek yang Akan Dianalisa

1. Aspek Hukum
   Dalam aspek hukum yang akan dianalisis adalah kajian teoritis mengenai *The International Convention for the control and management of ships ballast water and sediment's* 2004 dan pentingnya ratifikasi pengesahan konvensi internasional untuk pengendalian dan manajemen air ballas dan sedimen dari kapal 2004 di Indonesia dan menganalisis peraturan yang mendukung maupun bertentangan serta sampai pada aspek pelaksanaannya seperti sanksi atau hukuman akibat pelanggaran manajemen air ballas.
2. Aspek Teknis
   Mempelajari aspek-aspek teknis yang dilakukan dalam ratifikasi konvensi internasional untuk pengendalian dan manajemen air ballas dan sedimen dari kapal 2004. Mulai dari metode primer dan sekunder yang digunakan, keuntungan dan kerugian dari masing masing metode, sampai aspek teknis pemasangan teknologi manajemen air ballas pada kapal. Adapun pemilihan teknologi yang dimaksud antara lain: *Current Ballast Water Treatment* (BWT), filtrasi, pemisahan cyclonic/ hydrocyclonic, *heat treatment*/perlakuan panas, radiasi ultraviolet, kavitasi (suara ultra), *electrocution*, *treatment magnetic*, subtansi aktif, dan menggunakan multikomponen.
3. Aspek Ekonomis
   Dalam ratifikasi konvensi internasional untuk pengendalian dan manajemen air ballas dan sedimen dari kapal 2004, terdapat *stake holder* yang berkepentingan disini salah satunya adalah pemilik kapal, sehingga perlu dianalisis dari segi ekonomis ratifikasi peraturan ini.

Hasil dan Pembahasan

Analisa Hukum

Air ballas yang mempunyai peran penting menjaga keseimbangan kapal dapat berfungsi sebagai vektor atau pembawa spesies asing yang berbahaya ketika air ballas tersebut dibuang di suatu area laut sehingga mengakibatkan gangguan terhadap spesies lokal atau terhadap keseimbangan ekosistem, merusak keanekaragaman hayati, menyebabkan gangguan terhadap lingkungan, kesehatan manusia, dan pemanfaatan secara ekonomi di area tersebut. Mengingat pemanfaatan laut yang begitu luas, kondisi perairan, dan ekosistem laut harus dilindungi dari kemungkinan perubahan yang merugikan.

Sebagai upaya mewujudkan perlindungan maritim, Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2010 tentang Perlindungan Lingkungan Maritim sebagai jabaran dari Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2008 tentang Pelayaran, telah sejalan dengan Konvensi Internasional untuk Pengendalian dan Manajemen Air Ballas dan Sedimen dari Kapal, 2004 dan Undang-Undang Nomor

 ISSN 2987-677x

17 Tahun 1985 tentang pengesahan *United Nations Convention on the LAW of the Sea* (UNCLOS). UNCLOS menyatakan bahwa setiap negara mempunyai hak berdaulat untuk pemanfaatan sumber-sumber kekayaan alamnya sesuai dengan kewajibannya untuk melindungi dan melestarikan lingkungan lautnya.

Sebagai bagian maritim dunia, Indonesia mempunyai kepentingan untuk menjaga kelestarian lingkungan maritimnya dengan menerapkan ketentuan Konvensi Internasional untuk Pengendalian dan Manajemen Air Ballas dan Sedimen Kapal, 2004 secara penuh. Ratifikasi konvensi tersebut memberikan kepastian hukum guna melindungi lingkungan maritim Indonesia dari HAOP (*Harmful Aquatic Organism and Pathogens*) atau IAS (*Invasive Alien Species*) akibat pembuangan air ballas. Pelaksanaan ketentuan konvensi tersebut akan memberikan penguatan terhadap upaya perlindungan lingkungan maritim Indonesia dan sebagai salah satu pihak dalam konvensi, Indonesia akan mendapat manfaat terkait penegakan hukum yang terstandar, hak berpartisipasi dalam pengajuan usulan terkait manajemen air ballas, serta kerjasama dalam pertukaran informasi mengenai riset dan inovasi teknologi baru.

Analisa Teknis

Menurut regulasi D-3 pada konvesi IMO (*International Maritime Organization*) *Ballast Water Management* menyatakan bahwa sistem teknologi perlakuan air ballas harus mendapatkan persetujuan oleh negara yang bersangkutan dan teknologi yang menggunakan zat aktif harus disetujui oleh IMO. Teknologi perlakuan air ballas dibedakan pada metode dan pengaplikasiannya, skalabilitas, lama waktu perlakuan air ballas (lama waktu pemusnahan dan aman untuk pembuangan), kebutuhan daya yang digunakan, efek yang ditimbulkan terhadap system kapal, struktur maupun terhadap lingkungan, faktor keselamatan, dan biaya untuk pemasangan serta operasional. Metode perlakuan air ballas terbagi menjadi tiga cara, yakni secara mekanis (*filtration* dan *hydroclonic separation*, fisik (UV *radiation* dan *deoxidation*), dan kimiawi (*ozonation, chlorination* dan *electrolysys*). Masing-masing teknologi perlakuan air ballas tersebut memiliki karakteristik yang berbeda-beda.

Dengan memperhatikan perbedaan dan batasan pada masing-masing teknologi serta mempertimbangkan ketersedian teknologi tersebut pada pasar, merupakan langkah awal untuk melakukan pemilihan teknologi perlakuan air ballas yang akan diapikasikan. Pemilihan teknologi perlakuan air ballas umumnya menggabungkan dua jenis metode, dimana metode pertama difungsikan untuk proses filtrasi (mekanis) terhadap spesies yang ukurannya lebih dari 50 µm dan metode kedua difungsikan untuk perlakuan terhadap spesies yang lebih kecil dan juga berfungsi sebagai disinfektan. Disinfektan dapat menggunakan teknologi kimiawi maupun teknologi yang bersifat fisik. Pada saat ini ada berbagai macam teknologi perlakuan air ballas yang dikembangkan oleh masing-masing negara di dunia. Diantara banyaknya teknologi, yang menggunakan zat aktif merupakan teknologi yang memberikan informasi yang terpercaya berdasarkan laporan penilaiannya.

Analisa Ekonomis

Selain aspek teknis yang dianalisis untuk pemilihan sistem teknologi perlakuan air ballas, juga harus mempertimbangkan pada aspek ekonomis. Analisis ekonomis dilakukan dengan menganalisa biaya instalasi dan operasional masing-masing sistem dengan merujuk pada pihak industri pembuat sistem teknologi tersebut. Analisa ekonomi yang akan dilakukan adalah merencanakan anggaran biaya yang harus dikeluarkan meliputi biaya investasi dan biaya operasional. Biaya investasi mencakup biaya pengadaan barang dan peralatan dan biaya pembangunan. Sedangkan biaya operasional di sini mencakup biaya operasi dan biaya perawatan.

Dalam merancang pemilihan pengolahan air ballas ada beberapa factor atau pertimbangan yang harus diperhatikan, yaitu debit, tenaga yang dibutuhkan, dan ukuran peralatan. Untuk laju alir pengolahan air ballas sebaiknya sesuai atau melebihi kapasitas yang tersedia oleh pompa yang sudah terpasang agar sistem perawatannya bekerja dengan baik. Konsumsi daya pada peralatan juga merupakan pertimbangan awal pemasangan, karena jika daya dari generator tidak mencukupi maka perlu mengganti genset. Ukuran peralatan juga harus disesuaikan dengan ruang yang tersedia sehingga jika tidak tersedia cukup ruang.

Kesimpulan

Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2010 tentang Perlindungan Lingkungan Maritim sebagai jabaran dari Undang- Undang Nomor 17 Tahun 2008 tentang Pelayaran, telah sejalan dengan Konvensi Internasional untuk Pengendalian dan Manajemen Air Ballas dan Sedimen dari Kapal, 2004 dan Undang-Undang Nomor 17 Tahun 1985 tentang pengesahan *United Nations Convention on The LAW of The Sea* (UNCLOS).

Ucapan Terimakasih

Kami ingin menyampaikan rasa terima kasih kami kepada Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya dan Politeknik Niaga Surabaya.

Referensi

Alghaffari, S., & Yusuf, N. (2026). Transportation research interdisciplinary perspectives export structure as a determinant of maritime trade risk: The mitigating role of shipping connectivity. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, *36*, 101909. https://doi.org/10.1016/j.trip.2026.101909

 ISSN 2987-677x

Arfelli, F., Amat, A. M., Santos-Juanes, L., & Cespi, D. (2026). Minimizing marine pollution transfer via ballast water: AOP-based chemical decontamination, efficiency comparison, and LCA study. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 14*, 122301. https://doi.org/10.1016/j.jece.2026.122301

Ayub, A., Alam, S., Patchigolla, K., Awoyomi, A., Skovsgaard, M., Wilson, S., Kerr, J., Surplus, D., Picking, H., Harrison, J., Garner, J., McFadden, E., & Kyle, N. (2026). Towards greener shipping: Thermodynamic modelling and feasibility of methanol reforming, CO_2 capture and port-side CO_2 utilisation for UK maritime corridors. *Journal of CO_2 Utilization, 106*, 103374. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2026.103374

Bach, H. (2026). Full steam astern? Sustainable retro-innovation in the maritime shipping sector. *Environmental Innovation and Societal Transitions, 60*, 101139.
https://doi.org/10.1016/j.eist.2026.101139

Badan Pusat Statistik. (2024). *Statistik Transportasi Laut 2024*. https://www.bps.go.id/id/publication/2025/12/01/fdc6de7c2b34aa9b109edcad/statistik-transportasi-laut-2024.html

Gjedde, P., Kramel, D., Pettersen, J. B., Hammer, A., & Verones, F. (2026). The impact of invasions from ballast water: A life cycle impact assessment method. *Journal of Environmental Management, 404*, 129449. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.129449

Gonz, E. (2026). Effects of UV-LED irradiation on decapod crustacean larval mortality, motility, and respiration: Implications for ballast water treatments and invasive species management. *Marine Pollution Bulletin, 225*, 119238. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2026.119238

Kurnianing, D., Arief, M., & Sila, A. (2026). Bibliometric review of ballast water management within the framework of the circular economy. *Cleaner Water, 5*, 100213. https://doi.org/10.1016/j.clwat.2026.100213

Lestari, F., Adiwibowo, A., Kadir, A., & Aulia, N. (2022). Validating the 6-year (2016–2021) anthropogenic-induced small island wildfire hazards in Pulau Seribu archipelago, Indonesia. *Progress in Disaster Science, 14*, 100236. https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2022.100236

Perra, V., & Boile, M. (2026). Envisioning AI for international cooperation in maritime transport: Conceptual insights from short sea shipping and maritime spatial planning. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 36*, 101819. https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101819

Sari, H., Eko, M., Attorik, M., Fadel, M., & Parluhutan, R. (2025). Capital city status and policy influence on land dynamics: A case study of Sofifi, North Maluku Archipelago, Indonesia. *City and Environment Interactions, 28*, 100253. https://doi.org/10.1016/j.cacint.2025.100253

Schwartz, H., & Urban, F. (2026). Decarbonizing maritime shipping: A comparative analysis of sustainable energy transitions in Finland and Sweden. *Energy Research & Social Science, 136*, 104714. https://doi.org/10.1016/j.erss.2026.104714

UNCTAD. (2021). *Review of Maritime Transport 2021*. https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2021

Utama, D. R., Hamsal, M., Abdinagoro, S. B., & Rahim, R. K. (2024). Developing a digital transformation maturity model for port assessment in archipelago countries: The Indonesian case. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 26*, 101146. https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101146

 ISSN 2987-677x

Metode Pelaksanaan Pemasangan Gondola Permanen di Apartemen Westown View Surabaya

Hery Prasetiyo[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ heryprasetiyo.4224@gmail.com

Seiring dengan kebutuhan tempat tinggal yang nyaman bagi masyarakat khususnya area Surabaya Barat, maka Apartemen Westown View Surabaya menyediakan hunian vertikal modern, sehat, dan strategis di Surabaya Barat bagi mahasiswa dan pekerja. Menawarkan konsep *tropical architecture* dengan fasiltas *beach garden* dan *gym in the sky* untuk meningkatkan kualitas hidup serta memberikan nilai investasi tinggi. Untuk perawatan fasade gedung apartemen maka diperlukan Gondola Permanen untuk membersihkan dan perbaikan fasade gedung yang memiliki ketinggian 45 lantai yang tidak mungkin menggunakan perancah dari bawah. Pemasangan Gondola Permanen diperlukan koordinasi serta sinergi antara perencana, pelaksana, engineer, *safety officer* dan medis. Pemasangan Gondola Permanen pada ketinggian di atap gedung 45 lantai memerlukan proses pabrikasi yang presisi, perlengkapan K3 yang lengkap, metode pengangkatan dan pemasangan menggunakan *tower crane* dengan memperhatikan faktor kecepatan angin yang tidak dipebolehkan lebih dari 20 knot, dan pemeriksaan kesehatan secara berkala pada tim yang terlibat serta pengawasan *safety rescue* yang siap siaga saat pelaksanaan pekerjaan.

Kata kunci : Gondola Permanen, Metode Pelaksanaan, K3

Pendahuluan

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan hunian yang nyaman dan layak, khususnya di kawasan Surabaya Barat, Apartemen Westown View Surabaya hadir sebagai salah satu alternatif hunian vertikal yang modern, sehat, dan memiliki nilai strategis. Apartemen ini dirancang untuk memenuhi kebutuhan tempat tinggal bagi mahasiswa maupun pekerja, dengan mengusung konsep *tropical architecture* yang menitikberatkan pada kenyamanan termal, pencahayaan alami, serta sirkulasi udara yang baik. Selain itu, fasilitas pendukung seperti *beach garden* dan gym in the sky turut dihadirkan guna meningkatkan kualitas hidup penghuni sekaligus memberikan daya tarik investasi yang kompetitif.

Apartemen Westown View Surabaya, khususnya Tower La Chiva, memiliki ketinggian mencapai 45 lantai dengan variasi tipe *unit*, yaitu tipe Studio, 1 *Bedroom*, dan 2 *Bedroom*. Bangunan ini juga dilengkapi dengan fasilitas *Beach Garden* yang terletak di lantai 8, yang difungsikan sebagai area rekreasi dan relaksasi bagi penghuni.

Seiring dengan tingginya bangunan serta kompleksitas desain *fasade*, aspek perawatan gedung menjadi hal yang sangat krusial dan tidak dapat diabaikan. *Fasade* merupakan bagian terluar bangunan yang secara langsung terpapar oleh kondisi lingkungan seperti hujan, panas, debu, serta polusi udara. Tanpa perawatan yang rutin dan sistematis, kondisi *fasade* dapat mengalami penurunan kualitas, baik dari segi estetika maupun kinerja materialnya, yang pada akhirnya dapat mempengaruhi nilai bangunan secara keseluruhan.

Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem perawatan yang efektif, efisien, dan aman, yaitu melalui pemasangan gondola permanen. Penggunaan gondola menjadi solusi yang paling tepat untuk bangunan bertingkat tinggi seperti Apartemen Westown View Surabaya, karena mampu menjangkau seluruh area fasade hingga ketinggian 45 lantai dengan tingkat fleksibilitas yang tinggi. Berbeda dengan metode konvensional seperti perancah (*scaffolding*), yang tidak hanya memerlukan waktu pemasangan yang lama tetapi juga kurang efisien dan berisiko pada bangunan tinggi, gondola menawarkan kemudahan dalam mobilisasi serta dapat digunakan secara berulang untuk kegiatan pembersihan maupun perbaikan.

Gondola permanen sendiri merupakan alat kerja berbasis sistem *building maintenance unit* (BMU) yang terdiri dari beberapa komponen utama, seperti *platform* kerja (keranjang), sistem penggerak (*hoist*), tali baja (*wire rope*), serta mekanisme rel atau jib yang terpasang di atap bangunan. Alat ini dirancang khusus untuk mendukung pekerjaan pada ketinggian, seperti pembersihan kaca, inspeksi *fasade*, hingga perbaikan elemen eksterior bangunan. Dengan sistem yang terintegrasi dan dilengkapi fitur keselamatan, penggunaan gondola tidak hanya meningkatkan efektivitas pekerjaan, tetapi juga meminimalkan risiko kecelakaan kerja.

Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, konsep hunian vertikal seperti ini juga sejalan dengan tujuan *Sustainable Development Goals* (SDGs),

 ISSN 2987-677x

khususnya tujuan ke-11 yaitu *Sustainable Cities and Communities*, yang menekankan pentingnya penyediaan hunian yang aman, inklusif, dan berkelanjutan. Penerapan desain bangunan yang memperhatikan aspek kenyamanan lingkungan dan efisiensi ruang merupakan bagian dari upaya mendukung terciptanya kota yang berkelanjutan. Selain itu, dari sisi infrastruktur, pembangunan gedung bertingkat tinggi dengan sistem pemeliharaan yang terencana juga berkaitan dengan SDG ke-9 (*Industry, Innovation, and Infrastructure*), yang menekankan pentingnya pengembangan infrastruktur yang tangguh, berkelanjutan, serta berbasis inovasi teknologi.

Selain itu, perawatan bangunan yang optimal juga berkontribusi terhadap prinsip keberlanjutan, khususnya dalam memperpanjang umur bangunan dan mengurangi kebutuhan renovasi besar yang berpotensi meningkatkan limbah konstruksi. Hal ini sejalan dengan tujuan SDGs ke-12 yaitu *Responsible Consumption and Production*, yang menekankan efisiensi penggunaan sumber daya serta pengurangan limbah dalam siklus hidup bangunan. Lebih lanjut, pemeliharaan bangunan yang baik juga berkaitan dengan SDG ke-13 (*Climate Action*), karena perawatan *fasade* yang optimal dapat membantu mempertahankan kinerja material bangunan, termasuk dalam efisiensi energi seperti pengendalian panas dan pencahayaan alami, sehingga berpotensi mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon dari bangunan.

Dengan demikian, pemasangan gondola permanen pada Apartemen Westown View Surabaya merupakan kebutuhan yang sangat penting dan strategis dalam mendukung kegiatan operasional serta pemeliharaan bangunan jangka panjang. Selain menjaga kualitas dan estetika *fasade*, keberadaan gondola juga berperan dalam mempertahankan nilai investasi properti agar tetap optimal seiring waktu serta mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan yang selaras dengan tujuan SDGs, khususnya SDG 9, SDG 11, SDG 12, dan SDG 13

Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas rumusan masalah adalah bagaimana metode pelaksanaan pemasangan konstruksi Gondola Permanen di atas ketinggian gedung 45 lantai di atas permukaan tanah pada Gedung Apartemen Westown View Surabaya.

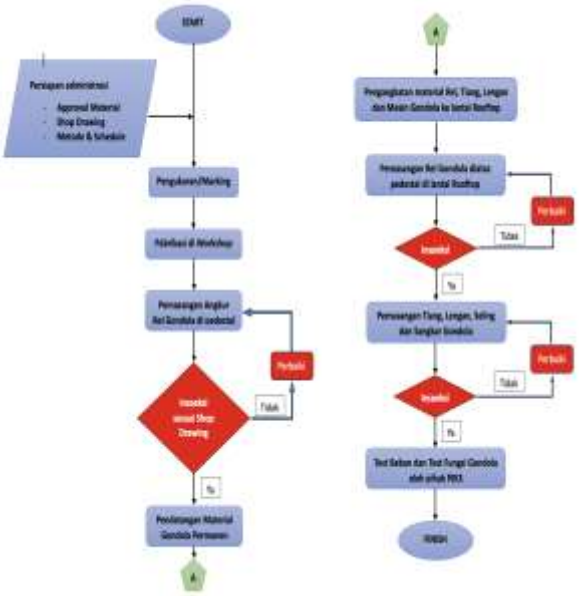
Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah pelaksanaan pemasangan Gondola Permanen di atap *roof top* bangunan gedung Apartemen Westown View Tower La Chiva dengan ketinggian 45 lantai.



Gambar 1. Apartemen Westown View Tower La Chiva Surabaya

Metode



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

Pekerjaan Persiapan

Pertama, dilakukan pekerjaan persiapan yang meliputi pembuatan *shopdrawing* serta melalukan *review* pekerjaan Gondola Permanen serta berkoordinasi dengan *stakeholder* yang terlibat dalam pelaksanaan. Selain itu juga dilakukan pekerjaan *joint survey* pemasangan angkur gondola untuk menentukan posisi rel gondola. Pekerjaan ini dilaksanakan sesuai dengan gambar *shop drawing* yang telah disepakati bersama.

Pekerjaan Pabrikasi di *Workshop* Subkontraktor

Setelah pekerjaan persiapan selesai, maka selajutnya dilaksanakan pekerjaan pabrikasi di *workshop* subkontraktor yang ahli pada bidang pekerjaan gondola sesuai dengan gambar *shop drawing* dan segmen rel gondola yang disetujui oleh konsultan

 ISSN 2987-677x

MK. Untuk pabrikasi yang dilakukan di *workshop* merupakan pabrikasi rel dan komponen material gondola permanen sesuai dengan *shopdrawing* dan dilaksanakan pemeriksaan mutu oleh tim *Quality Control* dan tim pengawas MK.

Pemasangan Rel Gondola Permanen

Pekerjaan ini dilakukan sesuai dengan gambar *shop drawing* yang telah disetujui oleh konsultan MK. Perhatian khusus dalam pemasangan rel gondola harus sesuai dengan posisi angkur dan *baseplate* rel gondola yang telah terpasang dan dicek elevasi kelurusannya. Setelah rel gondola di *setting* sesuai dengan posisinya, maka sambungan antar rel akan di las untuk menyambung bagian rel. Setelah dilas selanjutnya dilaksanakan tes *penetran* untuk mengecek kualitas las penyambungan rel gondola tersebut.



Gambar 3. Tes Penetran Rel Gondola Permanen

Pemasangan Gondola Permanen

Setelah rel gondola dipasang, maka selanjutnya dilaksanakan pemasangan dudukan (*slewing*), tiang (*tower*) dan lengan (*arm*) gondola. Pemasangan dudukan, tiang dan lengan gondola permanen menggunakan *Tower Crane*. Sebelum pengangkatan dikoordinasikan terkait dengan beban berat peralatan yang akan diangkat dengan kapasitas angkat *Tower Crane* tersebut.



Gambar 4. Pemasangan Tiang (*Tower*) Gondola

Pekerjaan Sambungan

Setelah rangkaian dudukan, tiang dan lengan gondola terpasang, maka selanjutnya dilaksanakan test torsi pada sambungan untuk memastikan pekerjaan sambungan tiang dan lengan gondola telah dipasang sempurna sesuai dengan perencanaan. Pengecekan wajib dilaksanakan untuk memastikan keselamatan pemakaian gondola permanen tersebut.



Gambar 5. Tes Torsi Sambungan Gondola Permanen

Tabel 1. *Standart Tightening Torque*

No	TYPE BOLT	TARGET TORQUE	ACCURACY	TRQ min	TRQ max
		Nm	+ (%)	Nm	Nm
1	M4	1	3	0.97	1.03
2	M5	02.05	3	2.425	2.575
3	M5	3	3	2.91	3.09
4	M6	05.02	3	5.044	5.356
5	M8	12.05	3	12.125	12.875
6	M10	24.05.00	3	23.765	25.235
7	M12	42	3	40.74	43.26
8	M16	106	3	102.82	109.18
9	M18	146	3	141.62	150.38
10	M20	204	3	197.88	210.12
11	M24	360	3	349.42	370.8
12	M30	700	3	679	721
13	M36	1240	3	1202.8	1277.2
14	M42	2000	3	1940	206-0
15	M48	2950	3	2861.5	3038.5
16	M56	4800	3	4656	4944
17	M64	8800	3	8536	9064

Pekerjaan Pemasangan *Seling* dan Sangkar Gondola

Pemasangan *seling* gondola yang terbuat dari material baja, untuk panjang seling harus memperhatikan ketinggian gedung, dikarenakan gondola permanen akan di fungsikan untuk melayani sampai lantai dasar. Setelah *seling* terpasang maka selanjutkan dilaksanakan pemasangan sangkar gondola permanen yang mempunyai kapasitas untuk 2 orang operator atau berat maksimal 250 kg.



Gambar 6. Pemasangan *Seling* dan Sangkar Gondola

 ISSN 2987-677x

Pekerjaan Tes Beban dan Tes Fungsi oleh PJK3

Sebelum gondola dipergunakan, harus melalui tahap pengetesan beban dan tes fungsi oleh pihak Perusahaan Jasa Keselamatan dan Kesehatan Kerja (PJK3). Tahapan pengetesan ini wajib dilaksanakan oleh pihak PJK3 untuk keselamatan penggunaan gondola permanen, dan nantinya akan mendapatkan Sertifikasi Layak Operasi (SLO) yangmana menjadi salah satu persyaratan Sertifikat Layak Fungsi (SLF) bangunan Apartemen Westown View Surabaya.



Gambar 7. Reksa Uji PJK3 Gondola Permanen

Hasil Kerja

Metode yang digunakan dalam pemasangan Gondola Permanen di Apartemen Westown View Surabaya sangat kompleks tingkat ketelitian dan pelaksanaannya. Berdasarkan uraian diatas pekerjaan pemasangan rel dan gondola membutuhkan koordinasi yang tepat agar pemasangan gondola permanen dapat dikerjakan sesuai dengan perencanaan. Serta dibutuhkan keahlian operator *tower crane* dalam pelaksanaan mengangkat tiang dan lengan gondola tersebut.

Material Gondola yang berat dan faktor angin mempengaruhi proses pelaksanaan pemasangan gondola tersebut. Berkaitan permasalahan tersebut pekerjaan pemasangan gondola permanen dibagi menjadi beberapa segmen. Segmen pertama material rel gondola dengan kondisi terpisah-pisah untuk mempermudah pengangkatan oleh *tower crane*. Selanjutnya per bagian rel gondola akan di setting dan disambung menggunakan metode pengelasan.

Material gondola seperti dudukan (*slewing*), tiang (*tower*) dan lengan (*arm*) gondola diangkat menggunakan *tower crane* ke lantai atap, setelah itu material dudukan (*slewing*) disetting diatas rel gondola menggunakan *tower crane*, setelah itu dilanjutkan pemasangan tiang (*tower*) dan lengan (*arm*) gondola. Pemasangan Gondola Permanen pada ketinggian gedung 45 lantai dipengaruhui juga oleh kondisi lingkungan yaitu kondisi angin. Sebelum operator *tower crane* melaksanakan pengangkatan diperlukan koordinasi dengan *engineer*, pengawas lapangan (MK) dan tim *safety* yang bertugas untuk memastikan kecepatan angin tidak lebih dari 20 knot (persyaratan K3).



Gambar 9. Pemasangan Gondola Permanen Apartemen Westown View Surabaya

Kesimpulan

Berdasarkan hasil kerja di atas dalam metode pelaksanaan pemasangan gondola permanen pada ketinggian gedung 45 lantai, memerlukan koordinasi serta sinergi antara perencana, pelaksana lapangan, *engineer*, *safety* dan tim medis. Pemasangan Gondola Permanen pada ketinggian di atap gedung 45 lantai memerlukan proses pabrikasi yang presisi, perlengkapan K3 yang lengkap, metode pengangkatan dan pemasangan menggunakan *tower crane* dengan memperhatikan faktor kecepatan angin yang tidak dipebolehkan lebih dari 20 knot, dan pemeriksaan kesehatan secara berkala pada tim yang terlibat serta pengawasan *safety rescue* yang siap siaga saat pelaksanaan pekerjaan.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta bimbingan dalam penyusunan laporan ini, khususnya kepada pihak *owner*, konsultan perencana, konsultan pengawas, kontraktor pelaksana dan subkontraktor gondola. Ketua Program Studi dan Dosen Pembimbing yang memberikan bimbingan, arahan, serta motivasi selama penyusunan laporan ini.

Referensi

BS EN 1808. (2015). *Safety requirements for suspended access equipment*. British Standards Institution.

Brown, L., & Davis, K. (2019). *Construction equipment and site planning* (4th ed.). McGraw-Hill.

International Labour Organization. (2018). *Safety and health in construction*. ILO Publications.

Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia No. 9 Tahun 2016 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja dalam Pekerjaan pada Ketinggian.

Smith, J. A. (2020). *Building maintenance systems for high-rise structures*. Routledge.

ISSN 2987-677x

Analisis dan Pengembangan Sistem *Maintenance* untuk Meningkatkan Efektivitas Operasional pada Industri Perhiasan Emas dan Logam Mulia di PT Untung Bersama Sejahtera

Yanata Chandra[1] Herry Gunawan[2] Aucy Chandra[2] Julius Mulyono[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2] Corporate Management, PT Untung Bersama Sejahtera

✉ chandra.yanata@gmail.com
✉ herry@ubsgold.com
✉ aucy_chandra@yahoo.co.id
✉ juliusnyamulyono@ukwms.ac.id

Pengelolaan *maintenance* merupakan salah satu faktor penting dalam menjaga keandalan mesin dan kelancaran operasional pada industri manufaktur perhiasan emas dan logam mulia. Namun, sistem *maintenance* yang masih bersifat manual dan belum terintegrasi seringkali menimbulkan berbagai permasalahan, seperti keterbatasan pencatatan data, penjadwalan *preventive maintenance* yang tidak konsisten, serta rendahnya visibilitas terhadap aktivitas perawatan. Studi kasus ini bertujuan untuk menganalisis kondisi sistem *maintenance* yang berjalan serta mengembangkan usulan perbaikan untuk meningkatkan efektivitas operasional di PT Untung Bersama Sejahtera. Metode yang digunakan meliputi observasi lapangan, wawancara, studi dokumentasi, serta analisis deskriptif, komparatif, dan sebab-akibat *(cause and effect analysis)*. Hasil analisis menunjukkan bahwa permasalahan utama disebabkan oleh ketidakterpaduan sistem, metode kerja yang belum terstandarisasi, serta keterbatasan dalam pengelolaan data. Selain itu, kurangnya integrasi antar fungsi menyebabkan informasi tidak terdokumentasi secara optimal dan sulit digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan. Berdasarkan hasil tersebut, dikembangkan usulan sistem maintenance terintegrasi berbasis *Computerized Maintenance Management System (CMMS)* yang mampu meningkatkan kualitas pencatatan, efektivitas penjadwalan, serta monitoring aktivitas secara *real-time*. Implementasi sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi operasional, mendukung pengambilan keputusan berbasis data, serta memperkuat pengelolaan keselamatan kerja dan lingkungan.

Kata kunci: *maintenance*, CMMS, *preventive maintenance*, *monitoring*, sistem terintegrasi

Pendahuluan

Perkembangan industri manufaktur yang semakin kompleks menuntut perusahaan untuk memiliki sistem pengelolaan operasional yang efektif dan efisien, termasuk dalam aspek *maintenance* mesin. Pada industri perhiasan emas dan logam mulia, keandalan mesin memiliki pengaruh langsung terhadap produktivitas, kualitas produk, serta kelancaran proses produksi. Oleh karena itu, pengelolaan *maintenance* menjadi salah satu aspek penting dalam mendukung efektivitas operasional perusahaan.

PT Untung Bersama Sejahtera merupakan perusahaan manufaktur perhiasan emas dan logam mulia yang memiliki jumlah mesin produksi yang besar dan tersebar di berbagai departemen. Dalam operasional sehari-hari, aktivitas *maintenance* melibatkan Departemen Produksi dan Departemen Maintenance. Namun demikian, sistem pengelolaan *maintenance* yang berjalan saat ini masih didominasi oleh proses manual, seperti pencatatan menggunakan sistem lokal MTN, dokumen fisik, *file spreadsheet*, serta komunikasi melalui media informal. Kondisi tersebut menyebabkan data *maintenance* tidak terdokumentasi secara terpusat dan sulit ditelusuri kembali.

Selain itu, pelaksanaan *preventive maintenance* belum dilakukan secara konsisten dan masih terbatas pada mesin tertentu. Keterbatasan sistem pencatatan menyebabkan perusahaan belum memiliki data historis yang memadai untuk melakukan analisis kinerja mesin, seperti *Mean Time Between Failure (MTBF), Mean Time To Repair (MTTR),* maupun tingkat *downtime*. Kondisi ini berdampak pada rendahnya visibilitas aktivitas *maintenance* dan keterbatasan dalam pengambilan keputusan berbasis data.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu analisis terhadap sistem *maintenance* yang berjalan untuk mengidentifikasi permasalahan dan menentukan solusi yang tepat dalam meningkatkan efektivitas operasional perusahaan. Oleh karena itu, studi ini dilakukan untuk menganalisis kondisi eksisting sistem *maintenance* serta mengembangkan rekomendasi solusi pengembangan sistem *maintenance* untuk PT Untung Bersama Sejahtera.

Metode

Studi ini menggunakan pendekatan deskriptif dengan metode pengumpulan data melalui observasi lapangan, wawancara, dan studi dokumentasi. Observasi dilakukan untuk memahami kondisi aktual

 ISSN 2987-677x

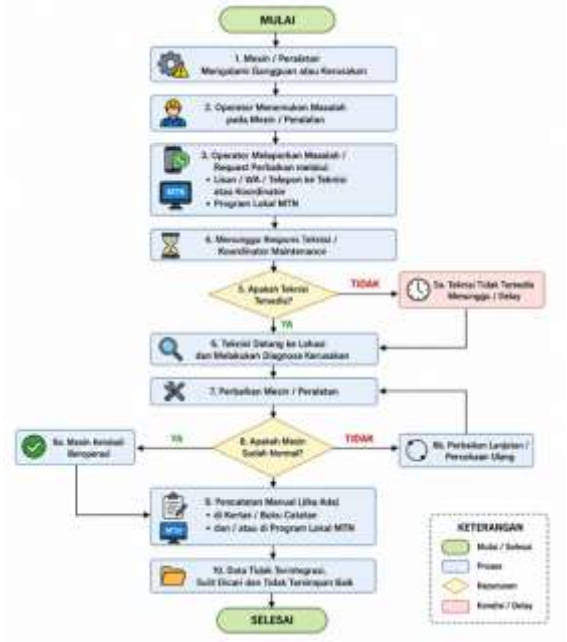
aktivitas *maintenance*, sedangkan wawancara dilakukan dengan teknisi *maintenance*, operator produksi, dan pihak terkait lainnya guna memperoleh informasi mengenai kendala operasional yang terjadi. Selain itu, studi dokumentasi dilakukan terhadap data histori perawatan mesin, laporan kerusakan, serta dokumen pendukung lainnya. Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif, komparatif, dan analisis sebab-akibat *(cause and effect analysis).*

Analisis komparatif dilakukan dengan membandingkan kondisi eksisting dengan praktik *maintenance* yang ideal berdasarkan teori dan studi terdahulu. Sementara itu, analisis sebab-akibat digunakan untuk mengidentifikasi faktor utama yang mempengaruhi efektivitas sistem *maintenance*, baik dari aspek manusia, metode, mesin, maupun sistem yang digunakan.

Hasil Kerja

Kondisi Eksisting Sistem *Maintenance*

Hasil observasi menunjukkan bahwa sistem *maintenance* di PT Untung Bersama Sejahtera masih didominasi oleh proses manual dan belum terintegrasi secara menyeluruh. Aktivitas pelaporan kerusakan, penugasan pekerjaan, serta pencatatan hasil perbaikan dilakukan melalui berbagai media yang berbeda. Kondisi ini menyebabkan alur informasi menjadi tidak terstruktur dan menyulitkan proses *monitoring* maupun evaluasi.



Gambar 1. Alur Proses *Maintenance* Eksisting

Koordinasi antara Departemen Produksi dan Departemen *Maintenance* juga masih berjalan secara parsial sehingga sering terjadi keterlambatan dalam penyampaian informasi maupun penanganan kerusakan mesin. Selain itu, pelaksanaan *preventive maintenance* belum berjalan secara konsisten dan masih didominasi oleh pendekatan *corrective maintenance*.

Selain itu, sistem pencatatan yang belum terintegrasi menyebabkan histori pekerjaan *maintenance* tersebar di berbagai media dan sulit ditelusuri kembali secara cepat. Kondisi tersebut menyebabkan proses evaluasi kerusakan mesin menjadi kurang efektif karena data historis tidak tersedia secara lengkap dan konsisten. Akibatnya, perusahaan mengalami keterbatasan dalam melakukan analisis pola kerusakan maupun evaluasi efektivitas aktivitas *maintenance* yang telah dilakukan.

Dalam beberapa kondisi, keterlambatan informasi terkait kerusakan mesin juga menyebabkan proses penanganan menjadi kurang optimal. Hal ini terjadi karena komunikasi antar bagian masih bergantung pada koordinasi manual dan belum didukung oleh sistem *monitoring* yang terpusat. Dampaknya, proses penjadwalan pekerjaan dan distribusi tugas teknisi menjadi kurang terkontrol.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem *maintenance* yang berjalan masih memiliki ketergantungan yang tinggi terhadap komunikasi personal dan dokumentasi manual. Apabila tidak dilakukan pengembangan sistem yang lebih terintegrasi, maka potensi terjadinya ketidakefisienan operasional dan kehilangan informasi akan semakin meningkat seiring bertambahnya kompleksitas operasional perusahaan.

Analisis Kesenjangan dan Akar Permasalahan

Berdasarkan hasil analisis, ditemukan adanya kesenjangan yang cukup signifikan antara kondisi eksisting dengan praktik pengelolaan *maintenance* yang ideal. Sistem yang berjalan belum mampu menyediakan data yang terstruktur sehingga perusahaan mengalami kesulitan dalam melakukan analisis kinerja mesin dan pengambilan keputusan berbasis data. Selain itu, keterbatasan dalam *monitoring* aktivitas menyebabkan visibilitas terhadap pekerjaan teknisi menjadi rendah. Untuk mengidentifikasi akar permasalahan, dilakukan analisis sebab-akibat.



Gambar 2. Diagram *Fishbone* Pengelolaan *Maintenance*

Hasil analisis menunjukkan bahwa faktor sistem dan metode kerja menjadi penyebab dominan yang

 ISSN 2987-677x

mempengaruhi efektivitas pengelolaan *maintenance*. Dari aspek metode kerja, belum terdapat standar alur proses *maintenance* yang terdokumentasi secara menyeluruh mulai dari pelaporan kerusakan hingga penyelesaian pekerjaan. Kondisi ini menyebabkan setiap teknisi memiliki pola pencatatan dan pelaporan yang berbeda-beda. Akibatnya, kualitas informasi yang dihasilkan menjadi tidak seragam dan menyulitkan proses *monitoring* maupun evaluasi.

Dari aspek sistem, keterbatasan integrasi data menyebabkan perusahaan belum memiliki *dashboard* atau media *monitoring* yang mampu menampilkan status pekerjaan secara *real-time*. Informasi terkait progres pekerjaan, histori mesin, maupun jadwal *preventive maintenance* masih tersebar di berbagai media sehingga sulit dipantau secara cepat dan akurat. Kondisi ini menyebabkan visibilitas terhadap aktivitas *maintenance* menjadi rendah.

Sementara itu, dari aspek manusia, pemahaman terhadap pentingnya pencatatan data *maintenance* masih belum berjalan secara konsisten di seluruh bagian. Aktivitas pencatatan masih dianggap sebagai pekerjaan administratif tambahan sehingga kelengkapan data seringkali belum menjadi prioritas utama. Hal ini menunjukkan bahwa pengembangan sistem juga perlu didukung dengan peningkatan disiplin dan kesadaran dalam pengelolaan data operasional.

Evaluasi Alternatif Solusi

Berdasarkan hasil analisis kondisi eksisting dan identifikasi akar permasalahan, disusun beberapa alternatif solusi untuk meningkatkan efektivitas sistem *maintenance* di PT Untung Bersama Sejahtera. Evaluasi dilakukan dengan mempertimbangkan kebutuhan operasional perusahaan, kemudahan implementasi, kemampuan integrasi data, efektivitas *monitoring*, serta potensi pengembangan sistem dalam jangka panjang. Pendekatan ini dilakukan agar solusi yang dipilih tidak hanya mampu menyelesaikan permasalahan saat ini, tetapi juga mendukung kebutuhan operasional perusahaan di masa mendatang.

Alternatif pertama adalah optimalisasi sistem lokal MTN yang telah digunakan oleh Departemen *Maintenance*. Pendekatan ini dinilai memiliki keunggulan karena perusahaan tidak perlu melakukan pengembangan sistem baru secara menyeluruh. Selain itu, pengguna juga telah terbiasa menggunakan sistem tersebut dalam aktivitas operasional sehari-hari. Namun demikian, sistem lokal MTN masih memiliki keterbatasan dalam aspek integrasi data, fleksibilitas pengembangan, serta kemampuan monitoring aktivitas secara menyeluruh.

Alternatif kedua adalah pengembangan sistem berbasis *spreadsheet* yang lebih terstruktur dan terstandarisasi. Pendekatan ini memiliki keunggulan dari sisi kemudahan implementasi dan biaya pengembangan yang relatif rendah. Selain itu, penggunaan *spreadsheet* memungkinkan perusahaan untuk melakukan pengolahan data secara lebih fleksibel sesuai kebutuhan operasional. Namun demikian, pendekatan ini masih memiliki keterbatasan dalam aspek keamanan data, integrasi sistem, serta monitoring aktivitas secara *real-time.* Penggunaan *spreadsheet* juga memiliki risiko tingginya ketergantungan terhadap pengelolaan manual oleh pengguna sehingga potensi ketidakkonsistenan data masih cukup besar.

Alternatif ketiga adalah pengembangan sistem *maintenance* terintegrasi berbasis *Computerized Maintenance Management System (CMMS).* Sistem ini dirancang untuk mengintegrasikan seluruh aktivitas *maintenance*, mulai dari pelaporan kerusakan, pengelolaan *work order*, pencatatan histori mesin, penjadwalan *preventive maintenance*, hingga monitoring aktivitas teknisi dalam satu sistem yang terpusat dan terintegrasi dengan baik pada ekosistem yang ada di perusahaan saat ini.

Tabel 1. Ringkasan Alternatif Solusi Pengembangan Sistem *Maintenance*

Kriteria Penilaian	Alternatif 1 Optimasi Sistem Lokal (Siskom MTN)	Alternatif 2 Sistem Maintenance Berbasis Spreadsheet Terstandarisasi	Alternatif 3 Sistem Maintenance Terintegrasi Berbasis CMMS
Deskripsi Solusi	Mengoptimalkan sistem lokal yang sudah ada dengan penambahan fitur dan penyesuaian proses agar lebih efektif.	Mengembangkan sistem berbasis spreadsheet yang terstruktur dan terstandarisasi untuk seluruh aktivitas maintenance.	Mengimplementasikan sistem terintegrasi berbasis Computerized Maintenance Management System (CMMS).
Cakupan Integrasi	Terbatas pada Departemen Maintenance saja.	Terbatas pada pencatatan dan pelaporan, integrasi antar fungsi belum optimal.	Terintegrasi antara Produksi, Maintenance, dan fungsi pendukung lainnya.
Kemampuan Monitoring & Visibilitas	●●○○○ (Rendah) Monitoring dasar, visibilitas terbatas dan tidak real-time.	●●○○○ (Rendah) Visibilitas terbatas, monitoring belum real-time.	●●●●● (Tinggi) Dashboard real-time, visibilitas menyeluruh terhadap pekerjaan dan kondisi mesin.
Pengelolaan Data	●●○○○ (Rendah) Data masih terpisah, tidak terstandarisasi sepenuhnya dan sulit dianalisis.	●●●○○ (Sedang) Data lebih terstruktur namun masih terpisah antar file.	●●●●● (Tinggi) Data terpusat, terstandarisasi, histori lengkap untuk analisis dan pengambilan keputusan.
Kemudahan Implementasi	●●●●○ (Mudah) Relatif mudah, memanfaatkan sistem yang sudah ada.	●●●●○ (Mudah) Relatif mudah dibuat dan dioperasikan.	●●○○○ (Tantangan Tinggi) Membutuhkan waktu implementasi dan penyesuaian proses yang lebih panjang.
Estimasi Biaya	●●●●○ (Rendah) Biaya rendah, hanya penyesuaian fitur pada sistem yang ada.	●●●○○ (Rendah - Sedang) Biaya relatif rendah, memanfaatkan perangkat lunak umum.	●○○○○ (Tinggi) Biaya pengembangan / pembelian lisensi sistem dan infrastruktur lebih besar.
Dampak terhadap Kinerja Maintenance	●●○○○ (Rendah - Sedang) Peningkatan terbatas karena integrasi dan data belum optimal.	●●●○○ (Sedang) Membantu keteraturan data namun dampak masih terbatas.	●●●●● (Tinggi) Meningkatkan efektivitas, efisiensi, dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data.
Kelebihan Utama	• Memanfaatkan sistem yang sudah ada. • Waktu implementasi relatif singkat. • Biaya implementasi rendah.	• Mudah dibuat dan digunakan. • Fleksibel dan dapat disesuaikan. • Biaya relatif rendah.	• Integrasi menyeluruh antar fungsi. • Data real-time dan akurat. • Mendukung analisis, KPI, dan pengambilan keputusan berbasis data.
Keterbatasan Utama	• Integrasi antar fungsi masih terbatas. • Skalabilitas rendah. • Monitoring real-time belum tersedia.	• Rentan terhadap human error. • Tidak real-time. • Sulit dikembangkan untuk skala besar.	• Implementasi lebih kompleks. • Membutuhkan komitmen dan perubahan proses organisasi. • Ketergantungan pada infrastruktur TI.
Ringkasan Kesimpulan	**Cocok sebagai solusi jangka pendek untuk perbaikan terbatas dengan sumber daya minimal.**	**Cocok sebagai solusi transisi untuk membuat data lebih terstruktur sebelum implementasi sistem terintegrasi.**	**Cocok sebagai solusi jangka panjang untuk peningkatan efektivitas maintenance secara menyeluruh dan berkelanjutan.**

 ISSN 2987-677x

Berdasarkan hasil evaluasi, pengembangan sistem berbasis CMMS dinilai menjadi alternatif yang paling sesuai dengan kebutuhan perusahaan. Sistem ini dinilai mampu meningkatkan kualitas pencatatan data, efektivitas monitoring pekerjaan, serta visibilitas terhadap aktivitas *maintenance* secara *real-time*. Selain itu, sistem CMMS juga memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut sesuai kebutuhan operasional perusahaan di masa mendatang. Dengan adanya sistem yang lebih terintegrasi, perusahaan diharapkan dapat meningkatkan efektivitas pengelolaan *maintenance* serta mendukung proses operasional yang lebih terstruktur, sistematis, dan berbasis data.

Pengembangan Sistem *Maintenance* Berbasis CMMS

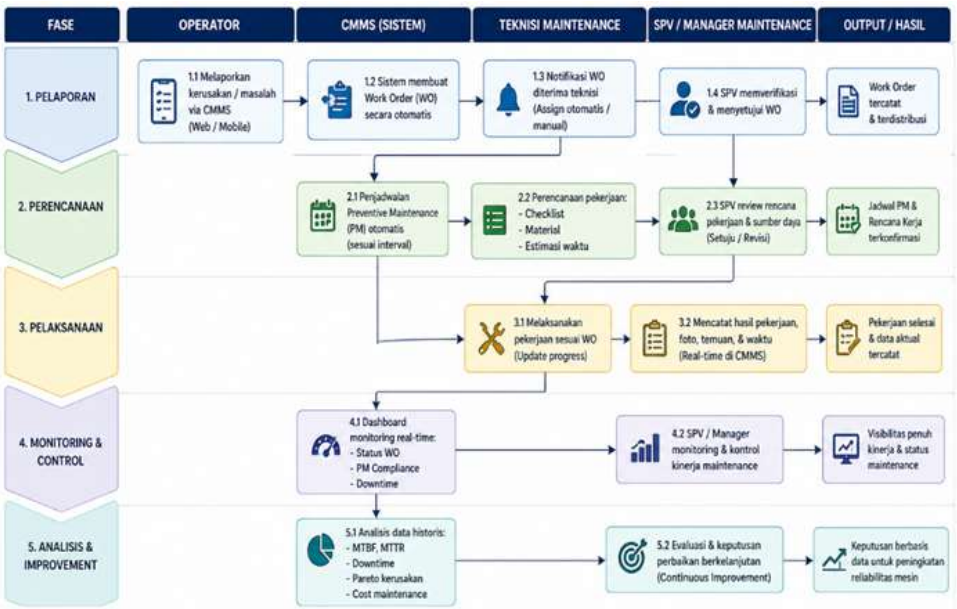
Berdasarkan hasil evaluasi terhadap kondisi eksisting dan alternatif solusi yang tersedia, pengembangan sistem *maintenance* berbasis *Computerized Maintenance Management System (CMMS)* dipilih sebagai solusi yang paling sesuai dengan kebutuhan operasional PT Untung Bersama Sejahtera. Sistem ini dirancang untuk mengintegrasikan seluruh aktivitas *maintenance* dalam satu sistem yang lebih terstruktur dan terpusat. Pengembangan CMMS diharapkan mampu meningkatkan kualitas pengelolaan data, efektivitas monitoring pekerjaan, serta visibilitas terhadap aktivitas *maintenance* secara keseluruhan.

Sistem CMMS dirancang untuk mendukung berbagai aktivitas utama dalam pengelolaan *maintenance*, mulai dari pelaporan kerusakan mesin, pengelolaan *work order,* pencatatan histori mesin, penjadwalan *preventive maintenance*, hingga monitoring status pekerjaan teknisi. Dengan adanya sistem yang terintegrasi, seluruh data dan aktivitas *maintenance* dapat terdokumentasi secara lebih sistematis dan mudah ditelusuri kembali ketika dibutuhkan. Selain itu, sistem juga memungkinkan proses *monitoring* dilakukan secara lebih cepat dan akurat dibandingkan dengan sistem manual yang sebelumnya digunakan.

Melalui sistem CMMS, perusahaan juga dapat meningkatkan kualitas pengendalian terhadap pelaksanaan *preventive maintenance*. Sistem dapat memberikan pengingat jadwal perawatan secara otomatis sehingga membantu memastikan aktivitas *maintenance* dilakukan secara lebih konsisten dan terencana. Dengan demikian, perusahaan dapat mengurangi potensi kerusakan mendadak yang dapat mengganggu proses produksi dan menyebabkan peningkatan *downtime* mesin.

Selain mendukung pengelolaan pekerjaan *maintenance*, integrasi data dalam sistem juga memungkinkan perusahaan untuk melakukan evaluasi terhadap performa mesin dan efektivitas pekerjaan teknisi secara lebih objektif. Data historis yang terdokumentasi dengan baik dapat digunakan sebagai dasar dalam melakukan analisis tren kerusakan, evaluasi frekuensi perbaikan, maupun penyusunan prioritas pekerjaan *maintenance*. Hal ini mendukung proses pengambilan keputusan yang lebih cepat, akurat, dan berbasis data.

Pengembangan sistem berbasis CMMS juga mendukung peningkatan aspek Keselamatan, Kesehatan Kerja, dan Lingkungan (K3L). Aktivitas pekerjaan yang terdokumentasi secara lebih baik membantu perusahaan dalam meningkatkan pengendalian proses kerja, monitoring pelaksanaan pekerjaan, serta kepatuhan terhadap prosedur operasional yang berlaku. Selain itu, sistem yang lebih terstruktur juga mendukung peningkatan transparansi dan akuntabilitas dalam pengelolaan aktivitas *maintenance*.



Gambar 3. Alur Proses *Maintenance* dengan CMMS

 ISSN 2987-677x

Dengan adanya sistem *maintenance* yang lebih terintegrasi, perusahaan diharapkan dapat meningkatkan efektivitas operasional serta memperkuat proses pengelolaan *maintenance* secara berkelanjutan. Pengembangan sistem CMMS tidak hanya berfokus pada penyelesaian permasalahan saat ini, tetapi juga menjadi dasar dalam mendukung pengembangan sistem operasional perusahaan di masa mendatang. Pendekatan ini menunjukkan bahwa pengelolaan *maintenance* yang berbasis sistem dan data menjadi bagian penting dalam mendukung peningkatan daya saing perusahaan secara keseluruhan.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, sistem *maintenance* di PT Untung Bersama Sejahtera masih memiliki beberapa keterbatasan dalam aspek pencatatan data, monitoring aktivitas, pengendalian pekerjaan, serta pelaksanaan *preventive maintenance*. Sistem yang masih bersifat manual dan belum terintegrasi menyebabkan histori pekerjaan sulit ditelusuri, informasi tidak terdokumentasi secara konsisten, serta visibilitas terhadap aktivitas *maintenance* menjadi rendah. Kondisi tersebut menyebabkan pengelolaan *maintenance* belum berjalan secara optimal dan masih cenderung bersifat reaktif terhadap kerusakan mesin.

Hasil analisis juga menunjukkan bahwa permasalahan utama dipengaruhi oleh ketidakterpaduan sistem, metode kerja yang belum terstandarisasi, serta keterbatasan dalam pengelolaan data operasional. Selain itu, koordinasi antar fungsi masih bergantung pada komunikasi manual sehingga proses monitoring dan pengambilan keputusan belum dapat dilakukan secara cepat dan berbasis data. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan antara sistem *maintenance* yang berjalan dengan praktik pengelolaan *maintenance* yang lebih terstruktur dan terintegrasi.

Berdasarkan evaluasi terhadap beberapa alternatif solusi, pengembangan sistem *maintenance* berbasis *Computerized Maintenance Management System (CMMS)* dinilai menjadi solusi yang paling sesuai dengan kebutuhan perusahaan. Sistem ini mampu mendukung integrasi data, pengelolaan *work order*, pencatatan histori mesin, penjadwalan *preventive maintenance*, serta *monitoring* aktivitas secara real-time. Selain itu, sistem CMMS juga memberikan peluang bagi perusahaan untuk melakukan pengelolaan data dan evaluasi kinerja mesin secara lebih sistematis dan terukur.

Pengembangan sistem *maintenance* berbasis CMMS tidak hanya memberikan manfaat dalam peningkatan efektivitas operasional, tetapi juga mendukung peningkatan kualitas informasi dan pengendalian proses kerja. Sistem yang lebih terintegrasi memungkinkan perusahaan untuk meningkatkan transparansi aktivitas *maintenance*, memperkuat koordinasi antar fungsi, serta mendukung pengambilan keputusan berbasis data. Dengan demikian, pengelolaan *maintenance* dapat dilakukan secara lebih efektif, terstruktur, dan berorientasi pada peningkatan berkelanjutan *(continuous improvement).*

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada manajemen dan seluruh tim di PT Untung Bersama Sejahtera yang telah memberikan dukungan dan kesempatan selama pelaksanaan studi kasus. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada dosen pembimbing Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas arahan dan masukan selama proses penyusunan artikel ini.

Referensi

Atkinson, P. (2021). *Asset maintenance management: A practical guide.* Routledge.

Campbell, J. D., Jardine, A. K. S., & McGlynn, J. (2016). *Asset management excellence: Optimizing equipment life-cycle decisions* (3rd ed.). CRC Press.

International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55000: Asset management—Overview, principles and terminology*.

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14001: Environmental management systems—Requirements with guidance for use.*

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 45001: Occupational health and safety management systems—Requirements with guidance for use.*

Kumar, U., Galar, D., Parida, A., Stenström, C., & Berges, L. (2020). Maintenance performance metrics: A state-of-the-art review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering, 26*(2), 291–308.

Nguyen, K. A., Do, P., & Grall, A. (2022). Condition-based maintenance for multi-component systems: A review of recent advances. *Reliability Engineering & System Safety*, *219*, 108181.

Pemerintah Republik Indonesia. (2012). *Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012 tentang penerapan sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja (SMK3).*

Sharma, A., Yadava, G. S., & Deshmukh, S. G. (2021). A review on maintenance management strategies and their impact on performance. *International Journal of System Assurance Engineering and Management, 12*, 1043–1056.

Wireman, T. (2018). *Total productive maintenance* (2nd ed.). Industrial Press.

ISSN 2987-677x

Analisis Dampak Pemanfaatan *Shore Connection* dalam Mendukung Pelabuhan Berkonsep *Green Port*

Faris Nofandi[1,2], Tarsisius Dwi Wibawa Budianta[2]

[1] Program Studi Transportasi Laut, Politeknik Pelayaran Surabaya

[2] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ farisnofandi@gmail.com

Peningkatan kualitas lingkungan di kawasan pelabuhan menjadi isu strategis seiring dengan meningkatnya degradasi lingkungan dan emisi gas rumah kaca, yang juga tercermin dalam beberapa target *Sustainable Development Goals* (SDGs). Sektor maritim turut berkontribusi terhadap sekitar 5% emisi karbon dioksida global, sehingga mendorong regulasi *International Maritime Organization* (IMO) terkait bahan bakar kapal berkadar sulfur rendah. Di sisi lain, biaya logistik Indonesia mencapai sekitar 24% dari PDB, jauh lebih tinggi dibandingkan negara-negara Asia dan Amerika Serikat yang berkisar 8%–15%. Sebagai respons terhadap kedua permasalahan (lingkungan dan besarnya biaya logistik) tersebut, teknologi *shore connection* mulai diterapkan di beberapa pelabuhan Indonesia, menggantikan mesin bantu kapal berbahan bakar minyak dengan sumber listrik yang lebih ramah lingkungan. Namun, penerapannya masih menghadapi kendala terkait dengan besaran biaya layanan *shore connection*, saat ini belum dapat diketahui apakah dengan biaya eksisting tersebut telah menjadikan *shore connection* menjadi inovasi yang tepat guna. Penelitian ini bertujuan menganalisis struktur biaya *shore connection* yang sesuai agar inovasi ini dapat diterima oleh seluruh pemangku kepentingan. Metode yang digunakan adalah pemodelan dan analisis sensitivitas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *shore connection* dapat mengurangi konsumsi energi sebesar 68%–89% dan menurunkan biaya operasional sebesar 84%–87%, serta berkontribusi pada pengurangan emisi NOx dan SO_2, sehingga mendukung penerapannya secara luas di seluruh pelabuhan Indonesia.

Kata kunci: *Shore Connection, Green Port*, Biaya Logitik, Analisis Sensivitas

Pendahuluan

Isu kualitas lingkungan hidup saat ini telah menjadi perhatian strategis di tingkat global, seiring dengan semakin menurunnya kondisi lingkungan dari waktu ke waktu. Tekanan terhadap ekosistem bumi semakin nyata, mulai dari perubahan iklim, peningkatan suhu permukaan laut, hingga memburuknya kualitas udara di kawasan perkotaan dan pesisir. Berbagai sektor industri dituntut untuk berkontribusi dalam menjaga kelestarian lingkungan, termasuk sektor maritim. Sebagai tulang punggung perdagangan internasional, sektor maritim memiliki tanggung jawab yang sangat besar dalam upaya menekan laju degradasi lingkungan secara global. Hal ini tercermin dari regulasi yang dikeluarkan oleh *International Maritime Organization* (IMO) terkait penggunaan bahan bakar kapal berkadar sulfur rendah. Sejak 1 Januari 2020, seluruh kapal diwajibkan menggunakan bahan bakar dengan kadar sulfur maksimal 0,5%, sementara sebelumnya kapal-kapal di Indonesia masih menggunakan bahan bakar berkadar sulfur 3,5% (Agus, 2019). Regulasi ini diterbitkan sebagai respons atas fakta bahwa transportasi laut saat ini bertanggung jawab atas sekitar 5% emisi karbon dioksida global, bahkan melampaui emisi yang dihasilkan oleh transportasi udara (Rueter et al., 2012). Kondisi ini menunjukkan bahwa emisi gas buang kapal merupakan salah satu sumber polusi udara yang signifikan dan perlu segera ditangani secara serius. Untuk lebih jelasnya terkait gambaran gas buang dari sebuah kapal yang terlihat sangat hitam dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Gas Buang Kapal yang Berbahaya

Di sisi lain, Indonesia juga menghadapi tantangan besar dari sisi efisiensi logistik. Sebagai negara kepulauan dengan ribuan pulau yang tersebar dari Sabang hingga Merauke, ketergantungan Indonesia

 ISSN 2987-677x

terhadap transportasi laut sangat tinggi, sehingga efisiensi pelabuhan menjadi faktor penentu dalam kelancaran rantai pasok nasional. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), besaran biaya logistik Indonesia mencapai sekitar 24% dari Produk Domestik Bruto (PDB). Angka ini jauh lebih tinggi dibandingkan negara-negara Asia lainnya maupun Amerika Serikat yang hanya berkisar antara 8% hingga 15%. Kondisi ini mencerminkan bahwa sistem logistik nasional masih memerlukan pembenahan mendasar, terutama dalam hal efisiensi operasional di pelabuhan. Tingginya biaya logistik ini berdampak langsung pada daya saing perekonomian nasional, sehingga diperlukan inovasi yang mampu menekan biaya operasional dalam rantai logistik, khususnya di sektor kepelabuhanan.

Sebagai respons terhadap kedua permasalahan tersebut, sejumlah pelabuhan di Indonesia telah mulai mengadopsi teknologi *shore connection*. Fasilitas ini memungkinkan kapal yang sedang bersandar untuk memperoleh pasokan energi listrik dari darat, sehingga tidak perlu lagi mengoperasikan *auxiliary engine* berbahan bakar minyak selama proses sandar dan bongkar muat berlangsung. Penghentian operasional mesin kapal selama di pelabuhan memberikan dua manfaat utama, yakni pengurangan emisi gas buang seperti nitrogen oksida (NOx) dan sulfur dioksida (SO_2), serta penghematan biaya bahan bakar yang selama ini rata-rata mencapai 60% dari total biaya operasional kapal. Inovasi ini sejalan dengan konsep *green port* yang tengah didorong pemerintah sebagai arah pengembangan pelabuhan di Indonesia, yakni pelabuhan yang beroperasi secara efisien sekaligus bertanggung jawab terhadap lingkungan sekitarnya. Dengan demikian, *shore connection* berpotensi menjadi solusi yang efektif baik dari perspektif lingkungan maupun ekonomi.

Meskipun demikian, penerapan *shore connection* di Indonesia masih menghadapi sejumlah kendala, salah satunya adalah belum adanya penetapan struktur biaya layanan yang sesuai dan dapat diterima oleh seluruh pemangku kepentingan. Tanpa kerangka tarif yang jelas dan berkeadilan, perusahaan pelayaran cenderung enggan beralih dari penggunaan *auxiliary engine* yang selama ini sudah menjadi praktik umum. Besaran tarif yang tidak seragam dan belum terstandarisasi menjadi hambatan dalam perluasan adopsi teknologi ini di berbagai pelabuhan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis struktur biaya *shore connection* yang tepat melalui pendekatan pemodelan dan analisis sensitivitas, guna mengevaluasi hubungan antara biaya operasional dan manfaat yang diperoleh. Dengan tersedianya struktur biaya yang *reliable* dan dapat dipertanggungjawabkan, diharapkan penerapan *shore connection* dapat diterima oleh seluruh pihak yang terdampak dan didorong untuk diterapkan secara luas di seluruh pelabuhan Indonesia, dalam rangka mendukung pengembangan pelabuhan yang berkelanjutan dan berwawasan lingkungan.

Metode

Metode utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode pemodelan yang dikembangkan dengan menggunakan analisis sensitivitas. Analisis ini sangat berguna karena meningkatkan prediksi model, atau mengurangi ketidakpastian dengan mempelajari secara kualitatif dan/atau kuantitatif respon suatu model terhadap perubahan varibael input, atau dengan memahami fenomena yang dipelajari melalui analisis interaksi antar variabel. Komponen biaya yang dianalisis meliputi *voyage cost, operating cost, cargo handling cost, capital cost,* dan internalisasi *carbon footprint.*

Hasil Kerja

Analisis Waktu Operasional *Shore Connection*

Layanan *shore connection* dapat mengurangi waktu bongkar muat terutama bagi kapal – kapal dalam melakukan aktifitasnya menggunakan alat bongkar muat dengan *crane* kapal. Pada penelitian ini analisis waktu operasional menggunakan kapal curah kering sesuai dengan hasil survei di TUKS PT. PUSRI Unit Semarang. Kecepatan bongar muat KM. Abusamah dengan *auxiliary engine* hanya bisa 1 (satu) alat bongkar muat sebesar 100 – 150 ton/jam dan *shore connection* bisa menggunakan 2 (dua) alat bongkar muat sebesar 200 – 250 ton/jam. Perbedaan tersebut dapat mempengaruhi waktu bongkar muat kapal di pelabuhan. Hasil analisis dari survei menunjukkan sumber energi dari *shore connection* memerlukan *berthing time* kapal curah kering DWT 9.237 ton merlukan waktu 2,4 hari dan *auxiliary engine* memerlukan waktu 4,5 hari dengan asumsi yang sama pada waktu pergantian jam *shift* operasional memerlukan waktu 1 jam dan *idle* time 3 jam. Perbedaan kecepatan bongkar muat dengan penggunaan layanan *shore connection* dapat mengoptimalkan produktifitas alat bongkar muat sehingga mengurangi *berthing time* kapal.

Efisiensi Energi dan Biaya *Shore Connection*

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan *shore connection* memberikan peningkatan yang signifikan terhadap efisiensi konsumsi energi dan penurunan biaya operasional dibandingkan dengan penggunaan *auxiliary engine* saat kapal sandar. Perbedaan yang mencolok ini tidak terlepas dari perbedaan mendasar antara kedua sumber energi tersebut, di mana pembakaran bahan bakar minyak pada *auxiliary engine* menghasilkan energi yang jauh kurang efisien dibandingkan dengan suplai listrik langsung dari infrastruktur darat yang telah teroptimasi.

Dari sisi biaya operasional, penggunaan *shore connection* membutuhkan biaya sekitar Rp150 juta, sedangkan penggunaan *auxiliary engine* dapat mencapai Rp1,2 miliar. Selain itu, rata-rata biaya per *ship call* juga menunjukkan perbedaan yang signifikan, yaitu sekitar Rp2 juta per *ship call* untuk *shore*

 ISSN 2987-677x

connection dan Rp10 juta untuk *auxiliary engine*. Secara umum, penerapan *shore connection* memberikan peningkatan efisiensi yang signifikan dalam konsumsi energi dan biaya operasional pada berbagai jenis kapal. Rata-rata penurunan konsumsi energi dan biaya operasional untuk setiap kategori kapal disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengurangan Energi dan Biaya Menggunakan *Shore Connection*

Jenis Kapal	DWT	Pengurangan Energi (%)	Pengurangan Biaya (%)
Kapal Petikemas	2,001 – 5,000	89.5	87.4
Kapal Petikemas	5,001 – 10,000	82.7	84.6
Kapal Curah Kering	5,001 – 10,000	76.7	87.4
Kapal Curah Kering	10,001 – 20,000	68.8	84.0

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *shore connection* mampu mengurangi konsumsi energi sebesar 68,8%–89,5% serta menurunkan biaya operasional sebesar 84%–87,4% tergantung pada jenis dan kapasitas kapal. Temuan ini menunjukkan bahwa penggantian *auxiliary engine* kapal dengan pasokan listrik dari sistem *shore connection* dapat meningkatkan efisiensi operasional. Penggunaan energi listrik dari infrastruktur pelabuhan mampu mengurangi konsumsi bahan bakar kapal serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi selama kapal sandar di pelabuhan.

Pengurangan Emisi Gas Buang Menggunakan *Shore Connection*

Selain memberikan efisiensi energi dan penghematan biaya operasional, penerapan *shore connection* juga memberikan kontribusi yang signifikan dalam menurunkan emisi gas buang yang dihasilkan selama kapal melakukan proses sandar di pelabuhan. Pada kondisi konvensional, kapal yang tetap mengoperasikan *auxiliary engine* selama berada di dermaga akan terus melakukan pembakaran bahan bakar fosil untuk memenuhi kebutuhan listrik di atas kapal. Proses pembakaran tersebut menghasilkan berbagai emisi gas pencemar, seperti nitrogen oksida (NOx), sulfur dioksida (SO_2), karbon dioksida (CO_2), serta partikulat yang berpotensi menurunkan kualitas udara di kawasan pelabuhan dan sekitarnya. Oleh karena itu, penggunaan *shore connection* menjadi salah satu solusi teknologi yang efektif dalam mengurangi sumber pencemaran udara dari aktivitas kapal selama sandar.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan *shore connection* mampu menurunkan emisi gas buang secara signifikan di seluruh terminal yang diamati. Hasil penurunan emisi untuk kapal petikemas disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Pengurangan Emisi Menggunakan *Shore Connection* di Pelabuhan Tanjung Perak

Terminal	Penurunan Emisi
Terminal Nilam	75,03
Terminal Berlian	86,16
Terminal Teluk Lamong	91

Berdasarkan tabel di atas menunjukkan bahwa penggunaan *shore connection* mampu menurunkan emisi secara signifikan di seluruh terminal yang diamati. Pada Terminal Nilam, penurunan emisi mencapai 75,03%, sedangkan Terminal Berlian dan Terminal Teluk Lamong masing-masing sebesar 86,16% dan 91%. Penurunan emisi yang signifikan tersebut menunjukkan bahwa penerapan *shore connection* memiliki peran yang sangat penting dalam mengurangi dampak lingkungan di kawasan pelabuhan.

Melalui penggunaan suplai listrik dari darat selama kapal bersandar, kebutuhan pengoperasian mesin bantu (*auxiliary engine*) berbahan bakar fosil dapat dikurangi secara signifikan, sehingga emisi gas berbahaya seperti karbon dioksida (CO_2), sulfur oksida (SOx), nitrogen oksida (NOx), dan partikulat dapat ditekan secara lebih optimal. Selain meningkatkan kualitas udara di sekitar pelabuhan, penerapan teknologi ini juga mendukung terciptanya sistem operasional pelabuhan yang lebih ramah lingkungan, efisien, dan berkelanjutan. Dengan demikian, *shore connection* dapat menjadi salah satu strategi penting dalam mendukung implementasi konsep *green port* serta penguatan komitmen sektor maritim terhadap pengurangan pencemaran lingkungan.

Analisis Sensitivitas Utilitas *Shore Connection*

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengetahui pengaruh tingkat pemanfaatan *shore connection* terhadap konsumsi energi, biaya operasional, serta tingkat pengurangan emisi yang dihasilkan dalam aktivitas operasional pelabuhan. Pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana perubahan tingkat utilisasi fasilitas *shore connection* dapat mempengaruhi efektivitas sistem secara keseluruhan, baik dari aspek teknis, ekonomi, maupun lingkungan.

Hasil analisis menunjukkan bahwa tingkat utilisasi merupakan faktor yang sangat penting dan berpengaruh signifikan terhadap keberhasilan penerapan *shore connection.* Semakin tinggi tingkat pemanfaatan fasilitas tersebut, maka semakin besar pula potensi penghematan energi, efisiensi biaya operasional, serta penurunan emisi gas buang yang dapat dicapai. Dengan demikian, optimalisasi tingkat utilisasi *shore connection* menjadi salah satu aspek utama dalam mendukung implementasi sistem pelabuhan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Untuk memberikan gambaran lebih lanjut mengenai tingkat utilisasi fasilitas *shore connection* disajikan pada Tabel 3.

 ISSN 2987-677x

Tabel 3 Tingkat Utilisasi *Shore Connection* di Pelabuhan Tanjung Perak

Terminal	Utilisasi Eksisting (%)	Produksi Listrik (kWh/tahun)
Terminal Nilam	11,45	58.718
Terminal Berlian	2,61	33.989
Terminal Teluk Lamong	0,70	7.255

Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa peningkatan tingkat pemanfaatan fasilitas *shore connection* dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi energi serta menurunkan emisi dalam operasional pelabuhan. Sebagai contoh, di Terminal Nilam, peningkatan tingkat utilisasi dari 11,45% menjadi 70% berpotensi meningkatkan produksi listrik dari 58.718 kWh menjadi 359.054 kWh per tahun. Peningkatan ini akan secara signifikan menurunkan emisi NOx dan SO_2 yang dihasilkan oleh *auxiliary engine* kapal selama proses sandar.

Tingkat utilisasi yang masih relatif rendah menunjukkan bahwa fasilitas *shore connection* belum dimanfaatkan secara optimal. Peningkatan tingkat utilisasi akan memberikan manfaat yang lebih besar baik dari sisi lingkungan maupun ekonomi. Oleh karena itu, diperlukan perbaikan kebijakan operasional, strategi penetapan tarif layanan, serta peningkatan kesadaran dari perusahaan pelayaran guna mendorong penggunaan teknologi *shore connection* secara lebih luas dalam operasional pelabuhan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan dan optimalisasi sistem *shore connection* di terminal pelabuhan memiliki kontribusi yang signifikan dalam meningkatkan efisiensi energi, menurunkan biaya operasional kapal selama proses sandar, serta meminimalkan dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh aktivitas transportasi laut. Selain itu, implementasi teknologi ini juga mencerminkan upaya konkret dalam mendukung pengembangan konsep *green port* dan transformasi sektor maritim menuju sistem transportasi yang lebih berkelanjutan, efisien, dan ramah lingkungan.

Implikasi Kebijakan dan Rekomendasi Pengembangan *Shore Connection*

Berdasarkan hasil analisis efisiensi energi, penurunan biaya operasional, dan pengurangan emisi gas buang yang telah dipaparkan, terdapat beberapa implikasi kebijakan yang perlu dipertimbangkan untuk mengoptimalkan penerapan *shore connection* di seluruh pelabuhan Indonesia. Tingkat utilisasi yang masih sangat rendah, khususnya di Terminal Teluk Lamong (0,70%) dan Terminal Berlian (2,61%), mengindikasikan bahwa fasilitas yang telah tersedia belum dimanfaatkan secara optimal. Kondisi ini disebabkan oleh beberapa faktor, di antaranya belum adanya regulasi yang mewajibkan penggunaan *shore connection*, struktur tarif yang belum terstandarisasi secara nasional, serta kurangnya kesadaran dan kesiapan teknis dari perusahaan pelayaran.

Dari sisi regulasi, diperlukan kebijakan yang lebih tegas dari Kementerian Perhubungan maupun otoritas pelabuhan untuk mendorong peralihan dari penggunaan *auxiliary engine* menuju sistem *shore connection*. Pendekatan yang dapat ditempuh antara lain melalui penetapan standar tarif layanan yang kompetitif dan transparan, pemberian insentif fiskal bagi perusahaan pelayaran yang secara konsisten menggunakan *shore connection*, serta kewajiban penggunaan bagi kapal-kapal yang bersandar lebih dari durasi tertentu. Penetapan regulasi semacam ini sejalan dengan praktik terbaik di pelabuhan-pelabuhan maju di Eropa dan Asia Timur yang telah berhasil meningkatkan tingkat utilisasi *shore connection* secara signifikan.

Dari perspektif investasi infrastruktur, hasil analisis menunjukkan bahwa manfaat ekonomi yang diperoleh dari penghematan biaya bahan bakar dan pengurangan emisi jauh melampaui biaya investasi awal yang diperlukan untuk instalasi sistem *shore connection*. Sebagai contoh, jika tingkat utilisasi di Terminal Nilam ditingkatkan dari 11,45% menjadi 70%, produksi listrik akan meningkat dari 58.718 kWh menjadi sekitar 359.054 kWh per tahun. Peningkatan ini setara dengan penghematan biaya operasional yang sangat substansial serta pengurangan emisi NOx dan SO_2 dalam jumlah besar. Oleh karena itu, percepatan perluasan infrastruktur *shore connection* ke seluruh terminal di Pelabuhan Tanjung Perak, maupun pelabuhan-pelabuhan besar lainnya di Indonesia, merupakan langkah investasi yang secara ekonomi layak dan secara lingkungan sangat bermanfaat.

Dalam konteks yang lebih luas, penerapan *shore connection* secara masif di pelabuhan-pelabuhan Indonesia juga berkontribusi langsung terhadap pencapaian target *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya SDG 7 (Energi Bersih dan Terjangkau), SDG 11 (Kota dan Komunitas Berkelanjutan), serta SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim). Penurunan emisi NOx dan SO_2 yang signifikan akan berdampak pada peningkatan kualitas udara di kawasan sekitar pelabuhan, yang pada akhirnya berdampak positif bagi kesehatan masyarakat dan kualitas lingkungan hidup. Dengan demikian, kebijakan pengembangan *shore connection* tidak hanya relevan dari sudut pandang efisiensi logistik, tetapi juga merupakan bagian integral dari strategi pembangunan berkelanjutan Indonesia di sektor maritim. Sinergi antara otoritas pelabuhan, perusahaan pelayaran, regulator, dan penyedia energi menjadi kunci keberhasilan penerapan teknologi ini secara menyeluruh.

Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis implementasi sistem *shore connection* selama kapal bersandar di Pelabuhan Tanjung Perak, dengan fokus pada Terminal Nilam, Terminal Berlian, dan Terminal Teluk Lamong. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *shore connection*

 ISSN 2987-677x

memberikan peningkatan efisiensi energi dan penghematan biaya operasional yang signifikan. Konsumsi energi berkurang sebesar 68,8%–89,5% per *ship call* dan biaya operasional turun sebesar 84,0%–87,4% per *ship call*.

Penggunaan *shore connection* juga secara signifikan menurunkan emisi gas buang. Rata-rata pengurangan emisi NOx dan SO_2 mencapai 75,03% di Terminal Nilam, 86,16% di Terminal Berlian, dan 91% di Terminal Teluk Lamong. Analisis sensitivitas lebih lanjut menunjukkan bahwa peningkatan utilitas fasilitas *shore connection* dapat meningkatkan manfaat ekonomi dan lingkungan secara substansial, mendukung pengembangan konsep *green port* dan peningkatan kualitas udara di kawasan pelabuhan. Penerapan dan pengembangan lebih lanjut dari *shore power connection* di semua pelabuhan akan meningkatkan manfaat lingkungan secara keseluruhan dan mendukung upaya keberlanjutan.

Ucapan Terimakasih

Peneliti menyampaikan ucapan terima kasih kepada manajemen Pelabuhan Tanjung Perak beserta pihak Terminal Nilam, Terminal Berlian, dan Terminal Teluk Lamong atas dukungan, kerja sama, serta penyediaan data dan informasi yang sangat diperlukan dalam pelaksanaan penelitian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada Politeknik Pelayaran Surabaya khususnya Program Studi Transportasi Laut, serta Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya melalui Program Studi Profesi Insinyur atas dukungan akademik, arahan ilmiah, dan kontribusi yang diberikan selama proses penelitian berlangsung. Dukungan dari berbagai pihak tersebut memberikan kontribusi penting dalam menunjang kelancaran pelaksanaan penelitian serta penyusunan hasil kajian secara komprehensif dan sistematis.

Referensi

Azka, R. M. (2019). *Kemenhub akui efisiensi logistik nasional rendah*. Supply Chain Indonesia.

Chu-Agor, M. L. (2019). *Global uncertainty and sensitivity analysis of habitat and metapopulation models*. University of Florida.

Dyck, G. K., & Ismael, H. M. (n.d.). Multicriteria of port competitiveness in West Africa using analytic hierarchy process. *American Journal of Industrial and Business Management*, 440–441.

Fragoulakis, V. (2015). *Advanced methodological aspects in the economic evaluation*. Elsevier Academic Press.

Goodwin, A. P. (2016). *The Economic Value of Shipping*. Oxford Economics.

Huboyo, H. S. (2018). Inventarisasi dan sebaran emisi aktivitas pelabuhan dengan Aermod View. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi Dan Pengembangan Teknik Lingkungan*.

Ishii, M., Lee, P. T., Tezuka, K., & Chang, Y. T. (2012). A game theoretical analysis of port competition. *Transportation Research Part E*.

Kementerian Perhubungan. (1998). *Keputusan Menteri Perhubungan No. 26 tentang Penyelenggaraan Pelabuhan Laut*.

Kramadibrata, S. (1985). *Perencanaan Pelabuhan*. Ganesha Exact.

Luo, H. (2013). *An analysis of port competitiveness through user's perception measurement*. Erasmus University.

Mandi, N. B. (2015). *Perencanaan dan Perancangan Konstruksi Bangunan Laut dan Pantai*. Buku Arti.

Meersman, H., Voorde, E. V., & Vanelslander, T. (2010). *Port Competition Revisited*.

Mukminin, A. (2010). *Kelayakan Pengembangan Pelabuhan Belawan menjadi Pelabuhan Hub Internasional dengan Metode Sistem Dinamik*.

Osborne, M. J., & Rubinstein, A. (2011). *A Course in Game Theory*. The MIT Press.

Pandey, S. V. (2019). Evaluasi kinerja operasional Pelabuhan ASDP Indonesia Ferry Bitung. *Jurnal Sipil Statik*, 256–276.

Pertamina. (2015). *Pertamina*. https://www.pertamina.com/. Diakses pada 25 Juli 2024.

Pichery, C. (2014). *Encyclopedia of Toxicology (3rd ed.)*. Elsevier Academic Press.

Pratiwi, B. (2017). *Analisis daya saing antar terminal petikemas dalam suatu wilayah: Studi kasus terminal petikemas wilayah Surabaya*.

Rueter, G., Setiawan, A., & Kostermans, D. (2012). B*ahaya minyak berat dari kapal laut*. Made for Mind / DW.

Santosa, B., & Willy, P. (2011). *Metoda Metaheuristik: Konsep dan Implementasi*. Guna Widya.

Seth, S. (n.d.). Assessment of port efficiency using stepwise selection and window analysis in data envelopment analysis. *Maritime Economics & Logistics*, 536–561.

Szymonik, A. (2013). *Transport and Economics for Logistics and Logicians*.

Tae, Y. G. (2011). *Measuring the Competitiveness of Container Ports: Logistician's Perspectives*.

Turocy, T. L. (2001). *Game Theory*.

Widodo, B. P. (2014). *Pengembangan model persaingan penentuan tarif angkut kapal dengan metode game theory*.

Zaroni, D. (2017). *Biaya logistik agregat*. Supply Chain Indonesia.

ZonaSea. (2021). *Perbandingan biaya logistik Indonesia vs negara tetangga*.

 ISSN 2987-677x

Evaluasi Pengukuran Geometri Jalan Berdasarkan Pencapaian SDGs *Goal* 9 (Studi Kasus: Ruas Jalan Dusun Paritan Desa Keras Kecamatan Diwek-Jombang)

A'izzatul Khiyana[1,2] Suratno Lourentius[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Hasyim Asy'ari Tebuireng Jombang

✉ aizzatulkhiyana@unhasy.ac.id

✉ suratno.lourentius@ukwms.ac.id

Infrastruktur jalan memiliki peran penting dalam mendukung mobilitas dan pertumbuhan ekonomi, sehingga kesesuaian geometrik menjadi faktor utama dalam menjamin keselamatan dan kenyamanan pengguna. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi geometrik ruas berdasarkan standar Bina Marga serta keterkaitannya dengan pencapaian SDGs Goal 9 dan aspek Keselamatan dan Kesehatan Kerja serta Lingkungan (K3L). Metode yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif dengan analisis deskriptif melalui pengolahan data survei lapangan dan perbandingan terhadap standar yang berlaku. Hasil analisis menunjukkan bahwa geometrik memanjang memiliki nilai kelandaian 0,27%–0,97% yang memenuhi standar, sedangkan geometrik melintang menunjukkan ketidaksesuaian signifikan dengan nilai *cross slope* sebesar 6,5%–19,0% yang melebihi batas standar 2%–4%. Kondisi ini berdampak pada peningkatan risiko kecelakaan, ketidaknyamanan berkendara, serta terganggunya sistem drainase, yang mencerminkan belum optimalnya penerapan prinsip K3L. Secara keseluruhan, kinerja geometrik jalan memerlukan perbaikan melalui penataan ulang penampang melintang, peningkatan drainase, dan penguatan struktur tanah dasar guna mendukung pencapaian SDGs Goal 9 infrastruktur yang berkelanjutan.

Kata kunci: geometri jalan, bina marga, MSL, K3L, SDGs

Pendahuluan

Jalan merupakan infrastruktur transportasi yang memiliki peran strategis dalam mendukung mobilitas manusia, distribusi barang, serta pertumbuhan ekonomi wilayah (Sevan Alif Maulana et al., 2024). Kualitas suatu jalan tidak hanya ditentukan oleh kondisi perkerasan, tetapi juga oleh kesesuaian geometri jalan yang meliputi alinyemen horizontal, alinyemen vertikal, lebar lajur, kemiringan, serta jarak pandang (Vayalamkuzhi & Amirthalingam, 2016). Perencanaan dan evaluasi geometri jalan bertujuan untuk memastikan bahwa jalan mampu memberikan tingkat keselamatan, kenyamanan, dan efisiensi yang optimal bagi pengguna (Nugroho et al., 2023; Novriani et al., 2025).

Kondisi eksisting di lapangan, ditemukan masih banyak ruas jalan yang belum memenuhi standar geometrik yang ditetapkan (Wang et al., 2013). Ketidaksesuaian tersebut dapat berupa radius tikungan yang terlalu kecil, superelevasi yang tidak memadai, hingga lebar jalan yang tidak sesuai standar. Kondisi ini berpotensi menimbulkan berbagai permasalahan seperti meningkatnya risiko kecelakaan, penurunan kenyamanan berkendara, serta terganggunya kelancaran lalu lintas (Rengarasu et al., 2009). Selain itu, geometri jalan yang tidak sesuai juga terbukti berpengaruh terhadap tingkat keselamatan lalu lintas, di mana faktor seperti lebar lajur dan pengaturan ruang jalan menjadi penyebab utama terjadinya konflik lalu lintas (Jima & Sipos, 2022; Palupi et al., 2024).

Evaluasi terhadap geometri jalan menjadi sangat penting sebagai bagian dari upaya *monitoring* dan perbaikan infrastruktur transportasi. Proses evaluasi ini dilakukan dengan membandingkan kondisi geometrik eksisting terhadap standar yang berlaku, seperti standar Bina Marga. Hasil evaluasi tersebut dapat digunakan sebagai dasar dalam merumuskan rekomendasi perbaikan guna meningkatkan keselamatan dan kinerja jalan (Teratak et al., 2026).

Dalam konteks pembangunan global, kualitas infrastruktur jalan juga berkaitan erat dengan pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*/SDGs), khususnya *Goal* 9 yaitu "*Industry, Innovation, and Infrastructure*". SDGs *Goal* 9 menekankan pentingnya pembangunan infrastruktur yang tangguh, berkelanjutan, dan inklusif guna mendukung pertumbuhan ekonomi dan kesejahteraan masyarakat. Infrastruktur jalan yang memenuhi standar geometrik akan meningkatkan efisiensi transportasi, mengurangi kecelakaan, serta mendukung konektivitas antar wilayah, sehingga berkontribusi langsung terhadap pencapaian target SDGs tersebut.

Ruas Jalan Dusun Paritan Desa Keras Kecamatan Diwek Kabupaten Jombang merupakan salah satu infrastruktur jalan lokal yang memiliki peran penting dalam menunjang aktivitas masyarakat setempat. Namun, berdasarkan kondisi lapangan yang umum terjadi pada jalan-jalan lokal, terdapat kemungkinan adanya ketidaksesuaian antara kondisi geometrik jalan dengan standar yang berlaku. Hal ini mendorong

 ISSN 2987-677x

perlunya dilakukan evaluasi pengukuran geometri jalan secara komprehensif untuk mengetahui tingkat kesesuaian terhadap standar serta kontribusinya terhadap pencapaian SDGs Goal 9.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini penting dilakukan untuk mengevaluasi kondisi geometrik ruas jalan secara aktual, mengidentifikasi ketidaksesuaian yang terjadi, serta memberikan rekomendasi perbaikan guna mendukung pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan dan berorientasi pada keselamatan serta efisiensi transportasi.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisa geometrik jalan dengan metode *waterpass* (*levelling*) yang bertujuan untuk menilai kesesuaian kondisi geometrik jalan terhadap standar yang berlaku serta mengkaji kontribusinya terhadap pencapaian SDGs Goal 9, pada aspek infrastruktur yang berkelanjutan.

Pengolahan Data Geometrik

Proses pengolahan data geometrik jalan dilakukan dengan dengan tahapan verifikasi dan pengelompokan data untuk memastikan akurasi kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi pola, ketidakteraturan, dan segmen kritis, sehingga diperoleh parameter geometrik aktual yang menjadi dasar evaluasi kesesuaian terhadap standar serta perumusan rekomendasi perbaikan.

Evaluasi Kesesuaian terhadap Standar

Nilai parameter geometrik dibandingkan dengan standar Bina Marga untuk menentukan tingkat kesesuaian. Hasil evaluasi diklasifikasikan ke dalam kategori, yaitu standar dan tidak sesuai standar.

Analisis Keterkaitan dengan SDGs *Goal* 9

Hasil evaluasi geometrik jalan selanjutnya diinterpretasikan dalam konteks pencapaian SDGs *Goal* 9 yang menekankan pembangunan infrastruktur yang berkualitas, aman, dan berkelanjutan, dengan turut mempertimbangkan aspek Keselamatan dan Kesehatan Kerja serta Lingkungan (K3L). Kesesuaian geometrik jalan terhadap standar teknis menjadi indikator penting dalam menjamin keselamatan pengguna jalan, yang merupakan bagian dari prinsip K3L, khususnya dalam meminimalkan risiko kecelakaan akibat kondisi geometrik yang tidak memadai.

Perumusan Rekomendasi

Berdasarkan hasil analisis, disusun rekomendasi teknis untuk perbaikan geometrik jalan guna meningkatkan kinerja jalan dan mendukung pembangunan berkelanjutan.

Hasil Kerja

Pengolahan Data Geometrik Memanjang

Pengolahan data geometrik memanjang merupakan tahapan penting dalam analisis kondisi jalan yang bertujuan untuk memperoleh parameter alinyemen vertikal secara aktual berdasarkan hasil survei lapangan. Parameter utama yang dianalisis pada tahap ini adalah elevasi, beda tinggi, dan kelandaian (*grade*) antar STA, yang mencerminkan profil vertikal jalan yang ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Data geometrik memanjang

STA	Elevasi (m)	Beda Tinggi (m)	Jarak (m)	*Grade* (%)
STA 1	44,514	0,484	50	0,97
STA 2	44,364	0,344	50	0,69
STA 3	44,459	0,133	50	0,27
STA 4	44,564	0,204	50	0,41
STA 5	44,176	0,354	50	0,71

Analisis geometrik memanjang menunjukkan bahwa nilai kelandaian (*grade*) yang berada pada kisaran 0,27%–0,97% tergolong landai dan telah memenuhi standar geometrik jalan desa. Kondisi ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Vayalamkuzhi & Amirthalingam, 2016) yang menyatakan bahwa kelandaian rendah (<3%) dan masih tergolong aman terhadap keselamatan dan efisiensi operasional kendaraan karena mengurangi beban mesin serta meningkatkan stabilitas pergerakan kendaraan. Selain itu, penelitian oleh (Wang et al., 2013) menunjukkan bahwa variasi kelandaian yang kecil cenderung meningkatkan tingkat pelayanan jalan dan menurunkan risiko kecelakaan.

Adanya fluktuasi elevasi yang tidak konsisten pada STA 3 hingga STA 5 menunjukkan bahwa ketidakteraturan profil vertikal dapat menimbulkan ketidaknyamanan berkendara akibat perubahan gaya dinamis kendaraan, seperti getaran atau perubahan kecepatan yang tidak stabil. (Jima & Sipos, 2022) Mengungkapkan ketidakteraturan geometri jalan, nilai kelandaian dalam batas standar, dapat memicu gangguan kenyamanan dan berpotensi menimbulkan kecelakaan lalu lintas.

Pengolahan Data Geometrik Melintang

Data survei melintang pada STA 1 sampai STA 5 digunakan untuk memperoleh parameter utama geometrik jalan, yaitu kemiringan melintang (*cross slope*), bentuk penampang jalan dan stabilitas elevasi terhadap titik acuan (TA). Untuk mempermudah analisis, data diringkas pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Data Geometrik Melintang

STA	Elv. Maks (m)	Elv. Min (m)	Selisih Elv. (m)	Jarak Maks (m)	*Cross Slope* (%)	Kondisi Jalan
STA 1	44,33	43,51	0,82	7,75	10,5	Tidak stabil
STA 2	44,54	43,80	0,74	11,39	6,5	Cukup curam
STA 3	44,40	42,89	1,51	7,91	19,0	Sangat curam (kritis)
STA 4	44,24	42,93	1,31	8,85	14,8	Sangat curam (kritis)
STA 5	44,12	43,56	0,63	9,61	6,6	Tidak seragam

Nilai *cross slope* berkisar antara 6% hingga 19%. Nilai tersebut jauh melebihi standar geometrik jalan aspal, yaitu 2% – 4% dengan maksimum toleransi ≤ 8%. STA 3

 ISSN 2987-677x

dan STA 4 menunjukkan kondisi paling kritis dengan kemiringan 14% hingga 19%. Kondisi ini mengindikasikan ketidakseimbangan penampang; deformasi struktural; dan potensi longsoran kecil atau penurunan tanah.

Secara keseluruhan, kondisi geometrik melintang menunjukkan bahwa kemiringan melintang tidak memenuhi standar teknis, dengan nilai yang jauh melebihi batas yang diizinkan; penampang jalan tidak simetris dan tidak membentuk profil ideal, sehingga mengurangi fungsi drainase alami; terdapat indikasi kuat kerusakan struktural, terutama pada STA 3 dan STA 4 yang menunjukkan perbedaan elevasi ekstrem; kondisi ini mencerminkan bahwa jalan tidak memenuhi kriteria infrastruktur yang aman, nyaman, dan berkelanjutan. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Xu et al., 2023; Wang et al., 2024; Yang & Han, 2025) yang menyatakan bahwa perubahan kemiringan melintang dan kondisi permukaan jalan memiliki pengaruh signifikan terhadap tingkat keselamatan, di mana variasi yang tidak terkendali dapat menurunkan tingkat keselamatan jalan secara bertahap akibat perubahan gaya gesek dan respons kendaraan.

Hasil analisis geometrik melintang menunjukkan bahwa meskipun jalan masih dapat dilalui, secara teknis kondisi penampang melintang berada dalam kategori tidak layak secara geometrik. Ketidaksesuaian ini terutama disebabkan oleh variasi kemiringan melintang yang ekstrem, ketidaksimetrian profil jalan, serta adanya indikasi penurunan struktur tanah dasar. Oleh karena itu, diperlukan tindakan evaluasi lanjutan dan perbaikan geometrik untuk meningkatkan kinerja jalan, keselamatan pengguna, serta mendukung prinsip infrastruktur berkelanjutan.

Evaluasi Kesesuaian terhadap Pedoman Desain Geometrik Jalan standar Bina Marga

Berdasarkan hasil pengolahan data geometrik memanjang dan melintang, selanjutnya dilakukan evaluasi kesesuaian terhadap standar yang berlaku, yaitu standar Bina Marga. Evaluasi ini bertujuan untuk menilai apakah parameter geometrik jalan yang diperoleh di lapangan telah memenuhi kriteria teknis yang dipersyaratkan, khususnya dari aspek keselamatan, kenyamanan, dan fungsi pelayanan jalan.

Pada aspek geometrik memanjang, parameter utama yang dianalisis adalah kelandaian (*grade*). Berdasarkan Tabel 1, nilai grade pada seluruh STA berkisar antara 0,27% hingga 0,97%. Jika dibandingkan dengan standar Bina Marga, kelandaian untuk jalan lokal umumnya diperbolehkan hingga batas maksimum sekitar 8%–10% tergantung kondisi medan, sedangkan untuk kenyamanan optimal biasanya berada di bawah 3%. Dengan demikian, seluruh segmen di STA 1 hingga STA 5 dapat dikategorikan memenuhi standar yang berlaku karena nilai kelandaian masih berada dalam rentang yang sangat landai.

Kondisi ini menunjukkan bahwa secara vertikal, jalan memiliki profil yang relatif aman dan tidak menimbulkan hambatan berarti bagi kendaraan, baik dari sisi kemampuan menanjak maupun stabilitas saat menurun. Meskipun demikian, terdapat indikasi fluktuasi elevasi yang tidak sepenuhnya seragam antar STA, yang dapat mempengaruhi kenyamanan berkendara, namun tidak sampai melanggar batas toleransi teknis yang ditetapkan.

Berbeda dengan kondisi geometrik memanjang, hasil evaluasi pada aspek geometrik melintang menunjukkan ketidaksesuaian yang cukup signifikan terhadap standar. Berdasarkan Tabel 2, nilai kemiringan melintang (*cross slope*) pada seluruh STA berada pada kisaran 6,5% hingga 19,0%. Sementara itu, standar Bina Marga mensyaratkan kemiringan melintang untuk perkerasan aspal berada pada kisaran 2%–4%, dengan batas maksimum umumnya tidak melebihi 8%. Oleh karena itu, seluruh STA dalam penelitian ini tidak memenuhi standar yang dipersyaratkan. Secara khusus, STA 3 dan STA 4 menunjukkan kondisi paling kritis dengan nilai *cross slope* masing-masing sebesar 19,0% dan 14,8%, yang jauh melampaui batas maksimum dan berpotensi membahayakan pengguna jalan. Kondisi ini mengindikasikan adanya ketidakseimbangan penampang jalan serta kemungkinan deformasi struktur yang menyebabkan perbedaan elevasi yang ekstrem.

Selain itu, ketidakteraturan nilai *cross slope* pada setiap STA juga menunjukkan bahwa penampang melintang jalan tidak konsisten dan tidak membentuk profil *crown* yang ideal. Dalam standar geometrik jalan, bentuk *crown* sangat penting untuk mendukung sistem drainase permukaan agar air dapat mengalir ke sisi jalan secara efektif. Ketidaksesuaian ini berimplikasi pada potensi terjadinya genangan air di beberapa bagian jalan serta erosi pada bagian lain yang memiliki kemiringan berlebih. Dari aspek keselamatan, kemiringan melintang yang terlalu besar dapat meningkatkan risiko kendaraan kehilangan kestabilan lateral, terutama pada kondisi jalan basah atau licin.

Secara keseluruhan, hasil evaluasi menunjukkan bahwa meskipun parameter geometrik memanjang telah memenuhi standar Bina Marga, parameter geometrik melintang justru tidak memenuhi kriteria yang dipersyaratkan. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja geometrik jalan secara umum masih belum optimal, terutama dari aspek penampang melintang. Oleh karena itu, diperlukan upaya perbaikan geometrik, khususnya pada pengaturan ulang kemiringan melintang dan pembentukan profil jalan yang lebih seragam, guna meningkatkan keselamatan, kenyamanan, serta mendukung fungsi infrastruktur jalan yang berkelanjutan.

Analisis Keterkaitan dengan SDGs *Goal* 9

Dalam perspektif pembangunan berkelanjutan, khususnya *Sustainable Development Goals* (SDGs) *Goal*

 ISSN 2987-677x

9 yang menekankan pembangunan infrastruktur yang tangguh, inklusif, dan berkelanjutan, kondisi geometrik jalan yang tidak seragam ini dapat dikaitkan secara langsung dengan aspek Keselamatan dan Kesehatan Kerja serta Lingkungan (K3L). Infrastruktur jalan yang tidak memenuhi standar geometrik, khususnya pada penampang melintang, menunjukkan bahwa prinsip K3L belum diterapkan secara optimal dalam perencanaan maupun evaluasi teknis. Dalam konteks K3L, keselamatan pengguna jalan merupakan prioritas utama yang harus dijamin melalui desain geometrik yang sesuai standar. Ketidaksesuaian tersebut berpotensi mempercepat degradasi jalan, meningkatkan risiko kecelakaan lalu lintas, serta menurunkan kualitas pelayanan jalan, yang secara jelas bertentangan dengan prinsip keselamatan dan keberlanjutan yang diusung dalam SDGs Goal 9.

Keterkaitan antara aspek geometrik jalan dan SDGs *Goal* 9 dalam perspektif K3L juga terlihat dari bagaimana kualitas desain dan kondisi eksisting jalan mempengaruhi tingkat risiko bagi pengguna serta dampaknya terhadap lingkungan sekitar. Jalan dengan geometrik yang tidak memenuhi standar tidak hanya menurunkan tingkat pelayanan (*level of service*), tetapi juga meningkatkan potensi kecelakaan dan konsumsi energi kendaraan akibat kondisi jalan yang tidak efisien. Hal ini secara tidak langsung berdampak pada peningkatan emisi dan kerusakan lingkungan, sehingga menunjukkan bahwa aspek keselamatan dan lingkungan dalam K3L saling berkaitan erat dalam mendukung pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan.

Dengan demikian, pencapaian SDGs Goal 9 dalam konteks infrastruktur jalan tidak dapat dilepaskan dari penerapan prinsip K3L secara menyeluruh. Evaluasi geometrik jalan harus dilakukan secara komprehensif dengan mempertimbangkan seluruh parameter, baik memanjang maupun melintang, sebagai bagian dari upaya mitigasi risiko dan peningkatan keselamatan pengguna. Ketidakseimbangan antara kedua aspek geometrik tersebut mencerminkan belum optimalnya penerapan prinsip K3L, sehingga diperlukan perbaikan teknis yang berorientasi pada keselamatan, efisiensi, dan keberlanjutan agar infrastruktur jalan dapat berfungsi secara optimal dalam mendukung pembangunan yang berkelanjutan.

Rekomendasi Perbaikan

Berdasarkan hasil evaluasi geometrik memanjang dan melintang serta keterkaitannya dengan standar Bina Marga, dan prinsip SDGs *Goal* 9, maka rekomendasi pada ruas Jalan Dusun Paritan disusun secara komprehensif dengan menitikberatkan pada aspek teknis, keselamatan (K3L), dan keberlanjutan infrastruktur. Secara teknis, prioritas utama perbaikan difokuskan pada penanganan geometrik melintang yang tidak memenuhi standar. Diperlukan rekonstruksi penampang melintang dengan membentuk kembali profil jalan (*regrading*) agar mencapai kemiringan melintang ideal sebesar 2%–4% untuk perkerasan aspal. Proses ini dapat dilakukan melalui pekerjaan penambahan atau pengurangan material (*cut and fill*) pada sisi jalan yang mengalami perbedaan elevasi ekstrem, khususnya pada STA 3 dan STA 4 yang teridentifikasi sebagai segmen kritis.

Selain itu, perlu dilakukan perataan ulang (*reshaping*) permukaan jalan guna menghilangkan deformasi yang menyebabkan ketidaksimetrian penampang dan memastikan terbentuknya *crown* jalan yang efektif dalam mendukung sistem drainase. Peningkatan sistem drainase menjadi rekomendasi penting yang tidak terpisahkan dari perbaikan geometrik. Kemiringan melintang yang tidak sesuai telah berpotensi menyebabkan genangan air maupun aliran permukaan yang tidak terkendali. Oleh karena itu, perlu direncanakan saluran drainase samping yang memadai serta memastikan integrasi antara kemiringan permukaan jalan dan arah aliran air. Dengan demikian, risiko kerusakan dini akibat infiltrasi air ke lapisan perkerasan dapat diminimalkan.

Dari aspek struktural, pada titik-titik yang menunjukkan indikasi penurunan signifikan, diperlukan evaluasi lebih lanjut terhadap kondisi tanah dasar (*subgrade*). Apabila ditemukan daya dukung tanah yang rendah, maka perlu dilakukan perbaikan tanah (*soil improvement*) seperti pemadatan ulang, stabilisasi tanah, atau penggunaan material perkuatan. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kestabilan struktur jalan dalam jangka panjang dan mencegah terjadinya deformasi ulang setelah perbaikan geometrik dilakukan.

Dalam perspektif Keselamatan dan Kesehatan Kerja serta Lingkungan (K3L), direkomendasikan pemasangan perlengkapan jalan seperti rambu peringatan, marka jalan, dan *delineator* pada segmen dengan kondisi geometrik yang berisiko tinggi. Upaya ini penting sebagai langkah mitigasi sementara sebelum dilakukan perbaikan menyeluruh. Selain itu, perlu diterapkan sistem pemeliharaan rutin dan berkala untuk memastikan kondisi geometrik jalan tetap sesuai standar dan tidak mengalami penurunan kualitas secara signifikan.

Dari sudut pandang pembangunan berkelanjutan (SDGs *Goal* 9), rekomendasi yang diberikan tidak hanya bersifat perbaikan teknis jangka pendek, tetapi juga menekankan pentingnya pendekatan perencanaan dan pengelolaan infrastruktur yang berkelanjutan. Hal ini mencakup penerapan standar desain yang konsisten, pengawasan kualitas konstruksi, serta integrasi aspek keselamatan dan lingkungan dalam setiap tahap siklus hidup jalan. Evaluasi berkala terhadap kondisi geometrik jalan juga perlu dilakukan sebagai bagian dari sistem monitoring infrastruktur untuk memastikan bahwa jalan tetap berfungsi secara optimal dalam mendukung konektivitas dan aktivitas ekonomi masyarakat.

 ISSN 2987-677x

Dengan demikian, rekomendasi yang dirumuskan tidak hanya bertujuan untuk memperbaiki ketidaksesuaian geometrik yang ada, tetapi juga untuk meningkatkan kualitas infrastruktur jalan secara menyeluruh agar memenuhi prinsip keselamatan, efisiensi, dan keberlanjutan sesuai dengan standar Bina Marga, serta target SDGs *Goal* 9.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis menunjukkan bahwa parameter geometrik memanjang pada ruas jalan yang ditinjau memiliki nilai kelandaian yang relatif landai (0,27%–0,97%) dan telah memenuhi standar Bina Marga. Namun, pada aspek geometrik melintang ditemukan ketidaksesuaian signifikan, di mana nilai kemiringan melintang (*cross slope*) berkisar antara 6,5% hingga 19,0%, melampaui batas standar yang dipersyaratkan (2%–4%), serta menunjukkan ketidakteraturan penampang jalan. Evaluasi ini mengindikasikan bahwa secara keseluruhan kinerja geometrik jalan belum optimal karena tidak terpenuhinya kesesuaian antar parameter secara terpadu.

Ketidakseimbangan antara geometrik memanjang dan melintang tersebut berdampak pada penurunan aspek keselamatan, kenyamanan, serta efektivitas sistem drainase, yang pada akhirnya belum mendukung pencapaian infrastruktur yang tangguh dan berkelanjutan sebagaimana ditargetkan dalam SDGs *Goal* 9. Oleh karena itu, diperlukan upaya perbaikan yang terfokus pada penataan ulang penampang melintang, peningkatan sistem drainase, serta penguatan struktur tanah dasar pada segmen kritis. Dengan penerapan rekomendasi tersebut secara komprehensif dan berkelanjutan, diharapkan kualitas geometrik jalan dapat memenuhi standar teknis yang berlaku serta mendukung tercapainya infrastruktur yang aman, efisien, dan berkelanjutan.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Transportasi Program Studi Teknik Sipil Universitas Hasyim Asy'ari Tebuireng Jombang atas dukungan, fasilitas, serta bantuan dalam proses pengambilan data.

Referensi

Direktorat Jenderal Bina Marga. (2021). *Pedoman desain geometrik jalan (Pedoman Nomor 13/P/BM/2021).* Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Jima, D., & Sipos, T. (2022). The Impact of Road Geometric Formation on Traffic Crash and Its Severity Level. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(14). https://doi.org/10.3390/su14148475

Novriani, S., Setiawan, A., & Chairunissa, D. H. (2025). Penerapan standar PDGJ 2021 alam perencanaan geometrik jalan baru. *Jurnal Konstruksia*, *16*(2), 132–145. http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

Nugroho, R. B., Rifai, A. I., & Akhir, A. F. (2023). The geometric design of horizontal alignment: A case of Bojonggede-Kemang Area Route, West Java Indonesia. *Indonesian Journal of Multidisciplinary Science*, *1*(1), 331–343. https://doi.org/10.55324/ijoms.v1i1.392

Palupi, R., Mahmud, M., Khilmi, M., Triawati, I., Winoto, D., & Wibowo, A. (2024). The Influence of road geometric design on traffic accident rates on Jalan Mayjend Sungkono, Malang City. *International Journal of Sustainable Social Culture, Science Technology, Management, and Law Humanities*, *1*(2), 66–75. https://doi.org/10.71131/f30zbm10

Rengarasu, T. M., Hagiwara, T., & Hirasawa, M. (2009). Effects of road geometry and cross-section variables on traffic accidents: Study Using homogeneous road segments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *2102*(1), 34-42.

Sevan Alif Maulana, Ginting, J. M., & Adinda Fajarika. (2024). Analysis of Road Geometric Design on the 2 Km Majalengka – Cikijing Road Section (Kasturi Street Case Study). *LEADER: Civil Engineering and Architecture Journal*, *2*(2), 773–777. https://doi.org/10.37253/leader.v2i2.9548

Teratak, S., Hitam, A., Raya, K. S., Horizontal, A., Vertikal, A., Henti, J. P., Marga, S. B., & Jalan, K. (2026). *Evaluasi geometri jalan menurut Bina Marga pada ruas jalan Kotik Bihin, Seberang Teratak Air Hitam, Kecamatan Sentajo Raya*. *8*(1), 101–111.

Vayalamkuzhi, P., & Amirthalingam, V. (2016). Influence of geometric design characteristics on safety under heterogeneous traffic flow. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, *3*(6), 559–570. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.05.006

Wang, C., A. Quddus, M., Ison, S. G. (2013). The effect of traffic and road characteristics on road safety: A review and future research direction. *Safety Science, Volume 57, 264-275*, https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.02.012.

Wang, Y., Liu, Y., Li, Z., Gu, T., Pauwels, P., Yu, B. (2024). Automatic cross section extraction and cross slope measurement for curved ramps using light detection and ranging point clouds. *Measurem*ent, 228, 114369, https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114369.

Xu, J., Jia, M., Gao, C., & Lv, W. (2023). Limited Response of Curve Safety Level to Friction Factor and Superelevation Variation under Repeated Traffic Loads. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(24). https://doi.org/10.3390/su152416923

Yang, W., Han, S. (2025) Direct and indirect effects of road attributes on traffic safety. *Journal of Safety Research, 93*, 156-169, https://doi.org/10.1016/j.jsr.2025.02.017.

 ISSN 2987-677x

Analisis *Delay Hydrostatic Test* Akibat Kebocoran *Tube* dan Implikasinya Terhadap *COD* & Biaya Proyek PLTU

Hendra Hadi Saputra[1] Bambang Setiaji[1] Aditya Prasetya Wardana[1] Andrew Joewono[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ hh.saputra88@gmail.com

Keterlambatan pelaksanaan *Boiler Hydrostatic Test (BHT)* pada proyek Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Kalselteng 2 menjadi salah satu contoh nyata bagaimana kegagalan teknis dapat berdampak besar terhadap jadwal dan biaya proyek konstruksi energi. Permasalahan utama pada kasus ini adalah munculnya kebocoran pipa *Secondary Reheater Outlet (SRH-O)* akibat fenomena *pinhole leakage* yang ditemukan saat pelaksanaan *hydrostatic test*. Kebocoran tersebut menyebabkan keterlambatan pencapaian *Commercial Operation Date (COD)* serta menimbulkan kerugian finansial yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara kegagalan material, kelemahan manajemen konstruksi, serta dampak ekonomi yang timbul akibat keterlambatan pengujian. Metode analisis yang digunakan meliputi *Root Cause Failure Analysis (RCFA)*, analisis metalurgi, analisis deskriptif, serta evaluasi manajemen risiko proyek. Hasil investigasi menunjukkan bahwa kegagalan terjadi akibat kombinasi beberapa faktor, yaitu buruknya sistem preservasi material selama masa konstruksi, adanya korosi mikrobiologi atau *Microbiologically Influenced Corrosion (MIC)*, akumulasi air stagnan di dalam pipa, serta lemahnya pengendalian kualitas pekerjaan konstruksi. Investigasi metalurgi menunjukkan adanya peningkatan kekerasan material hingga 252 *HV* akibat terbentuknya *strain-induced martensite* yang memperburuk ketahanan material terhadap korosi. Dari sisi proyek, keterlambatan *hydrostatic test* menyebabkan penundaan *milestone* proyek selama sekitar 7–8 bulan. Selain biaya perbaikan teknis, proyek juga mengalami *opportunity loss* akibat keterlambatan operasi pembangkit, yang nilainya mencapai ratusan miliar rupiah.

Kata Kunci: *Boiler Hydrostatic Test*, Korosi *MIC*, PLTU, *RCFA*, Manajemen Risiko, Keterlambatan Proyek

Pendahuluan

Pada proyek pembangkit listrik berbasis *EPC (Engineering, Procurement, and Construction),* pengendalian kualitas material dan pengendalian jadwal merupakan faktor yang sangat menentukan keberhasilan proyek. Salah satu tahapan penting dalam proses *commissioning boiler* adalah *Boiler Hydrostatic Test (BHT),* yaitu pengujian tekanan menggunakan media air untuk memastikan integritas sistem perpipaan sebelum unit mulai beroperasi.

Pada proyek PLTU Kalselteng 2 berkapasitas 2 × 100 MW, pelaksanaan *hydrostatic test* mengalami keterlambatan yang cukup signifikan akibat munculnya kebocoran pada pipa *Secondary Reheater Outlet (SRH-O*). Kebocoran tersebut terjadi pada area lekukan pipa atau *elbow* dan ditemukan saat pengujian mencapai tekanan sekitar 50 *barg*. Permasalahan ini menjadi sangat kritis karena *hydrostatic test* merupakan salah satu milestone utama sebelum tahapan *first firing* dan sinkronisasi pembangkit dilakukan. Kegagalan pada tahap ini secara langsung berdampak terhadap keterlambatan *Commercial Operation Date (COD*), peningkatan biaya proyek, serta potensi *liquidated damages* terhadap kontraktor.

Selain faktor teknis, kasus ini juga menunjukkan pentingnya penerapan manajemen risiko dan sistem preservasi material selama masa konstruksi. Material pipa yang telah berada di lokasi proyek sejak tahun 2019 mengalami *idle time* cukup panjang hingga proses pengujian dilakukan pada tahun 2022. Dalam kondisi lingkungan tropis yang lembap, kondisi ini menjadi faktor yang mempercepat terjadinya degradasi material.

Metode

Studi kasus ini menggunakan pendekatan multi-metode yang terintegrasi untuk mengidentifikasi permasalahan dari aspek teknis, manajerial, hingga ekonomi secara komprehensif. Proses pengumpulan data dilakukan melalui studi dokumen, observasi lapangan, pengujian langsung, serta analisis laboratorium guna memastikan validitas dan akurasi informasi yang diperoleh. Studi dokumen mencakup peninjauan buku kontrak, *Inspection & Test Plan* (ITP), gambar teknik, laporan pengelasan, dan hasil pengujian NDT, sedangkan observasi lapangan dilakukan melalui *site monitoring*, *joint inspection*, dan *walkdown* untuk mengidentifikasi pekerjaan sisa serta penyimpangan konstruksi. Pengujian langsung dilakukan melalui *air*

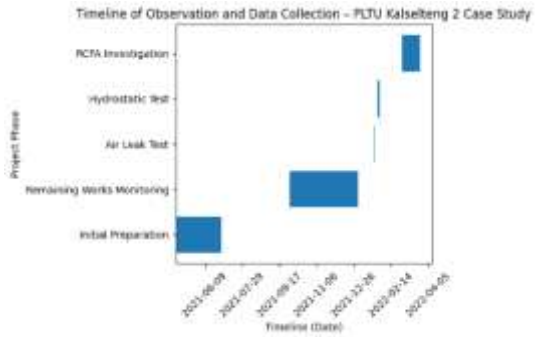
 ISSN 2987-677x

leak test, *hydrostatic test*, dan verifikasi sambungan las menggunakan uji radiografi. Selain itu, investigasi laboratorium dengan pendekatan *Root Cause Failure Analysis (RCFA)* digunakan untuk menentukan penyebab kegagalan material secara ilmiah melalui analisis *SEM, EDS*, metalografi, dan uji kekerasan. Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan berbagai metode, antara lain analisis deskriptif untuk menyusun *timeline* proyek, analisis komparatif terhadap standar ASME B31.1, diagram *Fishbone* untuk pemetaan akar masalah berdasarkan konsep 6M, analisis dampak ekonomi untuk menghitung potensi kerugian finansial akibat keterlambatan operasi pembangkit, serta metode HIRA/IBPR guna memastikan pengendalian risiko K3L melalui penerapan *Job Safety Analysis* dan *Working Permit*. Untuk metode yang sudah standar tidak perlu dijelaskan terlalu panjang, cukup menyebutkan standar yang digunakan.

Hasil Kerja

Keterlambatan *Hydrostatic Test*

Pada awalnya, *Boiler Hydrostatic Test Unit 1* direncanakan dilaksanakan pada Juni 2021. Namun dalam pelaksanaannya, berbagai kendala menyebabkan pengujian baru dapat dilaksanakan pada Januari 2022.



Gambar 1. *Timeline* Kronologi Studi Kasus

Beberapa faktor penyebab keterlambatan antara lain:

- Dokumen *welding joint* dan *NDT* belum lengkap.
- *Remaining works* konstruksi belum selesai.
- Support dan *hanger* pipa belum optimal.
- Infrastruktur pendukung belum siap.
- *WWTP pond* mengalami kebocoran.
- Sistem preservasi belum berjalan baik.

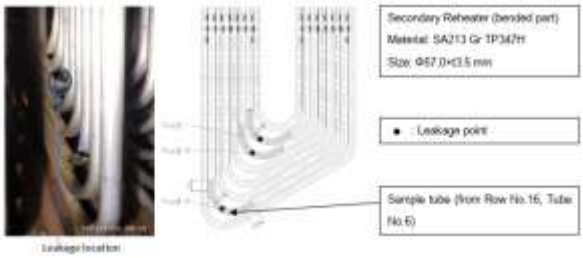
Selain itu, kesiapan fasilitas pendukung *seperti Water Treatment Plant (WTP)* dan *Waste Water Treatment Plant (WWTP)* juga belum optimal saat jadwal pengujian semakin dekat.

Munculnya Kebocoran Pipa

Pada tanggal 23 Januari 2022 dilakukan *air leak test* dan ditemukan satu titik kebocoran kecil berupa *pinhole leakage* pada Panel 29. Setelah dilakukan perbaikan sementara, pengujian dilanjutkan menggunakan *hydrostatic test*. Namun pada tanggal 29 Januari 2022 saat tekanan mencapai sekitar 50 barg, ditemukan empat titik kebocoran tambahan pada area *Secondary Reheater Outlet*.

Kebocoran terjadi pada panel:

- Panel 1
- Panel 16
- Panel 29



Gambar 2. Lokasi Titik Kebocoran

Analisis Kegagalan Material

Material SA213 TP347H

Pipa yang digunakan pada sistem *Secondary Reheater Outlet* merupakan material *stainless steel* SA213 *Grade* TP347H. Material ini termasuk baja tahan karat austenitik yang dirancang untuk mampu bekerja pada temperatur tinggi. Secara teoritis, material ini memiliki ketahanan korosi yang cukup baik. Namun hasil investigasi menunjukkan adanya kerusakan berupa *pinhole leakage* akibat korosi lokal.

Hasil Investigasi Metalurgi

Investigasi dilakukan melalui *Root Cause Failure Analysis (RCFA)* yang melibatkan manufaktur IHI dan pihak ketiga AJTech.

a. *Pitting Corrosion*
Hasil investigasi menunjukkan adanya *pitting corrosion* atau korosi sumuran pada area lekukan pipa. Korosi ini terjadi akibat:
- Akumulasi air stagnan
- Kelembapan tinggi
- Tidak optimalnya preservasi material
- Keberadaan unsur korosif seperti *Copper (Cu)*

Korosi sumuran bersifat sangat lokal namun dapat menghasilkan lubang kecil yang akhirnya menyebabkan kebocoran.



Gambar 3. *Pitting Corrosion*

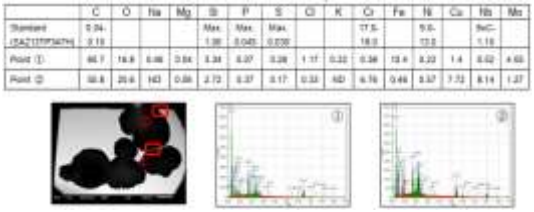
b. *Microbiologically Influenced Corrosion (MIC)*
Selain korosi kimia biasa, ditemukan pula indikasi korosi mikrobiologi. Analisis menggunakan SEM dan EDS menunjukkan:
- Adanya biofilm
- Konsentrasi Sulfur (S) tinggi
- Konsentrasi *Chlorine (Cl)* tinggi
- Indikasi aktivitas *Sulfate Reducing Bacteria (SRB)*

 ISSN 2987-677x

Fenomena ini dikenal sebagai *Microbiologically Influenced Corrosion (MIC). MIC* terjadi ketika mikroorganisme berkembang pada air stagnan dan membentuk lingkungan korosif pada permukaan logam.



Gambar 4. *Inside Tube* dengan Analisa *MIC*



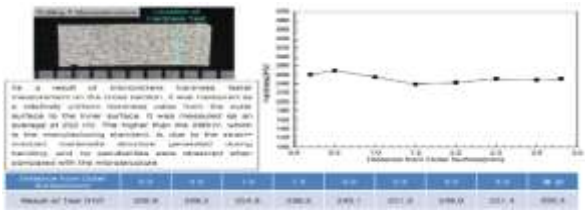
Gambar 5. *EDS Analysis*

Perubahan Struktur Mikro

Hasil pengujian metalografi menunjukkan adanya perubahan mikrostruktur akibat proses bending.
Material mengalami transformasi sebagian dari:

- *Austenite → Strain-Induced Martensite*.

Perubahan ini meningkatkan kekerasan material hingga sekitar 252 *HV*, sementara standar manufaktur hanya sekitar 200 *HV*. Peningkatan kekerasan tersebut menyebabkan material menjadi lebih rentan terhadap korosi lokal.



Gambar 6. Analisa *Microvickers Hardness Test*

Analisis Manajemen Proyek

Lemahnya Pengendalian Konstruksi

Kasus ini tidak hanya disebabkan faktor material, tetapi juga lemahnya kontrol kualitas konstruksi. Beberapa temuan di lapangan menunjukkan:

- Baut belum dikencangkan sempurna.
- *Support* dan *hanger* tidak lurus.
- Pengelasan belum selesai.
- Dokumentasi mutu tidak lengkap.
- *Housekeeping boiler* belum optimal.

Hal tersebut menunjukkan bahwa pengendalian QA/QC belum berjalan secara efektif.

Kegagalan Sistem Preservasi

Salah satu akar masalah terbesar adalah kegagalan preservasi material selama masa konstruksi. Material telah berada di lapangan sejak 2019 namun tidak mendapatkan perlindungan optimal hingga 2022. Dalam industri pembangkit, preservasi biasanya dilakukan menggunakan:

- *Nitrogen blanketing.*
- Pengendalian kelembapan.
- *Monitoring* kondisi internal pipa.

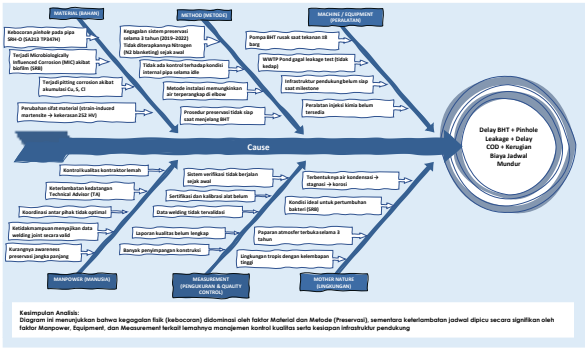
Kegagalan preservasi menyebabkan air masuk dan terjebak di dalam sistem perpipaan. Dalam kondisi tropis dan lembap, air stagnan menjadi media ideal untuk pertumbuhan bakteri korosif.

Kendala Infrastruktur Pendukung

Selain masalah material, proyek juga menghadapi berbagai kendala fasilitas pendukung, seperti:

- *WWTP* pond bocor.
- Pompa *hydrotest* mengalami kerusakan.
- Sistem *chemical injection* belum siap.
- Air demineralisasi terbatas.

Akibatnya proses *hydrostatic test* harus dilakukan secara bertahap dan mengalami beberapa kali penundaan.



Gambar 7. *Fishbone Diagram*

Dampak Terhadap Proyek

Dampak Jadwal

Keterlambatan hydrostatic test menyebabkan bergesernya *milestone* proyek secara signifikan. Tahapan yang terdampak antara lain:

- *Hydrostatic Test*
- *Boiler Dry Out*
- *First Firing*
- *Steam Blowing*
- *Synchronization*
- *Commercial Operation Date (COD)*

Secara keseluruhan keterlambatan diperkirakan mencapai sekitar 7–8 bulan.

Dampak Finansial

Selain keterlambatan jadwal, proyek juga mengalami kerugian ekonomi yang besar. Kerugian tersebut meliputi:

a. Biaya Perbaikan
   - *Cutting tube.*
   - *Re-welding.*
   - Pengujian ulang.
   - Investigasi laboratorium.
   - Penggantian material.

 ISSN 2987-677x

b. *Opportunity Loss*
Keterlambatan operasi pembangkit menyebabkan hilangnya potensi produksi listrik. Diperkirakan:
- *Delay* sekitar 225 hari.
- Potensi energi hilang sekitar 432 GWh.
- *Opportunity loss* mencapai ratusan miliar rupiah.

c. Potensi *Liquidated Damages*
Keterlambatan proyek juga berpotensi menimbulkan sanksi kontraktual berupa *liquidated damages* terhadap kontraktor.

Analisis Risiko dan Pembelajaran

Kasus PLTU Kalselteng 2 memberikan pelajaran penting mengenai pentingnya manajemen risiko pada proyek konstruksi pembangkit. Risiko teknis kecil dapat berkembang menjadi masalah besar apabila:
- Tidak dimitigasi sejak awal.
- Dokumentasi tidak lengkap.
- Kontrol kualitas lemah.
- Preservasi material diabaikan.

Dalam proyek energi berskala besar, pengendalian risiko harus dilakukan sejak tahap:
1. *Engineering*
2. *Procurement*
3. *Construction*
4. *Commissioning*
5. *Preservation*

Selain itu, koordinasi antar *stakeholder* juga sangat penting agar setiap deviasi teknis dapat segera ditindaklanjuti.

Rekomendasi Perbaikan

Berdasarkan hasil investigasi dan analisis, terdapat beberapa rekomendasi utama:

Penguatan Sistem Preservasi
- Penerapan nitrogen *blanketing* secara konsisten.
- Monitoring kelembapan internal pipa.
- Pemeriksaan berkala kondisi material.

Penguatan QA/QC
- Verifikasi *welding joint* lebih ketat.
- Pengawasan *remaining works.*
- Audit dokumentasi mutu.
- Penguatan inspeksi lapangan.

Peningkatan Manajemen Risiko
- Identifikasi risiko sejak awal proyek.
- *Monitoring* risiko secara berkala.
- Integrasi *risk register* dengan milestone proyek.
- Penguatan mitigasi teknis.

Kesiapan Infrastruktur Pendukung
- *WTP* dan *WWTP* harus siap sebelum *commissioning*.
- Peralatan *hydrotest* harus diuji lebih awal.
- Penyediaan air demineralisasi harus dipastikan.

Kesimpulan

Kasus keterlambatan *Boiler Hydrostatic Test* pada proyek PLTU Kalselteng 2 menunjukkan bahwa kegagalan teknis dalam proyek energi tidak pernah berdiri sendiri. Kebocoran pipa yang terjadi merupakan hasil interaksi kompleks antara:
- Kegagalan preservasi material.
- Korosi kimia dan mikrobiologi.
- Perubahan struktur mikro material.
- Lemahnya kontrol kualitas konstruksi.
- Ketidaksiapan infrastruktur pendukung.

Dampak yang ditimbulkan tidak hanya berupa kegagalan teknis, tetapi juga menyebabkan keterlambatan *COD* dan kerugian finansial yang sangat besar. Melalui kasus ini dapat dipahami bahwa keberhasilan proyek pembangkit tidak hanya ditentukan oleh desain dan teknologi, tetapi juga oleh kualitas manajemen konstruksi, disiplin *QA/QC*, serta efektivitas manajemen risiko selama seluruh siklus proyek. Keterlambatan pelaksanaan *Boiler Hydrostatic Test (BHT)* dari target Juni 2021 menjadi Januari 2022 disebabkan oleh lemahnya administrasi proyek dan pengendalian kualitas. Ketidaksiapan dokumen mutu, seperti data *welding joint* dan laporan *Non-Destructive Test (NDT)*, menunjukkan bahwa sistem dokumentasi dan verifikasi konstruksi tidak berjalan optimal sejak awal proyek.

Permasalahan administratif berkembang menjadi kegagalan teknis saat dilakukan *air test* dan *hydrostatic test*, yang ditandai dengan munculnya kebocoran pada beberapa area perpipaan *boiler*. Kondisi tersebut diperparah oleh ketidaksiapan peralatan, infrastruktur pendukung, serta adanya penyimpangan konstruksi yang menyebabkan proses pengujian dan perbaikan berlangsung berulang dan memicu keterlambatan proyek. Hasil *RCFA* menunjukkan bahwa kerusakan material disebabkan oleh kombinasi *Microbiologically Influenced Corrosion (MIC), pitting corrosion*, dan degradasi metalurgi akibat pembentukan *martensit*. Kondisi ini meningkatkan kekerasan sekaligus kerapuhan material pipa sehingga lebih rentan mengalami kerusakan saat menerima tekanan pengujian.

Proses pengujian dan perbaikan harus mengacu pada standar *ASME B31.1*. Berdasarkan klausul *Care of Works* dan *Indemnity*, seluruh tanggung jawab kerusakan berada pada pihak kontraktor, sehingga kegagalan teknis tidak hanya berdampak pada operasional proyek tetapi juga menimbulkan konsekuensi hukum dan finansial. Akar masalah utama dalam kasus ini adalah kegagalan preservasi material selama masa tunggu konstruksi yang panjang, terutama tidak diterapkannya metode *nitrogen blanketing*. Lemahnya manajemen proyek dan pengendalian kualitas menyebabkan degradasi material terjadi sebelum unit beroperasi dan berdampak pada keterlambatan proyek secara menyeluruh.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada General Manager PT PLN (Persero) Pusat Manajemen Proyek beserta seluruh jajaran manajemen dan rekan-rekan di lingkungan PT PLN (Persero) Pusat Manajemen Proyek atas dukungan, arahan, dan kerja sama yang diberikan selama proses penyusunan laporan ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Bapak Ir. Andrew Joewono, S.T., M.T., IPU., ASEAN Eng., APEC Eng.

 ISSN 2987-677x

selaku dosen pembimbing serta seluruh dosen pengajar atas ilmu, bimbingan, dan motivasi yang telah diberikan. Selain itu, penulis turut mengucapkan terima kasih kepada pihak institusi dan tim proyek atas data, informasi, dan pengalaman lapangan yang sangat berharga, serta kepada ibunda tercinta, istri, anak-anak, keluarga, dan rekan-rekan yang senantiasa memberikan doa, dukungan moral, semangat, dan motivasi hingga laporan ini dapat terselesaikan dengan baik.

Referensi

Abdurrohman, A. (2021). Analysis of Factors Causing The Delay of the Storage Tank Project Using Fault Tree Analysis. *IPTEK Journal of Proceedings Series*, *6*, 563. https://doi.org/10.12962/j23546026.y2020i6.11160

Adi, T. J. W., St, S., & Mt. (2015). *Estimasi biaya kontingensi berbasis resiko pada proyek epc (engineering, procurement and construction)*. http://digilib.its.ac.id/ITS-paper-91121150008244/39865

Akbar, S., Nursyifaulkhair, D., Nurdiwijayanto, L., Noviyanto, A., & Rochman, N. T. (2023). High-temperature failure of steel boiler tube secondary superheater in a power plant. *SINERGI*, *27*(1), 1. https://doi.org/10.22441/sinergi.2023.1.001

Akpe, A. T., Nuan, S. I., Solanke, B., & Iriogbe, H. O. (2024). Development and implementation of cost control strategies in oil and gas engineering projects. *Global Journal of Advanced Research and Reviews*, *2*(1), 1. https://doi.org/10.58175/gjarr.2024.2.1.0028

Ali, A. (2017). Failure Analysis and Prevention. *InTech eBooks*. https://doi.org/10.5772/65149

Ashari, M. E., & Armono, H. D. (2023). Analisis waktu dan biaya penyelesaian proyek transmisi 150 kV dengan pendekatan critical path method dan time cost trade off. *Rekayasa*, *16*(2), 195. https://doi.org/10.21107/rekayasa.v16i2.20501

Becker, W. T., & Shipley, R. J. (2020). Failure Analysis and Prevention. *ASM International eBooks*. https://doi.org/10.31399/asm.hb.v11.9781627082952

Chartier, R., & Stallybrass, P. (2012). What is a book? In *Cambridge Unive sity Press eBooks* (p. 188). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/cco9781139044073.009

Emeka-Okoli, S., Nwankwo, E. E., Nwankwo, T. C., & Otonnah, C. A. (2024). Navigating non-technical risks in the oil & gas industry: insights and frameworks - a review. *International Journal of Applied Research in Social Sciences*, *6*(3), 348. https://doi.org/10.51594/ijarss.v6i3.892

Latif, N., Triwibowo, Yuliani, H., & Astini, V. (2023). Failure investigation of superheater through investigate the nearest component. *E3S Web of Conferences*, *430*, 1242. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343001242

Mawadah, A. U., & Mulyana, A. E. (2023). Analisis supply material menggunakan metode economic order quantity pada proyek mesin pembersih magazine di perusahaan konstruksi FYZ. *Jurnal Akuntansi Ekonomi dan Manajemen Bisnis*, *11*(1), 122. https://doi.org/10.30871/jaemb.v11i1.5934

MJ, S., & Hasibuan, S. (2020). Strategi mitigasi risiko proyek konstruksi utilitas piping dan sipil: Studi kasus PDAM Jakarta. *Operations Excellence Journal of Applied Industrial Engineering*, *12*(1), 74. https://doi.org/10.22441/oe.2020.v12.i1.007

Mughni, A. F. A. Z., Tjendani, H. T., & Witjaksana, B. (2024). Time analysis using earned value method on preservation of section 5 pandaan toll exit road in malang. *International Journal Science and Technology*, *3*(1), 36. https://doi.org/10.56127/ijst.v3i1.1228

Mulyana, D. A., Santoso, D. G., & Permana, D. M. S. (2017). *Analisis Fenomena Water Hammer pada Pipa Steam 17 Bar*. http://repository.unpas.ac.id/31418/

Nugraha, A. D., Harianto, H., & Muflikhun, M. A. (2023). Failure in power plant system related to mitigations and economic analysis; A study case from steam power plant in Suralaya, Indonesia. *Results in Engineering*, *17*, 101004. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101004

Nyata, D. S., & Wiguna, I. P. A. (2018). Analisis keterlambatan pada proyek PT Jatim Taman Steel di Gresik dengan menggunakan lean six sigma framework. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, *16*(1), 15. https://doi.org/10.12962/j2579-891x.v16i1.2866

ISSN 2987-677x

Kajian Teknis Perubahan Garis Pantai Pesisir Muara Gembong Bekasi Menggunakan Metode MNDWI dan DSAS pada Citra Sentinel-2A (2019–2025) untuk Mendukung Perencanaan Pengelolaan Wilayah Pesisir

Johar Setiyadi[1,2] Awal Wahyu Amrulloh[2]
Agus Iwan Santoso[2,3] Yulianto[2]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2] Sekolah Tinggi Angkatan Laut

[3] Pusat Hidro-oseanografi TNI AL

✉ jsetiyadi99@gmail.com

Kawasan pesisir Muara Gembong, Bekasi, saat ini berada dalam titik nadir kerentanan ekologis akibat tekanan antropogenik yang masif dan dinamika hidro-oseanografi yang fluktuatif. Sebagai wilayah dengan sejarah konversi lahan hutan lindung menjadi area produksi sejak tahun 2005, Muara Gembong menghadapi ancaman serius berupa hilangnya sabuk hijau mangrove yang tercatat menyusut hingga 55% dalam empat dekade terakhir. Fenomena ini memicu ketidakseimbangan sedimentasi yang berdampak langsung pada perubahan morfologi garis pantai. Penelitian ini mengevaluasi dinamika spasial-temporal pesisir Muara Gembong dalam kurun waktu 2019 hingga 2025 dengan mengintegrasikan teknologi penginderaan jauh multispektral dari satelit Sentinel-2A. Pendekatan metodologis dilakukan melalui algoritma *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) yang memiliki akurasi ekstraksi badan air hingga 99,85%, kemudian dianalisis lebih lanjut menggunakan *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) untuk mengukur laju perubahan. Temuan ini menegaskan bahwa penurunan luasan mangrove berbanding lurus dengan peningkatan laju abrasi sebesar 52,40%. Data yang dihasilkan dalam penelitian ini memberikan kontribusi teoretis dan praktis yang krusial bagi pemerintah daerah dalam menyusun strategi mitigasi bencana pesisir serta kebijakan rehabilitasi ekosistem mangrove yang lebih terukur dan berkelanjutan di Kabupaten Bekasi.

Kata kunci: Perubahan Garis Pantai, Muara Gembong, Sentinel-2A, MNDWI, DSAS, Abrasi, Akresi

Pendahuluan

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia dengan garis pantai sepanjang kurang lebih 81.000 km dan luas perairan mencapai 5,8 juta km² (Haryanto, 2016). Wilayah pesisirnya bukan sekadar batas geografis, melainkan ruang hidup bagi jutaan orang yang menggantungkan mata pencaharian pada ekosistem laut dan darat yang saling terhubung. Namun tekanan terhadap kawasan ini terus meningkat. Secara global, kepadatan penduduk di zona pesisir diprediksi naik dari 87 orang/km² pada tahun 2000 menjadi 134 orang/km² pada tahun 2050 (Pussella dkk., 2015 dalam Afiifah & Tarya, 2024). Ketika pertambahan penduduk bertemu dengan dinamika alam seperti gelombang, pasang surut, arus, dan sedimentasi, perubahan morfologi garis pantai pun menjadi tak terhindarkan dan sering kali berlangsung lebih cepat dari yang bisa diantisipasi oleh kebijakan maupun infrastruktur yang ada.

Muara Gembong di Kabupaten Bekasi adalah salah satu potret paling jelas dari tekanan ganda itu. Kawasan ini menghadapi dua ancaman sekaligus yang saling memperburuk satu sama lain. Dari sisi alam, proses erosi dan sedimentasi bekerja terus-menerus membentuk ulang garis pantai. Dari sisi manusia, pembangunan *jetty* dan dinding pantai telah mengubah pola transportasi sedimen alami, sementara alih fungsi hutan mangrove menjadi tambak, permukiman, dan kawasan industri menghilangkan pelindung biologis yang selama ini menjadi benteng pertama daratan (Alimuddin & Aryanti, 2020). Konversi lahan ini bahkan sudah berlangsung jauh sebelum terbitnya SK Menteri Kehutanan No. 475/Menhut-II/2005, dan terus berlanjut hingga kini (Putra et al., 2016). Akibatnya, luas mangrove di Muara Gembong menyusut hingga 55% antara tahun 1974 dan 2019 (Nugraha dkk., 2019).

Hilangnya mangrove secara langsung memperlemah ketahanan garis pantai. Kajian terdahulu mencatat bahwa berkurangnya luasan mangrove berkontribusi terhadap laju abrasi sebesar 52,40%, sementara pemulihannya mampu mendorong proses akresi hingga 37,80% (Saputro, 2016 dalam Afiifah & Tarya, 2024). Tanpa pemantauan yang rutin dan terstruktur, ancaman berupa erosi pantai, pendangkalan alur pelabuhan, hingga banjir di muara dan hulu sungai akan terus menggerus kehidupan masyarakat pesisir Muara Gembong (Putra et al., 2016). Persoalannya, pemantauan konvensional di wilayah seluas ini membutuhkan biaya dan tenaga yang besar, sehingga sering kali tidak berkelanjutan.

Kajian ini memanfaatkan citra satelit Sentinel-2A untuk periode 2019 hingga 2025, mencakup enam desa pesisir di Kecamatan Muara Gembong: Pantai Bakti, Pantai Bahagia, Pantai Sederhana, Pantai Mekar, Jayasakti, dan Pantai Harapan Jaya. Garis pantai diekstraksi menggunakan algoritma *Modified*

 ISSN 2987-677x

Normalized Difference Water Index (MNDWI), yang mampu membedakan badan air dari daratan dengan akurasi mencapai 99,85% berkat sensitivitasnya terhadap panjang gelombang SWIR (Darmawan et al., 2024). Citra terlebih dahulu dikoreksi secara atmosferik dan radiometrik menggunakan perangkat lunak SNAP 12.0 sebelum diolah lebih lanjut. Hasil ekstraksi kemudian dianalisis secara kuantitatif menggunakan *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) pada ArcGIS 10.6 untuk menghitung parameter *Net Shoreline Movement* (NSM), *End Point Rate* (EPR), dan *Linear Regression Rate* (LRR) di tiap segmen pantai (Dewi et al., 2017 dalam Ambarwati et al., 2021), dengan validasi akurasi dilakukan melalui survei terestris dan perhitungan *Root Mean Square Error* (RMSE).

Metode

Studi ini dilaksanakan di wilayah pesisir Kecamatan Muara Gembong, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat, pada koordinat 106°58'40"BT–107°2'20"BT dan 5°55'00"LS–5°59'40"LS. Pengumpulan dan pengolahan data dilakukan pada periode Mei hingga Oktober 2025.

Data utama yang digunakan adalah tujuh *scene* citra satelit Sentinel-2A yang diunduh dari portal *Copernicus Open Access Hub*, mencakup tahun 2019 hingga 2025. Seluruh citra dipilih secara konsisten pada kondisi surut dan diakuisisi sekitar pukul 09.55–10.15 WIB untuk meminimalkan pengaruh variasi muka air terhadap posisi garis pantai yang terdeteksi. Data pasang surut digunakan sebagai acuan pemilihan waktu akuisisi. Sebagai pelengkap, data primer berupa posisi garis pantai aktual diambil langsung di lapangan menggunakan GPS RTK Trimble R12i dengan kontroler TSC5, yang mampu menghasilkan koordinat dengan ketelitian hingga tingkat sentimeter. Data lapangan ini sekaligus berfungsi sebagai titik kontrol untuk validasi hasil ekstraksi citra.

Pengolahan citra dilakukan menggunakan perangkat lunak SNAP 12.0 melalui tahapan subset area, koreksi atmosferik, dan penerapan algoritma *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI). Algoritma ini dipilih karena kemampuannya memisahkan badan air dari daratan dengan akurasi tinggi, memanfaatkan kombinasi band hijau (*Green*) dan inframerah gelombang pendek (SWIR). Hasil *raster* MNDWI kemudian dikonversi menjadi data vektor garis pantai tahunan menggunakan ArcGIS 10.6.

Analisis laju perubahan garis pantai dilakukan menggunakan ekstensi *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) yang dikembangkan oleh USGS, dengan interval transek setiap 50 meter sepanjang *baseline* yang telah ditetapkan. Tiga parameter statistik dihitung untuk setiap transek: *Net Shoreline Movement* (NSM) untuk total pergeseran, *End Point Rate* (EPR) untuk laju tahunan, dan *Linear Regression Rate* (LRR) untuk tren jangka panjang. Akurasi hasil ekstraksi diuji terhadap data lapangan menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE). Seluruh hasil disajikan secara spasial dalam bentuk peta perubahan garis pantai multitemporal, yang menjadi dasar penyusunan rekomendasi teknis pengelolaan pesisir.

Hasil Kerja

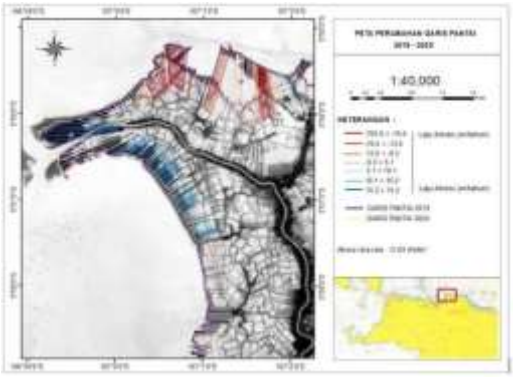
Dinamika Spasiotemporal Garis Pantai Muara Gembong 2019–2025

Analisis menggunakan metode MNDWI pada tujuh *scene* citra Sentinel-2A berhasil mengekstraksi posisi garis pantai tahunan dengan ketelitian yang tervalidasi. Selisih antara hasil ekstraksi citra dengan pengukuran GPS RTK di lapangan hanya sebesar 2,87 meter, yang membuktikan bahwa pendekatan penginderaan jauh ini cukup andal untuk memantau perubahan morfologi pesisir pada skala tahunan. Nilai validasi ini sejalan dengan standar yang diterima dalam kajian dinamika pesisir berbasis citra multispektral (Marfai et al., 2022).

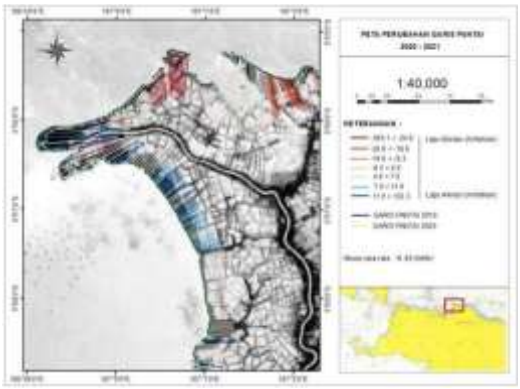
Hasil perhitungan DSAS menunjukkan bahwa selama periode 2019–2025, pesisir Muara Gembong mengalami tekanan abrasi yang dominan meskipun secara jumlah transek, proses akresi sedikit lebih banyak (52,56%). Paradoks ini mencerminkan bahwa meskipun sedimentasi dari muara Sungai Citarum masih berlangsung, intensitas dan dampak spasial abrasi jauh lebih destruktif. Nilai *End Point Rate* (EPR) rata-rata mencapai -11,22 m/tahun, dengan nilai ekstrem hingga -2.327,8 meter pada segmen utara yang paling terpapar energi gelombang Laut Jawa. Nilai *Shoreline Change Envelope* (SCE) rata-rata sebesar 133,41 meter, bahkan menyentuh 2.351,68 meter di titik paling kritis.

Peninjauan tahunan mengungkap pola fluktuasi yang penting untuk dipahami. Pada 2019–2021, abrasi berlangsung konsisten dengan NSM rata-rata bergerak dari -3,63 m hingga -6,45 m. Kemudian terjadi anomali pada 2021–2022, di mana akresi temporer mencapai NSM rata-rata +14,67 m menunjukkan fase produktivitas sedimen tinggi dari sistem fluvial Citarum, bukan pemulihan ekosistem yang sesungguhnya. Sebagaimana dikemukakan Paryono dkk (2017), karakteristik Delta Citarum sebagai *river-dominated delta* memang memungkinkan penambahan daratan yang cepat saat debit sedimen meningkat, namun material yang terbentuk umumnya berupa sedimen lepas yang rentan tersapu kembali. Hal ini terbukti pada periode 2022–2025, dimana abrasi kembali menguat dan mencapai puncaknya pada interval 2024–2025 dengan EPR -18,39 m/tahun, mengindikasikan bahwa daratan hasil akresi telah tersapu habis dan menggerus garis pantai lebih jauh ke arah darat. Perubahan garis pantai secara spasiotemporal untuk setiap periode pengamatan ditampilkan pada Gambar 1 hingga Gambar 6.

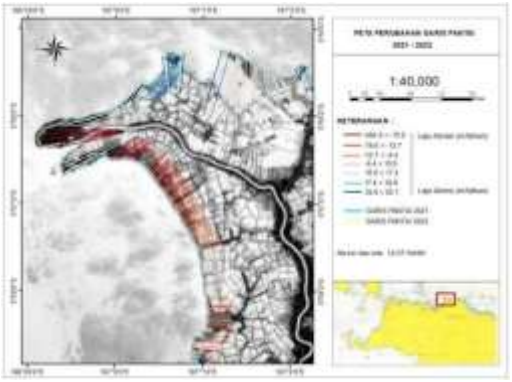
 ISSN 2987-677x



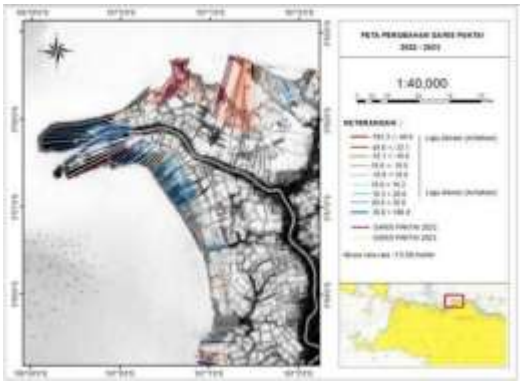
Gambar 1. Peta Perubahan Garis Pantai Tahun 2019-2020



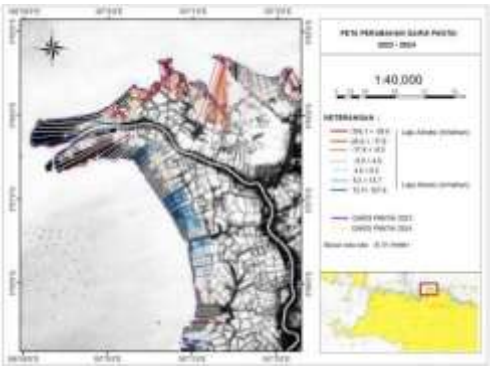
Gambar 2. Peta Perubahan Garis Pantai Tahun 2020-2021



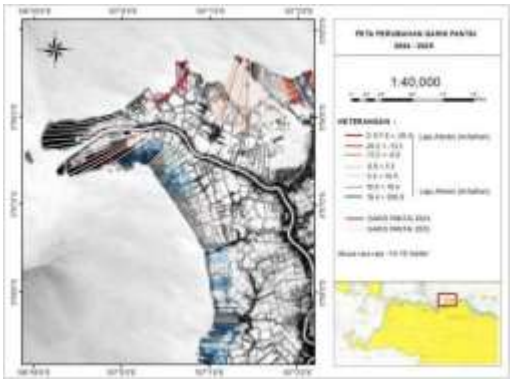
Gambar 3. Peta Perubahan Garis Pantai Tahun 2021-2022



Gambar 4. Peta Perubahan Garis Pantai Tahun 2022-2023



Gambar 5. Peta Perubahan Garis Pantai Tahun 2023-2024



Gambar 6. Peta Perubahan Garis Pantai Tahun 2024-2025

Implikasi Teknis dan Rekomendasi Pengelolaan Pesisir

Hasil analisis ini memiliki implikasi terhadap perencanaan tata ruang pantai di Kabupaten Bekasi. Dengan nilai SCE rata-rata 133,41 meter, penetapan sempadan pantai statis 100 meter sebagaimana lazim diatur dalam regulasi standar sudah tidak memadai untuk karakter pesisir Muara Gembong. Diperlukan pendekatan sempadan dinamis yang memproyeksikan kemunduran garis pantai 25–50 tahun ke depan berdasarkan data EPR, serta penetapan zona risiko tinggi (*red zone*) pada segmen dengan EPR di atas -10 m/tahun, di mana pemberian izin bangunan baru perlu dihentikan untuk melindungi keselamatan jiwa dan aset infrastruktur. Data SCE dan EPR dari penelitian ini dapat langsung diintegrasikan ke dalam revisi RTRW dan RZWP3K Kabupaten Bekasi sebagai basis ilmiah yang terukur.

Dari sisi keinsinyuran, kondisi tanah aluvial lunak di Delta Citarum menjadikan struktur keras (*hard engineering*) seperti seawall beton berisiko tinggi terhadap kegagalan akibat penurunan muka tanah. Pendekatan yang lebih tepat adalah *hybrid engineering*: kombinasi pemecah gelombang ambang rendah (*low-crested breakwater*) dari material bronjong atau bambu untuk meredam energi gelombang dan memerangkap sedimen, dilanjutkan dengan penanaman mangrove masif untuk mengonsolidasi daratan yang terbentuk. Strategi ini meniru mekanisme akresi alami yang terdeteksi pada 2021–2022, namun dengan dukungan struktural agar sedimen tidak tersapu musim

 ISSN 2987-677x

berikutnya. Anomali akresi tersebut juga membuktikan bahwa suplai sedimen dari hulu Citarum adalah faktor penentu ketahanan pesisir, sehingga pengelolaan wilayah ini tidak bisa dipisahkan dari manajemen DAS Citarum secara lintas sektoral, termasuk protokol pengerukan yang mempertimbangkan kebutuhan *sediment budget* di muara agar tidak terjadi *sediment starvation* yang mempercepat abrasi.

Terakhir, keberhasilan validasi metode dalam penelitian ini membuka peluang untuk melembagakannya sebagai Standar Operasional Prosedur (SOP) pemantauan pesisir tahunan. Dengan biaya yang jauh lebih rendah dibandingkan survei terestris konvensional, kombinasi MNDWI dan DSAS berbasis citra Sentinel-2A dapat diadopsi oleh Bappeda atau Dinas Kelautan Kabupaten Bekasi sebagai sistem pemantauan spasial rutin. Pemantauan tahunan ini akan memungkinkan evaluasi efektivitas bangunan pelindung pantai, deteksi dini titik abrasi baru, dan pada akhirnya menggeser paradigma pengelolaan pesisir, dari respons reaktif setelah bencana, menjadi manajemen risiko yang proaktif, adaptif terhadap perubahan iklim, dan berkelanjutan secara teknis maupun ekologis.

Kesimpulan

Kajian teknis perubahan garis pantai di pesisir Muara Gembong menggunakan metode MNDWI dan DSAS pada citra Sentinel-2A periode 2019–2025 menghasilkan beberapa temuan penting. Pertama, integrasi MNDWI dengan citra Sentinel-2A terbukti andal untuk ekstraksi garis pantai di wilayah delta berperairan keruh, dengan selisih validasi lapangan hanya 2,87 meter, jauh di bawah resolusi spasial citra 10 meter. Ini menegaskan bahwa metode penginderaan jauh ini layak dijadikan basis data teknis untuk pengambilan keputusan pengelolaan pesisir.

Secara spasiotemporal, pesisir Muara Gembong berada dalam kondisi defisit daratan yang kritis. Nilai rata-rata NSM sebesar -63,65 meter dan EPR -11,22 m/tahun mencerminkan dominasi abrasi selama tujuh tahun terakhir, dengan nilai pergeseran maksimum mencapai -2.327,8 meter pada segmen paling terdampak. Fenomena akresi temporer pada 2021–2022 (NSM +14,67 m) membuktikan peran vital suplai sedimen Sungai Citarum, namun SCE rata-rata 133,41 meter menunjukkan bahwa daratan baru yang terbentuk bersifat tidak stabil dan rentan tersapu kembali, sebagaimana terbukti pada lonjakan abrasi 2024–2025 dengan EPR mencapai -18,39 m/tahun.

Temuan ini secara keseluruhan menempatkan Muara Gembong pada tahap kerentanan tinggi yang membutuhkan intervensi segera dan terstruktur. Ke depan, diperlukan tiga langkah tindak lanjut yang saling melengkapi: reaktualisasi sempadan pantai berbasis proyeksi EPR jangka panjang dalam revisi RTRW dan RZWP3K Kabupaten Bekasi; penerapan hybrid engineering yang mengombinasikan struktur peredam gelombang dengan restorasi mangrove untuk menstabilkan sedimen; serta pelembagaan metode MNDWI-DSAS sebagai sistem pemantauan spasial tahunan oleh pemerintah daerah. Tanpa kebijakan yang terintegrasi lintas sektor, mencakup manajemen DAS Citarum di hulu hingga perlindungan pesisir di hilir, risiko kehilangan daratan secara permanen di Muara Gembong akan terus meluas dan semakin sulit dikendalikan.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Hidronav Tehnikatama atas dukungan peralatan survei lapangan yang memungkinkan pengambilan data garis pantai dengan presisi tinggi menggunakan GPS RTK. Apresiasi juga disampaikan kepada Badan Informasi Geospasial (BIG) atas penyediaan data pasang surut yang menjadi acuan penting dalam pemilihan waktu akuisisi citra satelit, serta kepada Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut (STTAL) atas dukungan teknis dalam pelaksanaan survei lapangan di wilayah pesisir Muara Gembong.

Referensi

Afiifah, D., & Tarya, A. (2024). Dinamika perubahan garis pantai di Muara Gembong, Bekasi, Jawa Barat pada tahun 2011-2021. *Journal of Tropical Marine Science, 7*(2), 113–127.

Alimuddin, & Aryanti, D. (2020). Coastline change study in Muara Gembong. *Jurnal Rona Teknik Pertanian, 13*(2), 71–83.

Ambarwati, L. D., Rudianto, & Dhira Khurniawan S. (2021). *Analisis perubahan garis pantai di Pesisir Pasuruan pada tahun 2000-2020 menggunakan aplikasi Digital Analysis Shoreline System (DSAS).* Malang: Universitas Brawijaya.

Artama, K. D., Karang, I., & Putra, I. N. G. (2019). Deteksi perubahan garis pantai menggunakan citra synthetic aperture radar (SAR) di Pesisir Tenggara Bali (Kabupaten Gianyar dan Klungkung). *Journal of Marine and Aquatic Sciences, 5*(2), 278.

Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing.* New York: Guilford Press.

Darmawan, S., Hernawati, R., Handiani, D. N., Ramadhani, A., & Permadi, D. A. (2024). Monitoring of Shoreline Based on Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) Algorithm in North Coast of Bekasi, West Java, Indonesia. *IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology (AGERS),* 133–136.

Haryanto, A. (2016). Faktor geografis dan konsepsi peran nasional sebagai sumber politik luar negeri Indonesia. *Jurnal Hubungan Internasional, 4*(2), 136–147.

Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. S. (2018). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide. *U.S.*

 ISSN 2987-677x

Geological Survey Open-File Report 2021–1091, 1–104.

Kawamuna, A., Suprayogi, A., & Wijaya, A. P. (2017). Analisis kesehatan hutan mangrove berdasarkan metode klasifikasi NDVI pada citra sentinel-2. *Jurnal Geodesi Undip, 6*(1), 277–284

Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation.* New Jersey: John Wiley & Sons.

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing, 17*(7), 1425–1432.

Meiliyani, L. (2020). *Perubahan garis pantai di Pesisir Utara Babo, Teluk Bintuni, Provinsi Papua Barat.* Manokwari: Universitas Papua.

Meizwar, D. A., & Tarya, A. (2024). Dinamika perubahan garis pantai di Muara Gembong, Bekasi, Jawa Barat pada tahun 2011-2021. *Journal of Tropical Marine Science, 7*(2), 113–127.

Nugraha, I. N. J., Karang, I., & Dharma, I. (2016). Ekstraksi garis pantai menggunakan citra satelit landsat di Pesisir Tenggara Bali (studi kasus Kabupaten Gianyar dan Klungkung). *Prosiding Seminar Nasional Kelautan Universitas Udayana*.

Pramudya, F. A. (2020). *Analisis perubahan garis pantai menggunakan citra satelit resolusi tinggi dan digital Shoreline Analysis System (DSAS) (studi kasus: Pesisir Kota Surabaya).* Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Putra, H., Prasetyo, L. B., & Santoso, N. (2016). Monitoring perubahan garis pantai dengan citra satelit di Muara Gembong Bekasi. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, 6*(2), 178-187.

Putri, D. R., Sukmono, A., & Sudarsono, B. (2018). Analisis kombinasi citra sentinel-1A dan citra sentinel-2A untuk klasifikasi tutupan lahan (studi kasus: Kabupaten Demak, Jawa Tengah). *Jurnal Geodesi Undip, 4*(2), 86–94.

Sinaga, S. H., Suprayogi, A., & Haniah. (2018). Analisis ketersediaan ruang terbuka hijau dengan metode normalized difference vegetation index dan soil adjusted vegetation index menggunakan citra satelit sentinel-2A. *Jurnal Geodesi Undip, 7*(1), 202–211.

Thieler, E. R., Himmelstoss, E., Zichichi, J., & Ergul, A. (2008). DSAS 4.0 installation instructions and user guide. *US Geological Survey Open-File Report, 1278*(3), 1-79.

Yuanita, A., Suprayogi, A., & Hania'ah. (2013). Kajian ketelitian pemanfaatan citra quickbird pada google earth untuk pemetaan bidang tanah (studi kasus Kabupaten Karanganyar). *Jurnal Geodesi Undip, 2*(2), 38–53.)

ISSN 2987-677x

Analisis Karakteristik Bioplastik dari Limbah Kulit Singkong dengan Variasi Konsentrasi *Chitosan* dan Gliserol sebagai Solusi *Zero Waste*

Andhika Mayasari[1,2] Suratno Lourentius[1,3]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2] Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Hasyim Asy'ari Tebuireng Jombang

[3] Program Studi D III Teknik Kimia Politeknik Katolik Mangunwijaya Semarang

✉ andhikamayasari@unhasy.ac.id

✉ suratno.lourentius@gmail.com

Ketergantungan industri terhadap kemasan plastik memicu krisis lingkungan, sehingga diperlukan inovasi material alternatif yang ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk merumuskan komposisi optimal bioplastik komposit dari limbah kulit singkong dengan penambahan kitosan dan gliserol sebagai solusi pengemas *zero waste*. Sintesis dilakukan menggunakan metode *solution casting* dengan variasi konsentrasi pati (2-4 g), gliserol (20-40%), dan kitosan (0,5-1 g). Pengujian karakteristik material meliputi evaluasi ketebalan, kuat tarik (*tensile strength*), kemuluran (*elongation*), *Water Vapor Transmission Rate* (WVTR), morfologi *Scanning Electron Microscopy* (SEM), serta uji biodegradabilitas. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa formulasi paling optimal dicapai pada kombinasi 4 g pati kulit singkong, 20% gliserol, dan 1 g kitosan. Penambahan kitosan terbukti efektif menutupi kelemahan hidrofobisitas gliserol dengan mengikat matriks menjadi lebih kompak, meningkatkan kuat tarik secara drastis menjadi 5,61 MPa, serta menekan laju transmisi uap air hingga 5,93 g/m²/jam. Bioplastik ini terbukti memenuhi standar kualifikasi kemasan pangan JIS Z.1707-1997 dan terdegradasi secara alami di tanah dalam waktu tiga minggu. Inovasi material komposit ini dinilai aplikatif dan terintegrasi penuh untuk mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs) nomor 9, 12, dan 13.

Kata kunci: Bioplastik, Limbah Kulit Singkong, Kitosan, *Zero Waste*

Pendahuluan

Pola kehidupan manusia modern saat ini hampir tidak terpisahkan dari keberadaan bahan-bahan pengemas. Peningkatan laju konsumsi masyarakat dan perkembangan teknologi industri turut meningkatkan laju pembuangan kemasan bekas ke lingkungan. Ketergantungan industri *Fast Moving Consumer Goods* (FMCG) terhadap kemasan plastik konvensional berbahan dasar petrokimia memunculkan masalah lingkungan yang serius karena plastik sintetik sangat sukar didegradasi secara alami. Oleh karena itu, diperlukan inovasi rekayasa material pengemas yang bersifat ramah lingkungan (dapat terurai secara hayati) dan berbasis sumber daya terbarukan.

Salah satu potensi lokal yang dapat dimanfaatkan sebagai polimer alami pembentuk bioplastik (*edible film*) adalah limbah kulit singkong. Dalam proses produksi agroindustri berbahan dasar singkong (seperti industri singkong keju), limbah kulit bagian dalam dihasilkan dalam jumlah yang melimpah, yakni berkisar antara 8-15% dari berat total singkong segar. Selama ini, limbah tersebut belum diolah secara maksimal dan hanya dimanfaatkan sebagai pakan ternak bernilai ekonomi rendah. Padahal, berdasarkan analisis proksimat, pati kulit singkong mengandung amilosa sebesar 21,78%, yang berpotensi kuat untuk membentuk struktur bioplastik (Mayasari et al., 2025).

Meskipun pati kulit singkong dapat dikonversi menjadi bioplastik, penggunaan pati murni memiliki kelemahan intrinsik, yaitu karakteristik matriks yang mudah rapuh, kaku, dan sangat sensitif terhadap uap air (hidrofilik). Untuk menutupi kelemahan tersebut, rekayasa formulasi material komposit sangat diperlukan. Penambahan gliserol sebagai agen pemlastis (*plasticizer*) dilakukan untuk menurunkan kekuatan intermolekuler polimer sehingga meningkatkan nilai elastisitas (*elongation*) plastik. Di sisi lain, karena gliserol dapat menurunkan daya tahan air, diperlukan polimer tambahan berupa kitosan. Kitosan merupakan senyawa turunan kitin yang bersifat hidrofobik dan memiliki reaktivitas rekayasa yang tinggi. Penambahan kitosan berfungsi mengikat matriks menjadi lebih kompak, menekan laju transmisi uap air (WVTR), serta meningkatkan kuat tarik (*tensile strength*) bioplastik.

Berdasarkan latar belakang tersebut, studi kasus ini berfokus pada kegiatan rekayasa material dengan melakukan "Analisis Karakteristik Bioplastik dari Limbah Kulit Singkong dengan Variasi Konsentrasi *Chitosan* dan Gliserol sebagai Solusi *Zero Waste*". Penelitian ini dikerjakan untuk merumuskan komposisi optimal antara pati kulit singkong, kitosan, dan gliserol yang mampu menghasilkan standar bioplastik dengan kualitas mekanik terbaik dan aplikatif. Solusi ini diharapkan tidak hanya menekan masalah pencemaran akibat plastik konvensional, tetapi juga mengimplementasikan pendekatan *Zero Waste* pada limbah industri lokal untuk diubah menjadi bioplastik kemasan ramah lingkungan.

 ISSN 2987-677x

Metode

Penelitian eksperimental ini menggunakan bahan baku utama berupa limbah pati kulit singkong, kitosan dengan derajat deasetilasi 89%, gliserol komersial sebagai *plasticizer*, margarin sebagai penambah sifat hidrofobik, serta pelarut aquades dan asam asetat 1%. Proses sintesis bioplastik dilakukan menggunakan metode *solution casting*.

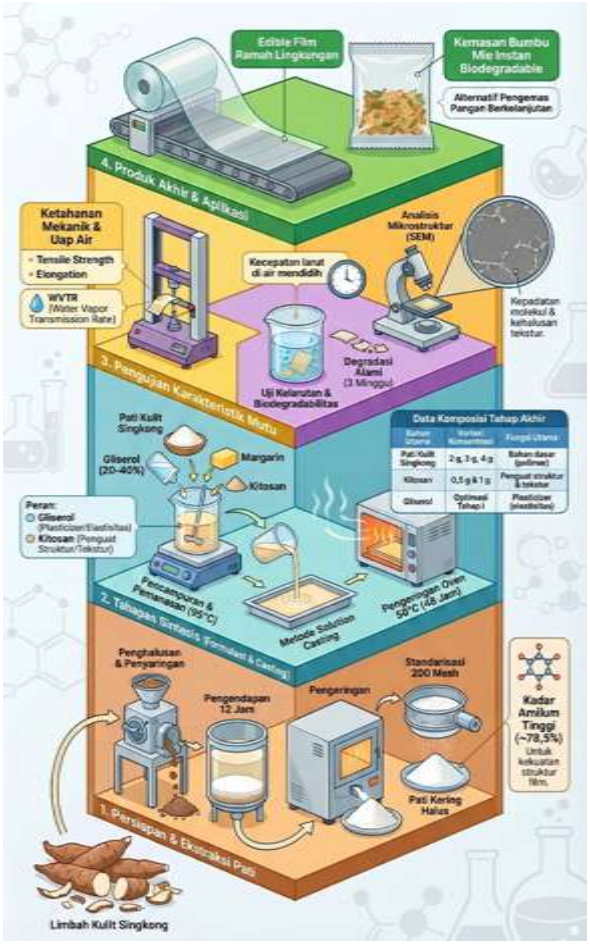
Penelitian ini diawali dengan pembuatan pati yang berasal dari limbah kulit singkong. Penelitian utama ini mengkombinasikan 2 perlakuan, yaitu :

1. Variasi konsentrasi pati dan gliserol
   Tahapan ini bertujuan untuk mendapatkan konsentrasi gliserol yang sesuai untuk mendapatkan bioplastik dengan sifat fisik terbaik.
2. Variasi konsentrasi pati dan kitosan
   Tahapan ini bertujuan untuk memperbaiki karakteristik bioplastik

Tahap pertama untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi pati kulit singkong (2 g, 3 g dan 4 g (b/v larutan)) dan konsentrasi gliserol (20%, 30% dan 40% (v/b pati)) terhadap karakteristik bioplastik terbaik. Tahap kedua untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi pati kulit singkong (2 g, 3 g dan 4 g (b/v larutan aquades)) dan variasi konsentrasi kitosan (0,5 g dan 1 g (b/v larutan asam asetat)) terhadap karakteristik bioplastik yang dihasilkan.

Pengujian karakteristik bioplastik dilakukan menggunakan standar pengujian baku. Pengukuran ketebalan diukur menggunakan *micrometer*. Pengujian sifat mekanik yang meliputi Kuat Tarik (*Tensile Strength*) dan Kemuluran (*Elongation*) dilakukan menggunakan instrumen *Universal Testing Machine* dengan mengacu pada standar baku ASTM D882 (1997). Pengujian daya tembus uap air atau *Water Vapor Transmission Rate* (WVTR) diukur melalui metode gravimetri (metode cawan) berdasarkan standar ASTM E96 (2000). Selanjutnya, karakteristik material dievaluasi menggunakan uji kelarutan dalam air panas (95°C), pengamatan biodegradabilitas visual dalam media tanah selama tiga minggu, serta analisis morfologi struktur mikro permukaan menggunakan pencitraan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) pada perbesaran spesifik. Analisis statistik dilakukan dengan menggunakan uji *One-Way* ANOVA.

Tahapan Proses dan pengujian pembuatan bioplastik terdapat dalam Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Proses Pembuatan Bioplastik dari Limbah Pati Kulit Singkong
(Sumber: Gambar dihasilkan melalui NotebookLM dari hasil penelitian penulis)

Hasil Kerja

Penelitian Tahap I

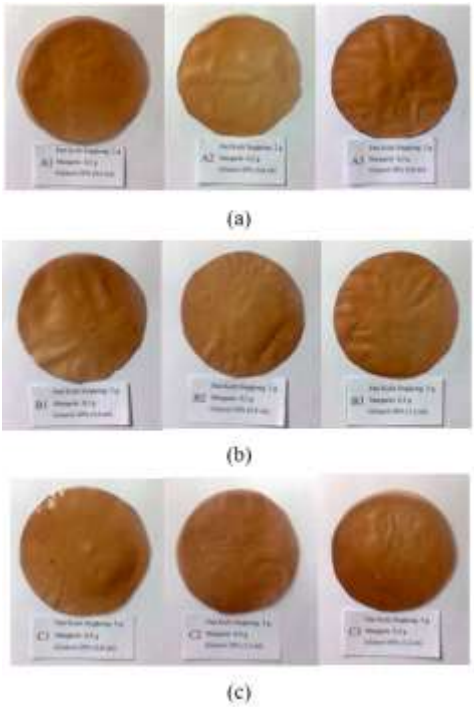
Data diperoleh melalui 2 ulangan analisa. Variasi perlakuan pada penelitian tahap I dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perlakuan Pada Penelitian Tahap I

Pati KS \ Gliserol	1 (20%)	2 (30%)	3 (40%)
A (2 g)	A1	A2	A3
B (3 g)	B1	B2	B3
C (4 g)	C1	C2	C3

Pembuatan bioplastik pada penelitian tahap I ini merupakan bioplastik yang terbuat dari variasi konsentrasi pati kulit singkong dan gliserol dengan hasil berwarna coklat pekat, mengikuti warna awal pati kulit singkong yaitu putih kecoklatan pada saat masih berupa serbuk dan pada saat dilarutkan dalam aquades serta dilakukan pemanasan terlihat larutan pati kulit singkong mulai berwarna coklat pekat pada suhu 70°C. Bioplastik hasil cetakan dapat dilihat pada Gambar 2.

 ISSN 2987-677x

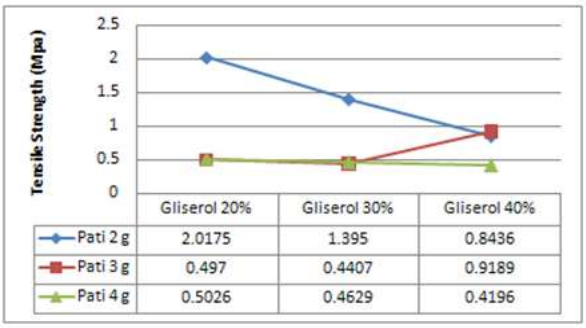


Gambar 2. Bioplastik Hasil Penelitian Tahap I
Ket.: (a) Bioplastik dengan pati kulit singkong 2 g dan konsentrasi gliserol 20%, 30% dan 40%, (b) Bioplastik dengan pati kulit singkong 3 g dan konsentrasi gliserol 20%, 30% dan 40%, (c) Bioplastik dengan pati kulit singkong 4 g dan konsentrasi gliserol 20%, 30% dan 40%

Konsentrasi padatan terlarut dan dimensi pelat pencetak merupakan faktor utama yang membentuk ketebalan fisik sebuah bioplastik. Tingkat ketebalan inilah yang selanjutnya mengendalikan besarnya laju transmisi uap air, gas, serta senyawa volatil yang mampu melewati material kemasan tersebut. Peningkatan ketebalan material yang berbanding lurus dengan penambahan konsentrasi pati kulit singkong (Mayasari et al., 2025).

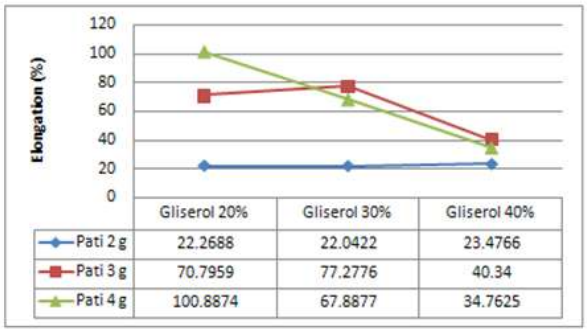
Walaupun menggunakan volume larutan dan massa pati yang sama, fluktuasi ketebalan pada spesimen masih dapat terjadi akibat tingkat homogenitas larutan yang kurang optimal saat proses penuangan ke dalam cetakan, yang berujung pada distribusi total padatan yang tidak merata. Selain itu, ketidakseragaman waktu pengeringan juga dipengaruhi oleh penempatan posisi rak (atas dan bawah) di dalam oven. Bioplastik yang diletakkan pada rak bagian bawah mengalami laju pengeringan yang lebih cepat, maka langkah mitigasi yang perlu dilakukan adalah menukar posisi cetakan secara berkala agar seluruh sampel dapat mengering secara serentak.

Pengujian *tensile strength* dan *elongation* pada bioplastik yang dihasilkan ini dilakukan dengan menggunakan Instron *Universal Testing Machine.* Evaluasi pengujian sifat mekanik ini umumnya dilakukan dengan mengacu pada standar internasional ASTM D882 (Metode Uji Standar untuk Sifat Tarik Lembaran Plastik Tipis) (Mascarenhas et al., 2024). Hasil dari pengaruh konsentrasi pati kulit singkong dan gliserol terhadap *tensile strength* terlihat pada Gambar 3 dan rerata nilai *elongation* perlakuan dan interaksi dapat dilihat pada Gambar 4.



	Gliserol 20%	Gliserol 30%	Gliserol 40%
Pati 2 g	2.0175	1.395	0.8436
Pati 3 g	0.497	0.4407	0.9189
Pati 4 g	0.5026	0.4629	0.4196

Gambar 3. Rerata Nilai *Tensile Strength* Seluruh Perlakuan Tahap I



	Gliserol 20%	Gliserol 30%	Gliserol 40%
Pati 2 g	22.2688	22.0422	23.4766
Pati 3 g	70.7959	77.2776	40.34
Pati 4 g	100.8874	67.8877	34.7625

Gambar 4. Rerata Nilai *Elongation* Seluruh Perlakuan Tahap I

Peningkatan proporsi gliserol dari 20% menjadi 40% terbukti secara signifikan menekan nilai kuat tarik dari bioplastik. Secara teoretis, fungsi utama penambahan aditif *plasticizer* bermassa molekul rendah ini adalah untuk memecah interaksi antarmolekul di dalam matriks biopolimer (Madyaratri et al., 2025). Melemahnya ikatan intermolekuler tersebut secara bersamaan akan memfasilitasi peningkatan fleksibilitas, kemampuan proses, dan mobilitas rantai polimer (Kossalbayev et al., 2025).

Pengujian berikutnya adalah *Water Vapor Transmission Rate* (WVTR). Pengujian WVTR atau laju transmisi uap air merupakan parameter esensial untuk mengevaluasi efisiensi suatu material pengemas dalam menghambat perpindahan kelembapan dari atau ke lingkungan sekitarnya (Mahardika et al., 2026). Laju transmisi uap air secara konseptual mengukur seberapa besar jumlah uap air yang berdifusi atau mengalir menembus suatu unit luasan area bioplastik dalam rentang waktu dan gradien tekanan tertentu, yang sekaligus menjadi indikator utama untuk mengevaluasi efisiensi material sebagai penghalang kelembapan (Zhang, 2025). Korelasi antara fluktuasi penambahan konsentrasi gliserol terhadap profil ketahanan air bioplastik pada berbagai proporsi pati terlihat adanya tren peningkatan WVTR yang berbanding lurus dengan penambahan konsentrasi gliserol dari 20% menjadi 40% (Mayasari et al., 2025). Fenomena ini selaras dengan mekanisme plastisisasi polimer, di mana penambahan

 ISSN 2987-677x

agen pemlastis bermassa molekul rendah seperti gliserol secara fungsional akan mendisrupsi dan melemahkan interaksi ikatan hidrogen intermolekuler pada matriks pati (Mahardika et al., 2026).

Dari hasil penelitian tahap I terlihat pada penentuan konsentrasi gliserol yang memiliki sifat fisik dan mekanis terbaik untuk bioplastik adalah pada konsentrasi 20%. Hal ini didukung oleh hasil penelitian yang menunjukkan bahwa penghambatan terhadap laju transmisi uap air paling tinggi (pada pati kulit singkong 4 g, gliserol 20%), nilai *tensile strength* paling tinggi (pada pati kulit singkong 2 g, gliserol 20%) dan nilai *elongation* paling tinggi (pada pati kulit singkong 4 g, gliserol 20%).

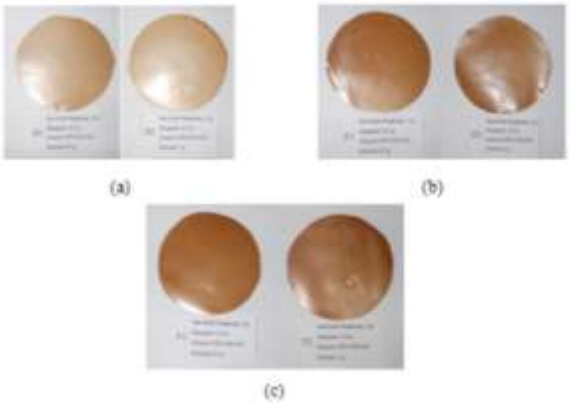
Penelitian Tahap II

Penelitian tahap II ini merupakan kelanjutan pada penelitian sebelumnya untuk memperbaiki karakteristik bioplastik yang belum sesuai. Variasi perlakuan pada penelitian tahap II dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perlakuan pada Penelitian Tahap II

Pati Kulit Singkong	Gliserol 1 (20%)	Gliserol 3 (40%)
D (2 g)	D1	D3
E (3 g)	E1	E3
F (4 g)	F1	F3

Perbandingan antara bioplastik tanpa penambahan kitosan dan dengan adanya penambahan kitosan, yaitu terdapat pada tekstur permukaan bioplastik yang lebih halus, karena kitosan memiliki karakteristik yang kuat sehingga dapat memperbaiki tekstur plastik. Gambar bioplastik dapat dilihat pada Gambar 5.

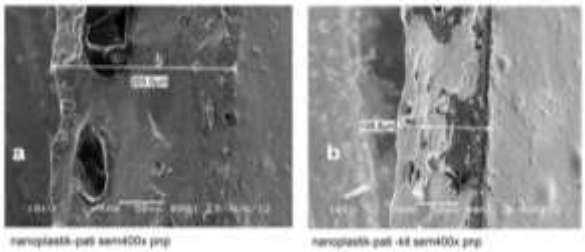


Gambar 5. Bioplastik Hasil Penelitian Tahap II
Ket.: (a) Bioplastik dengan pati kulit singkong 2 g dan konsentrasi kitosan 0,5 g dan 1 g, (b) Bioplastik dengan pati kulit singkong 3 g dan konsentrasi kitosan 0,5 g dan 1 g, (c) Bioplastik dengan pati kulit singkong 4 g dan konsentrasi kitosan 0,5 g dan 1 g

Permasalahan material yang bersifat getas pada pati kulit singkong pada dasarnya diatasi dengan penambahan *plasticizer* seperti gliserol. Namun, penambahan gliserol memunculkan efek samping yang menjadi masalah baru. Ketika konsentrasi gliserol dinaikkan hingga 40%, kekuatan kohesif antar rantai pati semakin menurun secara drastis, sehingga molekul-molekul air dari lingkungan luar jauh lebih mudah berdifusi masuk ke dalam struktur. Akibatnya, Laju Transmisi Uap Air (WVTR) meningkat tajam (mencapai 20,27 g/m²/jam) dan Kuat Tarik merosot drastis akibat sifat hidrofilik gliserol. Untuk menutupi kelemahan akibat penambahan gliserol, dilakukan komposit dengan penambahan polimer kitosan.

Analisis data Tahap II menunjukkan bahwa kitosan secara signifikan memperbaiki kuat tarik dan kemampuan penghalang (*barrier*) uap air bioplastik. Penambahan kitosan mampu meningkatkan kuat tarik secara drastis hingga mencapai 14,0456 MPa dan menurunkan WVTR menjadi 5,9313 g/m²/jam. Perbaikan kinerja ini secara teoretis terjadi karena kitosan adalah senyawa yang bersifat hidrofobik (menolak air), sehingga matriks yang terbentuk mampu menahan molekul air agar tidak terserap atau menembus ke dalam bioplastik.

Perbaikan ini terkonfirmasi dengan jelas melalui analisis morfologi mikrostruktur menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Foto SEM penampang melintang perbesaran 400 kali dari sampel penelitian dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. (a) Foto SEM Penampang Melintang dari Sampel Bioplastik Pati Kulit Singkong dan (b) Bioplastik Pati Kulit Singkong-Kitosan

Gambar 6 menunjukkan morfologi mikrostruktur dari bioplastik yang dihasilkan, dimana mikrostruktur plastik dari pati tanpa kitosan terlihat tidak rapat dan masih memiliki banyak rongga berukuran besar, serta masih terlihat adanya retakan pada permukaan bioplastik. Namun demkian, keretakan dan rongga tidak nampak ketika ditambahkan kitosan. Pada spesimen dengan penambahan kitosan, struktur matriks berubah menjadi jauh lebih padat, terikat kuat secara intermolekuler, dan menutup rongga-rongga yang sebelumnya menjadi jalur lewatnya uap air. Kitosan bertindak sebagai agen penguat struktural yang sangat baik dalam komposit biopolimer, menurunkan permeabilitas gas dan kelarutan air.

Aspek Keberlanjutan

Inovasi pengembangan bioplastik dari limbah kulit singkong ini didesain tidak hanya untuk memenuhi fungsi teknis pengemasan, tetapi juga diintegrasikan secara penuh dengan prinsip keberlanjutan melalui pendekatan tiga pilar (*Triple Bottom Line*) dan sejalan dengan *Sustainable Development Goals* (SDGs):

- SDG 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur): Transformasi limbah agroindustri lokal menjadi purwarupa kemasan komersial menciptakan

 ISSN 2987-677x

efisiensi sumber daya dan menurunkan biaya material mentah (Patil et al., 2024).

- SDG 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab): Solusi ini menawarkan alternatif pengganti plastik sintetis sekali pakai dengan material kemasan bio-komposit yang terbuat dari 100% sumber daya hayati terbarukan (Cárdenas-Zapata et al., 2025).
- SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim): Substitusi plastik berbasis petrokimia dengan bioplastik dari biomassa berkontribusi pada penurunan emisi gas rumah kaca dan jejak karbon, mengingat produksi dan pembakaran plastik konvensional merupakan salah satu penyumbang emisi karbon terbesar secara global (Paudel & Janaswamy, 2025).

Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa limbah kulit singkong memiliki potensi besar untuk dikonversi menjadi kemasan bioplastik (*edible film*) bermutu tinggi yang inovatif dan ramah lingkungan. Secara teknis, formulasi komposit optimal yang memadukan 4 gram pati kulit singkong, 20% gliserol, dan 1 gram kitosan berhasil mengatasi kelemahan bawaan pati murni yang kaku dan hidrofilik. Interaksi sinergis dari bahan-bahan organik ini menghasilkan matriks mikrostruktur yang kompak dan bebas retakan, dengan kualitas kuat tarik (*tensile strength*), kemuluran (*elongation)*, serta daya tahan terhadap uap air (WVTR) yang sangat baik sehingga layak diaplikasikan sebagai plastik pengemas.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Rekan-rekan Dosen di Fakultas Teknik Universitas Hasyim Asy'ari, khususnya Prodi Teknik Industri yang telah memberikan dukungan dalam keikutsertaan Program Studi Profesi Insinyur. Penulis juga mengucapkan banyak terimakasih kepada civitas akademika dan pembimbing di PSPI Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya yang telah membimbing dalam Program Keinsinyuran.

Referensi

Cárdenas-Zapata, R., Palma-Ramírez, D., Flores-Vela, A. I., Chanona-Pérez, J. J., Willcock, H., Romero-Ibarra, I. C., & Díaz, B. B. (2025). Sustainable route toward processing of polylactic acid/sawdust-based cellulose composites via grafting: Energy consumption during extrusion. *International Journal of Biological Macromolecules*, *327*. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.147316

Kossalbayev, B. D., Belkozhayev, A. M., Abaildayev, A., Kadirshe, D. K., Tastambek, K. T., Kurmanbek, A., & Toleutay, G. (2025). Biodegradable packaging from agricultural wastes: A comprehensive review of processing techniques, material properties, and future prospects. *Polymers*, *17(*16). https://doi.org/10.3390/polym17162224

Madyaratri, E. W., Ilyas, R. A., Fatriasari, W., Wahit, M. U., & Alzahrani, K. A. (2025). Recent developments in lignocellulosic areca catechu-based biocomposites and their potential industrial applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, *328*. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146867

Mahardika, M., Sudarjat, K. S. A., Ilyas, R. A., & Mohamad Kassim, M. H. (2026). Revolutionizing thermoplastic starch: Advances in nanocellulose reinforced biocomposites: A review. *Biomass and Bioenergy*, *204*. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108419

Mascarenhas, A. R. P., Setter, C., Scatolino, M. V., Lago, R. C. do, Batista, F. G., Medeiros, D. T. de, Santos, C. A. dos, Vale, A. R. do, Melo, R. R. de, & Tonoli, G. H. D. (2024). Valorization of coffea arabica wood waste to obtain suspensions of lignocellulose microfibrils and lignocellulose nanofibrils (LCMF/LCNF) and production of eco-friendly films for packaging. *Forests*, *15*(10). https://doi.org/10.3390/f15101834

Mayasari, A., Pranoto, Y., & Sarto. (2025). Development of edible films derived from cassava peel waste with glycerol and chitosan additives for packaging instant noodle powder seasoning. *ASEAN Journal of System Engineering*, *9*(2), 33–40. https://doi.org/https://doi.org/10.22146/ajse.v9i2.2446

Patil, H., Naik, R., & Paramasivam, S. K. (2024). Utilization of Banana Crop Ligno-Cellulosic Waste for sustainable development of biomaterials and nanocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*, *282*. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137065

Paudel, S., & Janaswamy, S. (2025). Green valorization of alfalfa into sustainable lignocellulosic films for packaging applications. *Applied Sciences (Switzerland)*, *15*(22). https://doi.org/10.3390/app152211889

Zhang, J. (2025). Barrier molded fiber products based on recovery and up-cycling of paper and agricultural wastes via a pickering emulsion approach. *BioResources.Cnr.Ncsu.Edu*, *20*, 7–10. https://doi.org/10.15376/biores.20.1.7-10

 ISSN 2987-677x

Analisis Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Produktivitas Tenaga Kerja pada Proyek Konstruks

Suponco Wisnubroto [1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi produktivitas tenaga kerja pada proyek konstruksi serta menganalisis kesenjangan penelitian yang ada. Metode yang digunakan adalah penelitian kualitatif dengan pendekatan deskriptif melalui studi literatur (*literature review*) dan *gap analysis*. Data dikumpulkan dari berbagai jurnal dan sumber relevan terkait produktivitas tenaga kerja konstruksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa produktivitas tenaga kerja dipengaruhi oleh empat faktor utama, yaitu faktor individu (pendidikan, pengalaman, keterampilan, dan motivasi), faktor manajerial (pengawasan, koordinasi, dan manajemen lapangan), faktor teknis (ketersediaan material, kondisi peralatan, dan metode kerja), serta faktor lingkungan kerja (cuaca, keselamatan dan kesehatan kerja, dan kondisi lokasi proyek). Keempat faktor tersebut saling berkaitan dalam menentukan efektivitas dan efisiensi pekerjaan. Hasil *gap analysis* menunjukkan adanya perbedaan temuan terkait faktor dominan serta keterbatasan penelitian sebelumnya. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan komprehensif melalui peningkatan kualitas sumber daya manusia, perbaikan sistem manajemen, serta penyediaan lingkungan kerja yang kondusif.

Kata kunci: produktivitas tenaga kerja, proyek konstruksi, faktor produktivitas, manajemen proyek

Pendahuluan

Sektor konstruksi merupakan salah satu bidang strategis yang berkontribusi besar terhadap pembangunan infrastruktur, pertumbuhan ekonomi, serta peningkatan kualitas pelayanan publik. Pelaksanaan proyek konstruksi melibatkan berbagai sumber daya, yaitu sumber daya manusia, material, peralatan, metode kerja, serta modal. Dari berbagai sumber daya tersebut, tenaga kerja memiliki peranan yang sangat penting karena secara langsung terlibat dalam pelaksanaan pekerjaan di lapangan. Keberhasilan suatu proyek konstruksi tidak hanya ditentukan oleh perencanaan teknis yang baik, tetapi juga dipengaruhi oleh tingkat produktivitas tenaga kerja yang terlibat dalam proses pembangunan.

Produktivitas tenaga kerja dapat diartikan sebagai kemampuan tenaga kerja dalam menghasilkan output pekerjaan secara efektif dan efisien dalam periode waktu tertentu. Tingkat produktivitas yang tinggi dapat mendukung tercapainya target proyek sesuai dengan rencana biaya, mutu, dan waktu pelaksanaan. Sebaliknya, rendahnya produktivitas tenaga kerja dapat menyebabkan berbagai permasalahan, seperti keterlambatan penyelesaian proyek, pembengkakan biaya operasional, penurunan kualitas pekerjaan, bahkan berpotensi menimbulkan konflik dalam pengelolaan proyek. Oleh karena itu, pengukuran dan analisis terhadap produktivitas tenaga kerja menjadi salah satu aspek penting dalam manajemen konstruksi.

Dalam praktiknya, produktivitas tenaga kerja pada proyek konstruksi dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik yang berasal dari individu pekerja maupun dari lingkungan kerja proyek. Faktor-faktor tersebut meliputi tingkat pendidikan, pengalaman kerja, keterampilan teknis, motivasi kerja, sistem pengawasan, keselamatan dan kesehatan kerja, kondisi cuaca, ketersediaan material, kondisi peralatan, hingga efektivitas komunikasi antar personel proyek. Kompleksitas faktor-faktor tersebut menyebabkan produktivitas tenaga kerja menjadi isu yang terus dikaji dalam bidang manajemen konstruksi.

Penelitian yang dilakukan oleh Angelica dan Puspasari menunjukkan bahwa produktivitas tenaga kerja pada proyek konstruksi dipengaruhi oleh berbagai aspek yang berkaitan dengan kondisi lapangan, kemampuan pekerja, serta sistem pengelolaan proyek (Angelica & Puspasari, 2024). Penelitian tersebut menekankan bahwa keberhasilan proyek sangat dipengaruhi oleh kemampuan manajemen dalam mengelola tenaga kerja secara efektif.

Selanjutnya, Faustine dan Waty melakukan penelitian mengenai peringkat faktor-faktor yang memengaruhi produktivitas tenaga kerja pada proyek konstruksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengalaman kerja, sistem pengawasan, koordinasi pekerjaan, serta kondisi lingkungan kerja merupakan faktor dominan yang memengaruhi tingkat produktivitas pekerja di lapangan (Faustine & Waty, 2022).

 ISSN 2987-677x

Damayanti dan Sitompul juga melakukan analisis terhadap produktivitas tenaga kerja pada proyek pembangunan jalan tol ruas Binjai–Langsa seksi Binjai–Pangkalan Brandan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor cuaca, ketersediaan material, kondisi peralatan, serta koordinasi antar tenaga kerja menjadi faktor utama yang memengaruhi produktivitas pekerja dalam pelaksanaan proyek (Damayanti & Sitompul, 2022).

Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Nurhendi dan Bastam menggunakan pendekatan *Relative Importance Index* (RII) menunjukkan bahwa faktor keterampilan tenaga kerja, efektivitas pengawasan, kondisi lingkungan kerja, dan manajemen lapangan merupakan faktor utama yang memiliki pengaruh signifikan terhadap produktivitas tenaga kerja pada proyek konstruksi (Nurhendi & Bastam, 2024).

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, dapat diketahui bahwa produktivitas tenaga kerja pada proyek konstruksi dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling berkaitan. Namun, setiap proyek memiliki karakteristik yang berbeda, baik dari segi jenis pekerjaan, lokasi proyek, sistem manajemen, maupun kondisi tenaga kerja yang digunakan. Perbedaan karakteristik tersebut menyebabkan hasil penelitian pada satu proyek belum tentu dapat diterapkan secara langsung pada proyek lainnya. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengidentifikasi faktor-faktor dominan yang memengaruhi produktivitas tenaga kerja pada proyek konstruksi sesuai dengan kondisi proyek yang diteliti.

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh gambaran mengenai faktor-faktor utama yang memengaruhi produktivitas tenaga kerja pada proyek konstruksi, sehingga hasil penelitian dapat menjadi bahan evaluasi dan dasar pengambilan keputusan bagi pihak kontraktor maupun manajemen proyek dalam meningkatkan efisiensi kerja, efektivitas pengelolaan sumber daya manusia, serta keberhasilan pelaksanaan proyek secara keseluruhan.

Metode

Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kualitatif dengan pendekatan deskriptif. Metode penelitian mengacu pada konsep penelitian kualitatif menurut Sugiyono (2023), yang bertujuan untuk memahami fenomena secara mendalam berdasarkan kajian literatur. Pendekatan yang digunakan adalah *literature review* dan *gap analysis* untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi produktivitas tenaga kerja serta kesenjangan penelitian yang ada.

Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui studi kepustakaan (*library research*) dengan cara mengidentifikasi, mengumpulkan, dan menyeleksi literatur yang relevan dengan topik penelitian.

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan dua metode, yaitu:

- *Literature Review*
  Mengkaji dan membandingkan hasil penelitian terdahulu terkait faktor-faktor yang memengaruhi produktivitas tenaga kerja.
- *Gap Analysis*
  Mengidentifikasi kesenjangan antara penelitian terdahulu dengan kebutuhan penelitian saat ini.

Penyajian Data

Data disajikan dalam bentuk uraian deskriptif, tabel ringkasan penelitian, serta matriks gap analysis untuk mempermudah interpretasi hasil penelitian.

Hasil Kerja

Hasil Kajian Literatur

Berdasarkan hasil *literature review* terhadap beberapa penelitian terdahulu, diketahui bahwa produktivitas tenaga kerja pada proyek konstruksi dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling berkaitan. Faktor-faktor tersebut dapat dikelompokkan menjadi beberapa kategori utama, yaitu faktor individu, faktor manajerial, faktor teknis, dan faktor lingkungan kerja.

Penelitian yang dilakukan oleh Angelica dan Puspasari menunjukkan bahwa produktivitas tenaga kerja sangat dipengaruhi oleh kondisi lapangan, kemampuan pekerja, serta sistem pengelolaan proyek (Angelica & Puspasari, 2024). Hal ini menegaskan bahwa produktivitas tidak hanya bergantung pada kemampuan individu, tetapi juga pada bagaimana proyek dikelola.

Selanjutnya, Faustine dan Waty mengemukakan bahwa faktor pengalaman kerja, sistem pengawasan, dan koordinasi pekerjaan merupakan faktor dominan dalam menentukan tingkat produktivitas tenaga kerja (Faustine & Waty, 2022). Koordinasi yang baik antar tenaga kerja dapat meningkatkan efisiensi pelaksanaan pekerjaan di lapangan.

Damayanti dan Sitompul dalam penelitiannya menemukan bahwa faktor eksternal seperti kondisi cuaca, ketersediaan material, serta kondisi peralatan juga memberikan pengaruh signifikan terhadap produktivitas tenaga kerja (Damayanti & Sitompul, 2022). Hal ini menunjukkan bahwa faktor di luar kendali pekerja juga memiliki kontribusi besar.

Sementara itu, Nurhendi dan Bastam melalui pendekatan *Relative Importance Index* (RII) menyimpulkan bahwa keterampilan tenaga kerja, efektivitas pengawasan, dan manajemen lapangan merupakan faktor utama yang menentukan produktivitas tenaga kerja pada proyek konstruksi (Nurhendi & Bastam, 2024).

Identifikasi Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Produktivitas Tenaga Kerja

Berdasarkan hasil sintesis dari penelitian terdahulu, faktor-faktor yang memengaruhi produktivitas tenaga

 ISSN 2987-677x

kerja pada proyek konstruksi dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kelompok utama, yaitu faktor individu, faktor manajerial, faktor teknis, dan faktor lingkungan kerja. Keempat faktor tersebut saling berkaitan dan memberikan kontribusi terhadap tingkat efektivitas dan efisiensi tenaga kerja dalam menyelesaikan pekerjaan di lapangan.

Faktor individu merupakan faktor yang berkaitan dengan karakteristik yang dimiliki oleh tenaga kerja itu sendiri. Faktor ini mencakup tingkat pendidikan, pengalaman kerja, keterampilan teknis, serta motivasi kerja. Tenaga kerja yang memiliki tingkat pendidikan dan pengalaman yang lebih baik cenderung mampu memahami pekerjaan dengan lebih cepat dan tepat. Selain itu, keterampilan teknis yang memadai serta motivasi kerja yang tinggi juga akan mendorong pekerja untuk menyelesaikan tugas secara optimal. Oleh karena itu, faktor individu memiliki pengaruh langsung terhadap kemampuan tenaga kerja dalam menghasilkan output pekerjaan secara efektif dan efisien.

Selanjutnya, faktor manajerial berkaitan dengan bagaimana tenaga kerja dikelola dalam suatu proyek konstruksi. Faktor ini meliputi sistem pengawasan, koordinasi kerja, manajemen lapangan, serta perencanaan pekerjaan. Pengawasan yang efektif dapat memastikan bahwa pekerjaan dilaksanakan sesuai dengan standar yang telah ditetapkan. Selain itu, koordinasi kerja yang baik antar tenaga kerja maupun antar bagian dalam proyek dapat mengurangi kesalahan dan meningkatkan kelancaran pekerjaan. Manajemen lapangan yang terorganisir serta perencanaan pekerjaan yang matang juga menjadi kunci dalam meningkatkan produktivitas tenaga kerja melalui pengaturan kerja yang lebih terstruktur.

Faktor teknis merupakan faktor yang berhubungan dengan aspek operasional dalam pelaksanaan pekerjaan konstruksi. Faktor ini mencakup ketersediaan material, kondisi peralatan, serta metode kerja yang digunakan. Ketersediaan material yang tepat waktu dan sesuai kebutuhan akan mendukung kelancaran pekerjaan di lapangan. Selain itu, kondisi peralatan yang baik dan siap digunakan akan meningkatkan efisiensi kerja tenaga kerja. Pemilihan metode kerja yang tepat juga dapat mempermudah pelaksanaan pekerjaan. Sebaliknya, keterbatasan dalam faktor teknis dapat menyebabkan keterlambatan pekerjaan serta menurunkan tingkat produktivitas tenaga kerja.

Terakhir, faktor lingkungan kerja mencakup kondisi eksternal yang memengaruhi pelaksanaan pekerjaan konstruksi. Faktor ini meliputi kondisi cuaca, keselamatan dan kesehatan kerja (K3), serta kondisi lokasi proyek. Cuaca yang tidak mendukung, seperti hujan atau panas ekstrem, dapat menghambat aktivitas kerja di lapangan. Selain itu, penerapan K3 yang kurang baik dapat menimbulkan risiko kecelakaan kerja yang berdampak pada menurunnya produktivitas. Kondisi lokasi proyek yang sulit dijangkau atau memiliki keterbatasan ruang juga dapat memengaruhi kinerja tenaga kerja. Oleh karena itu, lingkungan kerja yang kondusif sangat diperlukan untuk mendukung peningkatan produktivitas tenaga kerja pada proyek konstruksi.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan melalui pendekatan *literature review* dan *gap analysis*, dapat disimpulkan bahwa produktivitas tenaga kerja pada proyek konstruksi dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling berkaitan dan tidak dapat dipisahkan satu sama lain. Faktor-faktor tersebut meliputi faktor individu, faktor manajerial, faktor teknis, dan faktor lingkungan kerja yang secara bersama-sama menentukan tingkat efektivitas dan efisiensi tenaga kerja dalam pelaksanaan proyek konstruksi.

Faktor individu, seperti tingkat pendidikan, pengalaman kerja, keterampilan teknis, dan motivasi kerja, memiliki pengaruh langsung terhadap kemampuan tenaga kerja dalam menyelesaikan pekerjaan. Semakin baik kualitas individu tenaga kerja, maka semakin tinggi pula produktivitas yang dihasilkan. Namun demikian, faktor individu saja tidak cukup tanpa didukung oleh faktor manajerial yang baik.

Faktor manajerial, yang meliputi sistem pengawasan, koordinasi kerja, manajemen lapangan, dan perencanaan pekerjaan, berperan penting dalam mengoptimalkan kinerja tenaga kerja. Pengelolaan tenaga kerja yang efektif dapat meningkatkan efisiensi kerja serta meminimalkan kesalahan dalam pelaksanaan proyek. Selain itu, faktor teknis seperti ketersediaan material, kondisi peralatan, dan metode kerja juga menjadi penentu dalam kelancaran pekerjaan di lapangan. Keterbatasan pada faktor teknis dapat menghambat proses kerja dan menurunkan produktivitas tenaga kerja, meskipun tenaga kerja memiliki kemampuan yang baik.

Faktor lingkungan kerja, yang meliputi kondisi cuaca, keselamatan dan kesehatan kerja (K3), serta kondisi lokasi proyek, turut memberikan pengaruh signifikan terhadap produktivitas tenaga kerja. Lingkungan kerja yang tidak kondusif dapat menghambat aktivitas kerja serta meningkatkan risiko kecelakaan kerja.

Berdasarkan hasil *gap analysis*, diketahui bahwa masih terdapat perbedaan hasil penelitian dalam menentukan faktor dominan yang memengaruhi produktivitas tenaga kerja, serta keterbatasan dalam cakupan penelitian yang umumnya hanya berfokus pada proyek tertentu. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan yang lebih komprehensif dengan mempertimbangkan karakteristik proyek yang berbeda-beda.

Dengan demikian, peningkatan produktivitas tenaga kerja pada proyek konstruksi memerlukan pendekatan yang menyeluruh, meliputi peningkatan kualitas sumber daya manusia, perbaikan sistem manajemen,

 ISSN 2987-677x

serta penyediaan sarana dan lingkungan kerja yang mendukung.

Ucapan Terimakasih

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan artikel ini dengan baik. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, dan bimbingan dalam proses penyusunan artikel ini, khususnya kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, serta motivasi selama proses penelitian dan penulisan. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada keluarga tercinta atas doa dan dukungan yang tiada henti, serta kepada rekan-rekan yang telah membantu dan memberikan semangat dalam penyelesaian penelitian ini.

Penulis menyadari bahwa artikel ini masih memiliki keterbatasan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga artikel ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang manajemen konstruksi.

Referensi

Angelica, N. P., & Puspasari, V. H. (2024). Kajian faktor-faktor yang mempengaruhi produktivitas tenaga kerja proyek konstruksi. *Jurnal Basement, 2*(1).

Damayanti, Y. A., & Sitompul, M. (2022). Analisis faktor-faktor yang mempengaruhi produktivitas tenaga kerja pada proyek pembangunan jalan tol ruas Binjai–Langsa seksi Binjai–Pangkalan Brandan. *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (JRKMS), 4*(2).

Faustine, C., & Waty, M. (2022). Peringkat faktor-faktor yang mempengaruhi produktivitas tenaga kerja pada proyek konstruksi. *Jurnal Mitra Teknik Sipil, 5*(4).

International Labour Organization. (2019). *Safety and health in construction*. https://www.ilo.org

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. (2020). *Peraturan Menteri PUPR tentang sistem manajemen keselamatan konstruksi* (SMKK). https://pu.go.id

Nurhendi, R. N., & Bastam, M. N. (2024). Tinjauan faktor utama yang mempengaruhi produktivitas tenaga kerja pada proyek konstruksi dengan pendekatan relative importance index (RII). *Deformasi, 9*(2).

Project Management Institute. (2021*). A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide)* (7th ed.). Project Management Institute.

Sugiyono. (2023). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.

ISSN 2987-677x

Laporan Evaluasi dan Redesain Sistem Drainase Kawasan Jalan Letjen S. Parman Kelurahan Pakis Banyuwangi untuk Penanggulangan Genangan Banjir

Siswo Handoko[1], Rasional Sitepu[2], Ginanjar Eka Sasmita[3], Muhendra Ainur Rofiq[4], Zulis Erwanto[5]

[1,2] Program Studi Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya, Indonesia

[3,4,5] Program Studi D3 Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Banyuwangi, Banyuwangi, Indonesia

✉ siswo@poliwangi.ac.id
✉ rasional@ukwms.ac.id,
✉ ginanjarekasasmita@poliwangi.ac.id
✉ muhendarainurrofiq@poliwangi.ac.id
✉ zulis.erwanto@poliwangi.ac.id

Genangan dan banjir perkotaan masih menjadi permasalahan yang sering terjadi di berbagai wilayah di Indonesia, termasuk di Jalan Letjen S. Parman Kelurahan Pakis Kecamatan Banyuwangi Kabupaten Banyuwangi. Permasalahan tersebut disebabkan oleh tingginya curah hujan, kapasitas saluran drainase yang tidak memadai, sedimentasi, serta penumpukan sampah pada saluran drainase eksisting. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kapasitas saluran drainase eksisting dan merencanakan redesain saluran yang mampu mengurangi genangan air di kawasan studi. Metode Penelitian dilakukan melalui analisis hidrologi dan hidrolika menggunakan data curah hujan maksimum harian selama 10 tahun dari BMKG Banyuwangi periode 2014–2023. Analisis frekuensi curah hujan menggunakan metode Log Pearson Type III dan debit rencana dihitung menggunakan metode Rasional. Hasil Penelitian menunjukkan bahwa kapasitas saluran eksisting sebesar 0,4066 m3/det lebih kecil dibandingkan debit banjir rencana sebesar 0,5736 m3/det sehingga saluran tidak mampu menampung limpasan air hujan. Redesain saluran menghasilkan kapasitas sebesar 1,0497 m3/det sehingga mampu menampung debit rencana kala ulang 10 tahun. Hasil Penelitian ini menunjukkan bahwa evaluasi dan peningkatan dimensi saluran drainase diperlukan untuk mendukung sistem drainase perkotaan yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Kata kunci: Drainase; Hidrologi; Hidrolika; Genangan; Intensitas hujan

Pendahuluan

Banjir dan genangan air merupakan salah satu permasalahan infrastruktur perkotaan yang sering terjadi di Indonesia. Genangan air tidak hanya terjadi di kawasan dataran rendah, tetapi juga pada kawasan perkotaan yang mengalami perubahan tata guna lahan secara signifikan. Peningkatan pembangunan kawasan permukiman dan perkerasan jalan menyebabkan berkurangnya daerah resapan air sehingga limpasan permukaan meningkat. Kondisi tersebut berdampak terhadap meningkatnya debit aliran yang harus ditampung oleh sistem drainase. Sistem drainase perkotaan memiliki fungsi penting dalam mengalirkan limpasan air hujan agar tidak terjadi genangan yang dapat mengganggu aktivitas masyarakat. Menurut Suripin (2004), sistem drainase merupakan serangkaian bangunan air yang berfungsi untuk mengurangi atau membuang kelebihan air dari suatu kawasan sehingga lahan dapat berfungsi secara optimal. Namun dalam pelaksanaannya, banyak saluran drainase mengalami penurunan kapasitas akibat sedimentasi, kerusakan saluran, dan kurangnya pemeliharaan. Permasalahan tersebut terjadi pada kawasan Jalan Letjen S. Parman Kelurahan Pakis Kecamatan Banyuwangi Kabupaten Banyuwangi. Pada musim penghujan sering terjadi luapan air dari saluran drainase yang menyebabkan genangan bahkan banjir. Kondisi eksisting menunjukkan bahwa sebagian saluran tertutup sedimentasi dan sampah sehingga aliran air tidak berjalan dengan baik. Selain itu, dimensi saluran yang ada tidak lagi mampu menampung debit limpasan akibat peningkatan curah hujan dan perubahan penggunaan lahan. Beberapa Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa evaluasi kapasitas drainase melalui analisis hidrologi dan hidrolika dapat digunakan sebagai dasar penanganan genangan. Astika dan Cahyonugroho (2020) menyatakan bahwa kapasitas saluran yang tidak memadai menjadi salah satu penyebab utama banjir perkotaan. Oleh karena itu diperlukan evaluasi dan redesain saluran drainase agar sistem drainase mampu bekerja secara optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kapasitas saluran drainase eksisting di Jalan Letjen S. Parman serta merencanakan dimensi saluran baru yang mampu menampung debit banjir rencana dengan kala ulang 10 tahun. Hasil Penelitian diharapkan dapat menjadi acuan dalam perencanaan drainase perkotaan yang berkelanjutan.

Metode

Lokasi

Penelitian dilakukan di Jalan Letjen S. Parman Kelurahan Pakis Kecamatan Banyuwangi Kabupaten Banyuwangi. Kawasan Penelitian merupakan daerah perkotaan dengan dominasi permukiman dan aktivitas perdagangan yang memiliki tingkat limpasan permukaan cukup tinggi.

 ISSN 2987-677x

Pengumpulan Data

Penelitian menggunakan data curah hujan maksimum harian selama 10 tahun periode 2014–2023 yang diperoleh dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Banyuwangi. Selain itu digunakan data kondisi eksisting saluran drainase, dimensi saluran, kemiringan saluran, dan kondisi tata guna lahan di kawasan Penelitian.

Metode Analisis

Metode yang digunakan dalam Penelitian adalah akan dilakukan beberapa analisis data untuk perencanaan drainase wilayah yaitu dari segi hidrologi dan hidraulika: Dalam perhitungan debit banjir rencana pada Penelitian ini, digunakan standar perencanaan yang mengacu pada pedoman teknis yang berlaku di Indonesia, antara lain Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2406-1991 terkait tata cara perencanaan drainase perkotaan serta pedoman dari Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) Nomor 12 Tahun 2014. Perhitungan hidrologi dilakukan dengan menggunakan metode analisis frekuensi curah hujan (*Log Pearson Tipe* III) untuk memperoleh hujan rencana, yang kemudian digunakan dalam penentuan debit banjir rencana sesuai dengan karakteristik daerah tangkapan air.

Selain itu, analisis kapasitas saluran drainase mengacu pada prinsip-prinsip hidrolika saluran terbuka, termasuk penggunaan rumus Manning untuk menghitung kecepatan aliran dan debit saluran. Standar ini digunakan untuk memastikan bahwa hasil perencanaan memenuhi kriteria teknis yang berlaku serta mampu mengakomodasi debit banjir dengan periode ulang tertentu sesuai dengan klasifikasi wilayah perkotaan. Analisis hidrologi dilakukan menggunakan metode *Log Pearson Type* III untuk menentukan curah hujan rencana.

Debit banjir rencana dihitung menggunakan metode Rasional, sedangkan evaluasi kapasitas saluran dilakukan menggunakan persamaan *Manning*. Analisis hidrolika dilakukan menggunakan persamaan *Manning* untuk mengevaluasi kapasitas saluran drainase eksisting dan menentukan dimensi saluran rencana. Tahapan Penelitian meliputi identifikasi permasalahan, pengumpulan data, analisis hidrologi, analisis hidrolika, evaluasi kapasitas saluran, dan perencanaan ulang saluran drainase.

Data Modeling

Dalam mendukung analisis data, penelitian ini menggunakan beberapa perangkat lunak, antara lain Microsoft Excel untuk pengolahan data hidrologi dan perhitungan manual, serta perangkat lunak hidrolika seperti HEC-RAS (jika digunakan) untuk simulasi profil aliran dan evaluasi kapasitas saluran drainase. Penggunaan perangkat lunak ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi perhitungan serta mempermudah visualisasi hasil analisis.

Hasil Kerja

Kondisi Eksisting Saluran

Kondisi drainase di Jalan Letjen S. Parman menunjukkan bahwa sebagian besar saluran mengalami sedimentasi dan penyumbatan akibat sampah. Selain itu terdapat beberapa bagian saluran yang tertutup sehingga proses pemeliharaan sulit dilakukan. Kondisi tersebut menyebabkan aliran air hujan tidak dapat mengalir dengan baik menuju saluran pembuangan utama. Berdasarkan hasil observasi lapangan, genangan terjadi hampir setiap musim penghujan dengan kedalaman genangan yang cukup mengganggu aktivitas masyarakat. Permasalahan tersebut diperparah dengan meningkatnya limpasan permukaan akibat berkurangnya daerah resapan air.

Analisis Curah Hujan Rencana

Analisis curah hujan dilakukan menggunakan metode *Log Pearson Type* III berdasarkan data curah hujan maksimum harian selama 10 tahun. Hasil analisis menunjukkan bahwa curah hujan rancangan kala ulang 10 tahun menghasilkan debit rencana yang cukup besar sehingga kapasitas saluran eksisting perlu dievaluasi. Metode *Log Pearson Type* III dipilih karena memberikan hasil distribusi yang paling sesuai terhadap karakteristik data curah hujan di wilayah Penelitian. Berdasarkan hasil perhitungan, debit banjir rencana untuk kala ulang 10 tahun sebesar 0,5736 m3/det.

Evaluasi Kapasitas Saluran Eksisting

Hasil analisis hidrolika menunjukkan bahwa kapasitas saluran drainase eksisting hanya sebesar 0,4066 m3/det. Nilai tersebut lebih kecil dibandingkan debit banjir rencana sebesar 0,5736 m3/det. Dengan demikian saluran drainase eksisting tidak mampu menampung limpasan air hujan yang terjadi sehingga menyebabkan genangan dan banjir di kawasan studi. Faktor utama penyebab rendahnya kapasitas saluran adalah dimensi saluran yang tidak memadai, sedimentasi, serta kurangnya pemeliharaan rutin. Selain itu, perubahan tata guna lahan menyebabkan peningkatan koefisien limpasan sehingga debit limpasan permukaan semakin besar.

***Redesign* Saluran Drainase**

Untuk mengatasi permasalahan genangan dilakukan perencanaan ulang dimensi saluran drainase. Redesain dilakukan dengan mempertimbangkan debit banjir rencana kala ulang 10 tahun dan kondisi topografi kawasan. Hasil perencanaan ulang menunjukkan bahwa kapasitas saluran meningkat menjadi 1,0497 m3/det. Nilai tersebut lebih besar dibandingkan debit banjir rencana sebesar 0,5736 m3/det sehingga saluran yang direncanakan mampu menampung debit limpasan secara optimal. Selain peningkatan dimensi saluran, diperlukan pula penerapan konsep drainase berkelanjutan seperti penyediaan sumur resapan dan pemeliharaan saluran secara berkala untuk mengurangi sedimentasi dan penyumbatan sampah.

 ISSN 2987-677x

Kajian Etika, Lingkungan, K3 dan Profesionalisme

Perencanaan drainase pada Jalan Letjen S. Parman tidak hanya mempertimbangkan aspek teknis, tetapi juga memperhatikan etika profesi, keselamatan kerja, lingkungan, dan prinsip pembangunan berkelanjutan. Dari sisi etika dan profesionalisme, perencanaan dilakukan berdasarkan data hidrologi dan kondisi lapangan secara objektif sehingga solusi yang dihasilkan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah dan teknis. Profesionalisme juga ditunjukkan melalui pemilihan alternatif penanganan banjir yang efektif, efisien, dan ramah lingkungan.

Dalam aspek Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3), kegiatan survei, normalisasi, dan pemeliharaan saluran harus dilaksanakan dengan memperhatikan keselamatan pekerja, terutama pada lokasi yang berada di kawasan lalu lintas padat. Penggunaan alat pelindung diri (APD), pemasangan rambu peringatan, dan pengaturan area kerja menjadi bagian penting untuk mengurangi risiko kecelakaan kerja.

Dari aspek lingkungan, penerapan konsep *eco-drainage* dilakukan melalui peningkatan daerah resapan, pengendalian limpasan permukaan, serta pemeliharaan saluran secara berkala untuk mengurangi sedimentasi dan pencemaran akibat sampah. Pendekatan ini mendukung terciptanya sistem drainase yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Pembangunan berkelanjutan diwujudkan melalui perencanaan saluran yang tidak hanya mampu mengatasi genangan saat ini, tetapi juga adaptif terhadap perkembangan kawasan dan perubahan iklim di masa mendatang. Dengan demikian, sistem drainase yang direncanakan dapat memberikan manfaat jangka panjang bagi masyarakat dan lingkungan sekitar.

Kesimpulan

Hasil Penelitian menunjukkan bahwa kapasitas saluran drainase eksisting di Jalan Letjen S. Parman Kelurahan Pakis Kecamatan Banyuwangi Kabupaten Banyuwangi sebesar 0,4066 m3/det tidak mampu menampung debit banjir rencana kala ulang 10 tahun sebesar 0,5736 m3/det. Kondisi tersebut menyebabkan terjadinya genangan dan banjir pada musim penghujan. Perencanaan ulang dimensi saluran menghasilkan kapasitas debit sebesar 1,0497 m3/det sehingga mampu menampung debit banjir rencana dengan baik. Redesain saluran drainase serta penerapan konsep drainase berkelanjutan dapat menjadi solusi dalam mengurangi genangan air di kawasan perkotaan.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Profesi Insinyur Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya, Politeknik Negeri Banyuwangi, serta BMKG Banyuwangi atas dukungan dalam pelaksanaan Penelitian ini.

Referensi

Aidilia Tri Ananda Nasution. (2022). *Evaluasi sistem drainase untuk menanggulangi banjir (Penelitian Jl. Dr. Mansyur depan Fakultas Kedokteran)*.

Anonim. (1997). *Drainase perkotaan*. Universitas Gunadharma.

Astika, M. N., & Cahyonugroho, O. H. (2020). Evaluasi sistem drainase di wilayah Kecamatan Waru, Kabupaten Sidoarjo dengan software HEC-RAS. *EnviroUS, 1*(1), 55–64.

Cristyanti. (2023). *Analisis kapasitas tampung saluran drainase eksisting sebagai solusi pengendalian banjir perkotaan menggunakan software HEC-RAS (Penelitian: Jalan Pulau Sebesi, Kec. Sukarame, Kota Bandar Lampung)*.

Daeng Maro, A. F. L. (2023). *Pemodelan genangan banjir untuk mitigasi bencana di Sungai Buntung, Kecamatan Waru, Kabupaten Sidoarjo*.

Hendarsin, S. L. (2000). *Perencanaan teknik jalan raya*. Politeknik Negeri Bandung.

Pratiwi, & Santosa. (2021). *Pemodelan dan visualisasi genangan banjir untuk mitigasi bencana di Kali Kasin, Kelurahan Bareng, Kota Malang*.

Silvia, S. (2017). *Drainase perkotaan dan permasalahannya*. Gramedia.

Suripin. (2004). *Sistem drainase perkotaan yang berkelanjutan*. Andi Offset.

Triadmodjo, B. (1993a). *Hidraulika I*. Beta Offset.

Triadmodjo, B. (1993b). *Hidraulika II*. Beta Offset.

Triadmodjo, B. (2008). *Hidrologi terapan*. Beta Offset.

 ISSN 2987-677x

Studi Kasus Perancangan *Drone Solar Cell* untuk Pengintaian dalam Mendukung Operasi Keamanan Laut

Endin Tri Hartanto[1] Adriana Anteng A.[2]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ endinth1980@gmail.com

Pengembangan alutsista dan teknologi militer di TNI-AL dilaksanakan dalam rangka mendukung penguatan Industri Strategis Pertahanan Nasional (Instranas). Beberapa langkah telah dilakukan dalam pengembangan alutsista dan teknologi militer di TNI-AL, yaitu dengan melaksanakan penelitian-penelitian dan pengembangan alutsista. Salah satunya adalah melakukan peneltian mengenai wahana udara tanpa awak atau *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*. Penggunaan dan pengembangan pesawat tanpa awak pada awalnya dilakukan oleh pihak militer untuk melaksanakan kegiatan operasi militer dan intelejen. Untuk melaksanakan fungsi pengintaian mendukung operasi pengamanan laut, membutuhkan *endurance* yang lama, maka dirancang sebuah *Drone Solar Cell* dengan memanfaatkan energi matahari (*solar*). Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian yang telah dilaksanakan, *Drone* mampu terbang selama mendapatkan pasokan energi surya, yaitu sepanjang siang hari dengan beban utama pada sistem propulsi. Diperoleh nilai *thrust* daya 1266,8 watt atau setara dengan *thrust* 3,998 kg yang mampu menerbangkan drone dengan bobot 6,7 kg. Sistem kontrol yang dikembangkan menggunakan *flight controller Pixhawk 4* dan *remote control*, sistem komunikasi data menggunakan *Telemetry* NRF24L01 2.4 GHz. Hasil perancangan dan pengujian ini dapat menjadi *pioneer* dalam mengembangkan *Drone Solar Cell* untuk kemandirian alutsista TNI AL kedepan.

Kata kunci: *UAV, Drone Solar Cell,* Pengintaian

Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara kepulauan terbesar di dunia. Dengan kondisi seperti ini, sangat dibutuhkan pasukan yang mampu sebagai penegak hukum dan dapat menjaga keamanan seluruh wilayah laut tersebut, yaitu TNI Angkatan Laut. TNI Angkatan Laut sendiri telah banyak memodernisasi peralatan alutsista dengan menyesuaikan dengan teknologi yang berkembang. Oleh sebab itu, diperlukan adanya pengamanan terhadap objek vital khususnya di dalam wilayah perbatasan NKRI.

Pengembangan Alutsista dan teknologi militer di TNI-AL giat dilaksanakan dalam rangka memperkuat dan meningkatkan profesionalisme. Hal ini berguna untuk mendukung tugas utama TNI-AL dalam menjaga dan mempertahankan kedaulatan Negara Kesatuan Republik Indonesia (NKRI). Beberapa langkah telah dilakukan dalam pengembangan Alutsista dan teknologi militer di kubu TNI-AL dalam bentuk penelitian-penelitian dan pengembangan alusista, salah satunya adalah melakukan peneltian mengenai drone atau wahana tanpa awak atau disebut juga UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Penelitian yang dilakukan untuk mendukung pengawasan wilayah udara dalam kaitannya dengan konsep survei area dengan sistem penerbangan mandiri.

Pengawasan wilayah perbatasan NKRI yang banyak memiliki area perbatasan perairan merupakan salah satu permasalahan dan kendala bagi TNI-AL dalam menjalankan tugas pokoknya. Pentingnya alusista pendukung dalam menjalankan tugas penting tersebut sangat dibutuhkan personil TNI-AL saat ini. Pengawasan wilayah udara NKRI merupakan tugas pengawasan yang sangat penting. Pesawat tanpa awak atau UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) pada awalnya dilakukan oleh pihak militer untuk melaksanakan kegiatan operasi militer dan intelejen. Kegiatan pengawasan wilayah berbahaya, wilayah yang sulit dijangkau dan kegiatan pemetaan merupakan tugas pesawat tanpa awak atau UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). UAV *solar cell* bertenaga surya yang mampu terbang secara terus menerus masih menjadi impian beberapa tahun lalu, tantangan besar ini menjadi memungkinkan saat ini.

Kemajuan secara signifikan diwujudkan dalam teknologi sel surya yang fleksibel dan berdaya tinggi. Konsep UAV *solar cell* dilengkapi dengan sel surya yang menutupi sebagian besar sayap UAV, sel surya akan mengambil energi dari matahari untuk memasok daya ke sistem propulsi, kontrol elektronik, dan pengisian daya baterai. Namun, upaya disiplin ilmu yang tepat diperlukan untuk mengoptimalkan dan mengintegrasikan konsep agar sistem yang berfungsi penuh. Sebagai pokok permasalahan utama adalah kombinasi ukuran dan bobot sel surya dengan ukuran UAV. Untuk mendapatkan energi yang cukup untuk sistem propulsi dan kontrol elektronik diperlukan ukuran sel surya yang besar dan berat.

Dalam mewujudkan *drone solar cell* yang mampu terbang secara *glider* dan di dukung sumber daya menggunakan sel surya, penulis mencoba mengangkat tema rancang bangun UAV dengan sebuah tema penelitian yang berjudul Rancang Bangun *Drone Solar Cell* untuk Pengintaian dalam mendukung Operasi Keamanan Laut, dikarenakan drone *solar cell* sangat membutuhkan sebuah sistem kontrol dan *survellance* yang berbeda dengan drone pada umumnya.

 ISSN 2987-677x

Metode

Desain Penelitian

Penelitian yang akan dilaksanakan penulis merupakan penelitian terapan. Pesawat *fixed wing* adalah benda keras dan kaku yang bergerak bebas di udara, agar pesawat *fixed wing* mampu menyelesaikan misi dengan baik, maka dibutuhkan perancangan sistem kontrol untuk pesawat *fixed wing*. Sistem kontrol berfungsi sebagai kontroler yang akan mengurangi berbagai kesalahan akibat adanya gangguan. *Drone solar cell* ini dibuat dengan tujuan untuk membantu TNI AL dalam memantau (*observer*) dalam kaitannya dengan pengintaian dan *tracking object*.

Prosedur Penelitian

Untuk melaksanakan penelitian dengan baik, maka persiapan langkah-langkah untuk menemukan sumber data serta melakukan penelitian perangkat rancang bangun *Drone Solar Cell* untuk pengintaian yang mencakup instrumen penelitian, data primer, data sekunder, serta pengujian keabsahan dan keterandalan data.

Waktu dan Tempat Penelitian

Lokasi penelitian merupakan suatu tempat atau wilayah dimana penelitian tersebut akan dilakukan. Adapun penelitian yang dilakukan oleh penulis mengambil lokasi di Kampus Seskoal Jakarta dan STTAL Moro Krembangan Surabaya.

Alat dan Bahan Penelitian

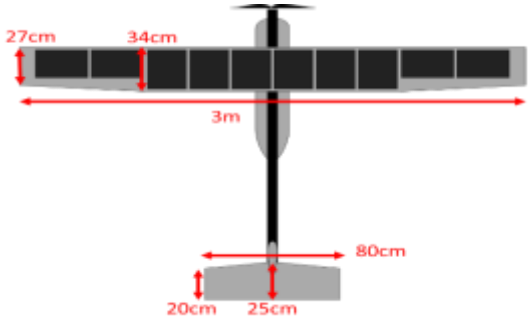
Alat dan bahan yang diperlukan untuk mendukung proses penelitian ini dan penerapan sistem.

a. Alat Penelitian
   Alat yang di pergunakan pada penelitian terdiri dari perangkat keras dan juga perangkat lunak sebagai berikut:
   1) Unit proses utama Pixhawk 4.2.6, ESC T-Motor 80A, *motor brushless* T-Motor 3520 850kv, Pixhawk 4, motor servo Emax 17g Metal Gear Servo, *power module* dan *power sensor* dan *battery lipo* Tattu 4S 16.000mAh.
   2) Perangkat Lunak & *Mission Planner*.
b. Bahan Penelitian
   1) Kebutuhan minimal sistem untuk menjalankan program *Mission Planner*.
   2) QGroundControl yang digunakan versi v4.1.3.
   3) Merupakan program sumber terbuka yang dapat di unduh secara gratis.

Hasil Kerja

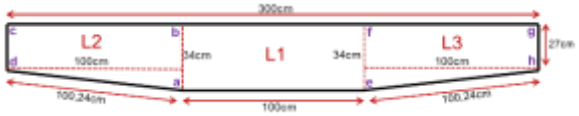
Dimensi dan Ukuran pada *Drone Solar Cell*

Badan UAV terdiri dari satu lambung utama yang tepat pada titik tengah atau disebut *fuselage* dengan panjang 56 cm dan lebar 15 cm dengan ujungnya meruncing atau mengerucut. Lambung ini meningkatkan kemampuan UAV melakukan manuver. Dan konstruksi lambung memungkinkan UAV untuk bermanuver dengan keseimbangan yang baik. Badan pesawat UAV dibuat dari material *composite foam core* (foam dengan lapisan komposit) yang dirancang mirip dengan model pesawat UAV *skywalker.* Gambar 1 dengan *wingspan* 317 cm dan panjang fuselage dari depan hingga sampai ke *stabilizer* mencapai 170 cm dan dengan menggunakan 1 motor di bagian depan *wing*.



Gambar 1. Badan Pesawat *Drone Solar Cell*

Area *planform*, yang termasuk bagian bawah badan pesawat, merupakan indikasi area di mana daya angkat dihasilkan. Jika area *planform* yang lebih besar, maka hal tersebut merupakan area yang memiliki daya angkat lebih besar dihasilkan. Ketika sebuah pesawat terbang melaju, gaya angkat yang dihasilkannya harus sama dengan beratnya. Jika lebih rendah, pesawat akan jatuh dari langit. Jika lebih tinggi, pesawat akan naik. Ini berarti bahwa jika memiliki lebih banyak daya angkat, bobot akan semakin berat. Dengan asumsi tekanan karena berat *solar cell* sebesar 6,7 Kg.



Gambar 2. Wing Area

Pada sub bab ini penulis akan menjabarkan perhitungan mengenai *center of gravity* (CG), *neutral point* (NP) dan *mean aerodynamic chord* (MAC) pesawat UAV yang telah dibuat dan di ilustrasikan pada Gambar 2. Berdasarkan ukuran badan *drone solar cell*, dapat dihitung luas area sayap utama dengan formula perhitungan sebagai berikut:

Dalam satuan cm maka luas area sayap dapat dituliskan
Wing Area = L1 + L2 + L3
L1 = bf x ab
= 100cm x 34cm
= 3400cm^2
L2 = ½ x (ab+cd) x bc
= ½ x (34+27) x 100
= ½ x 61 x 100
= ½ x 6100
= 3050cm^2
L3 = ½ x (ef+gh) x fg
= ½ x (34+27) x 100
= ½ x 61 x 100
= ½ x 6100
= 3050cm^2
Wing Area = L1 + L2 + L3
= 3400cm^2 + 3050cm^2 + 3050cm^2
= 9500cm^2 = 0,95m^2

Dari data diatas didapatkan total *weight drone solar cell* adalah 6,7 kg. Dimana berat tersebut sudah termasuk semua komponen-komponen yang dibutuhkan untuk mengontrol pesawat, sistem pengambilan gambar, serta komponen *power management system*. Berdasarkan berat tersebut akan dihitung kebutuhan gaya dorong minimal untuk *drone solar cell* dalam keadaan terbang jelajah (*cruise*). Dengan

 ISSN 2987-677x

spesifikasi pesawat yang dirancang, didapatkan luas sayap (*planform*) sebesar 9500cm^2 atau sama dengan 0,95m^2. Kebutuhan gaya dorong *(thrust)* minimal agar pesawat dapat terbang secara efisien dengan memperhatikan dua hal, yang pertama antara berat pesawat dibandingkan luas sayap *(planform)* yaitu semakin kecil *planform* maka akan semakin efisien terbangnya karena beban yang dibawa oleh sayap lebih ringan. Kedua, antara rasio gaya dorong dengan berat pesawat *(thrust to weight ratio)* untuk jenis pesawat *glider* besarnya adalah 0,5 : 1. Artinya untuk berat pesawat 6,7 kg hanya perlu gaya dorong *(thrust)* sebesar 3,35 kg untuk *take off*.

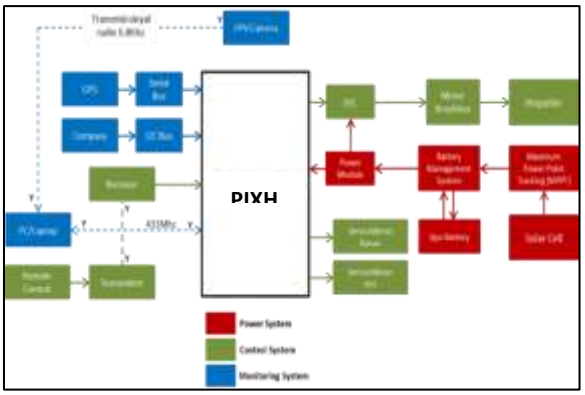
Pada perhitungan nilai CG (c*enter of gravity*) penulis menentukan nilai CG adalah 35% dari nilai MAC. Nilai MAC diproleh dari nilai *root chord* yaitu 34cm. Sehingga nilai CG dapat dihitung dengan formula sebagai berikut :

$$CG = 35\% \; x \; MAC$$
$$CG = 35\% \; x \; 34\text{cm}$$
$$CG = 12cm$$

Nilai CG merupakan titik tengah keseimbangan pesawat UAV, dengan hasil perhitungan diperoleh nilai CG yaitu 12cm.

Diagram Blok Sistem

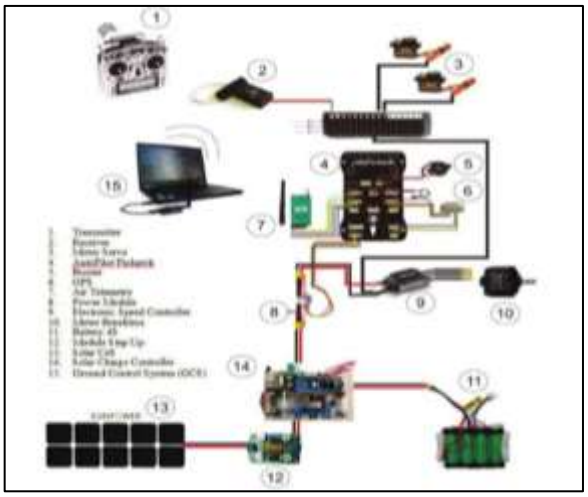
Sistem kontrol dengan loop tertutup digunakan penulis untuk memberikan respon keluaran agar UAV dapat terbang dengan stabil. Nilai *error* atau kesalahan orientasi UAV diperoleh dengan menghitung selisih dari *set point* dengan nilai pembacaan IMU. Respon keluaran akan menghasil variabel PPM untuk mengendalikan motor servo.



Gambar 3. Diagram Blok Drone Solar Cell

Dari Gambar 3 dijelaskan alur sistem kendali terbang UAV, perintah gerak diperoleh dari telemetri sementara data orientasi UAV diperoleh dari sensor IMU. Perbedaan nilai perintah dengan orientasi UAV mengakibat sistem merespon dengan menghasilkan deretan pula PPM untuk mengendalikan gerak servo bagi *aileron*, *elevator* dan *rudder*. Nilai kecepatan respon merupakan fungsi waktu dan nilai kekuatan untuk merespon kesalahan merupakan *proportional*. Kombinasi parameter fungsi waktu yang di definisikan sebagai I (Integral) dan komposisi proporsional dapat tepat dapat diperoleh keseimbangan terbang UAV yang baik.

Dari sistem *flight control* diatas dibutuhkan *remote control* yang direncanakan menggunakan radiomaster TX16S. Gambar 4 untuk mempermudah perancangan perangkat lunak pengontrolan *drone* terlebih dahulu dibuat perancangan komponen sistem *auto* untuk menjabarkan alur kerja sistem kontrol. Gambar tersebut juga menunjukkan sistem alur pesawat saat menerima perintah dari *remote control*, dibaca pengontrol dan diteruskan ke aktuator.



Gambar 4. Perancangan Komponen

Pengujian Perangkat Keras

Langkah pengujian merupakan langkah lanjutan setelah implementasi dilakukan. Pengujian ilakukan perbagian yang terdiri dari pengujian perangkat *remote control*, perangkat *flight controller*, perangkat mekanik seperti motor *servo* maupun motor *brushless* serta pengujian kestabilan terbang. Pengujian dilakukan untuk memastikan semua perangkat telah bekerja dengan baik. Pada langkah pengujian ini, penulis melakukan pengujian perangkat elektronik dan perangkat mekanik *dronesolar cell*. Pengujian perangkat elektronik maupun perangkat mekanik dengan menghubungkan perangkat ke *Flight Controller Pixhawk 4*. Pengujian perangkat mekanik seperti *motor brushless* melalui perangkat ESC. Sementara untuk pengujian motor *ser vo* dapat dihubungkan secara langsung ke *Flight Controller Pixhawk 4* karena motor servo membutuhkan sumber daya 5 v dan pulsa PPM.

Tabel 1. Tabel Hasil Pengujian Thrust Motor

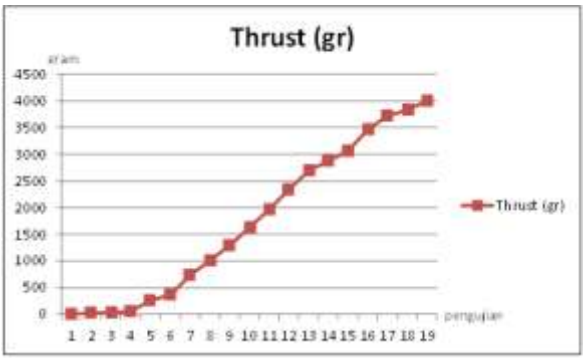
No	Arus (I)	Teg. (V)	Power (W)	Thrust (gr)	RPM
1	0	16,7	0	0	0
2	0,35	16,7	5,845	23	1597
3	0,38	16,7	6,346	34	2062
4	0,51	16,7	8,517	54	2412
5	0,88	16,58	14,5904	261	2879
6	2,83	16,57	46,8931	364	3276
7	5,29	16,47	87,1263	730	3687
8	8,38	16,3	136,594	1008	4063
9	11,93	16,13	192,4309	1291	4578
10	17,02	15,88	270,2776	1627	4937
11	23,9	15,53	371,167	1960	5432
12	31,59	15,17	479,2203	2335	5928

 ISSN 2987-677x

13	40,67	14,72	598,6624	2689	6323
14	50,21	14,34	720,0114	2873	6746
15	58,4	13,97	815,848	3062	7071
16	67,69	13,82	935,4758	3462	7435
17	73,71	13,8	1017,198	3719	7743
18	88,52	13,79	1220,691	3826	8017
19	92,4	13,71	1266,804	3998	8318

Pengujian ESC dan *Motor Brushless*

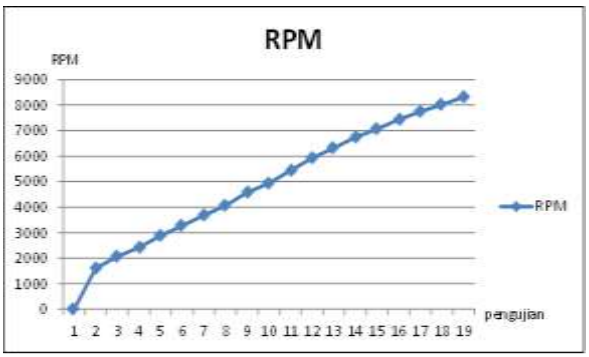
Pada pengujian ini, dengan membuat sebuah program yang bertujuan untuk mengendalikan kecepatan motor *brushless*. Besar perintah pengaturan kecepatan putar motor *brushless* didinotasikan dalam bentuk nilai durasi pulsa. Durasi pulsa dinyatakan dalam besaran waktu *micro second*.



Gambar 5. Grafik Daya Dorong (*Thrust*) Motor



Gambar 6. Grafik Daya Motor (Watt)



Gambar 7. Grafik RPM Motor

Pengujian Perangkat *Flight Controller*

Pada pembahasan berikutnya dijelaskan proses pengujian *Flight Controller Pixhawk 4*. Pada pengujian ini penulis ingin mebuktikan bahwa *flight controller* dapat bekerja dengan baik, sebelum dilakukan integrasi keseluruhan perangkat *drone solar cell*. Untuk melakukan pengujian penulis menghubung kan *Flight Controller* dengan tablet PC/Laptop/PC melalui saluran USB. Agar *Flight Controller* dapat bekerja, maka penulis perlu melakukan *flash firmware Flight Controller,* setelah proses *flash firmware* selesai, penulis melakukan pengujian koneksi Mission Planner dengan pixhawk 4.

Pada pengujian ini penulis melakukan pengujian terbang *drone solar cell*, pada area persawahan yang dilakukan di daerah Kabupaten Bekasi. Lokasi ini dipilih karena area yang terbentang luas lebih dari 10 Ha. Pengujian dilakukan dengan persyaratan bahwa area cukup jauh dari area perumahan atau perkampungan karena sinyal wifi daerah berpenduduk dapat menggangu sinyal kendali terbang. Pada pengujian ini *drone solar cell take off* dengan cara dilempar yang ditunjukkan pada Gambar 8. Hasil pengujian terbang drone *solar cell* setelah *take off.* Setelah *take off* dan terbang sehingga memperoleh terbang stabil.



Gambar 8. Pengujian Uji Coba Terbang Drone

Kesimpulan

Berdasarkan pengujian pada penelitian *Drone Solar Cell* untuk pengintaian yang telah dilakukan penulis dapat dijabarkan kesimpulan dan saran sebagai berikut:

a. Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan penulis dalam merancang badan (*body*) *drone solar cell*. Diperoleh ukuran bentang sayap 3,17 meter dengan berat total sebesar 6,7 kg. Berdasarkan hasil pengujian sistem propulsi *drone solar cell*, diperoleh nilai *thrust* yang mampu mendorong *drone solar cell* untuk terbang. Hal ini dibuktikan dengan daya 1266,8 watt atau setara dengan *thrust* 3,998 kg mampu menerbangkan *drone* dengan bobot 6,7 kg.
b. Berdasarkan hasil pengujian *drone solar cell*, dapat disimpulkan bahwa sistem komunikasi data untuk kendali terbang *drone* dapat berjalan dengan baik. Hal ini dibuktikan dengan kendali terbang dari *remote control* dapat diterima *drone solar cell*, sehingga *drone solar cell* dapat terbang sesuai dengan perintah dari *remote control.* Dari data pengujian komunikasi data dari remote kontrol dengan *receiver* dapat dicapai jarak

 ISSN 2987-677x

terjauh 1 km. Penulis mengasumsikan jarak terjauh dengan sinyal dapat diterima dengan baik yang ditunjukkan indikator sinyal penuh pada *remote control.*

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih ditujukan kepada Kaprodi Profesi Insinyur Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Mandala Surbaya Dr. Ir. Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng. dan Dosen Pembimbing Dra. Ir. Adriana Anteng Anggorowati, M.Si., IPU., ASEAN Eng. serta sivitas akademika Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut (STTAL) yang telah membantu dalam penyelesaian studi kasus ini.

Referensi

Aeroengineering. (2016). *Control surface pada pesawat terbang*. http://aeroengineering.co.id/2016/01/control-surface-pada-pesawat-terbang/

Asworo, T. S. (2020). *Rancang bangun platform dan sistem kontrol pada solar cell UAV (Unmanned Aerial Vehicle)*. Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut.

FavPNG. (n.d.). *Airplane ArduPilot wiring diagram Raspberry Pi PX4 autopilot*. https://favpng.com/png_view/airplane-airplane-ardupilot-wiring-diagram-raspberry-pi-px4-autopilot-png/spHp2C5p

HowToMechatronics. (2019). *How does an ESC work? Electronic speed controller*. https://howtomechatronics.com/wp-content/uploads/2019/02/How-does-an-ESC-Work-Electronic-Speed-Controller.png

Muliady, M., & Subagya, E. J. (2019). *Sistem pemetaan udara menggunakan pesawat fixed wing*. https://journal.untar.ac.id/index.php/tesla/article/view/3244/1880

Saroinsong, H. S., & C. V. (2018). *Rancang bangun wahana pesawat tanpa awak (fixed wing)*. Universitas Sam Ratulangi. https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/elekdankom/article/download/19195/18753

Setiawan, A., Sudrajat, R., Rinaldi, R., & Haryanto, D. (2017). *Perancangan sistem kontrol pesawat model tanpa awak (Unmanned Aerial Vehicle) berbasis Arduino*. https://ejournal.poltekbangsby.ac.id/index.php/SNITP/article/download/3/2

Walmart. (n.d.). *GPS with IST8310 compass module for PX4 Pixracer Pixhawk for RC drone models M8N*. https://www.walmart.com/ip/GPS-with-IST8310-Compass-Module-for-PX4-Pixracer-Pixhawk-for-RC-Drone-Models-M8N/155049197

Zhang, W. W., & L. G. (2019). *Structural design and difficulties of solar UAV*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 608*(1), 012016. https://doi.org/10.1088/1757-899X/608/1/012016

 ISSN 2987-677x

Dinamika Konflik antara Masyarakat dan Perusahaan Tambang: Studi Kasus Penolakan Tambang di Kecamatan Sampaga, Kabupaten Mamuju

Yusran[1] Alfian Jansit[1] Andrew Joewono[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ andrew_sby@ukwms.ac.id

Indonesia sebagai negara yang kaya sumber daya alam menghadapi berbagai konflik dalam pengelolaan pertambangan, khususnya yang melibatkan masyarakat lokal dan perusahaan. Salah satu konflik tersebut terjadi antara masyarakat Kecamatan Sampaga, Kabupaten Mamuju, dengan perusahaan tambang CV Surya Stone terkait aktivitas pertambangan pasir pesisir. Konflik ini dipicu oleh kekhawatiran masyarakat terhadap kerusakan lingkungan, ancaman hilangnya mata pencaharian, minimnya partisipasi dalam proses perizinan, serta ketimpangan distribusi manfaat ekonomi. Studi kasus ini bertujuan untuk menganalisis dinamika konflik antara masyarakat dan CV Surya Stone, mengidentifikasi faktor penyebab konflik, mengkaji dampak sosial, ekonomi, dan lingkungan, serta merumuskan alternatif dan rekomendasi penyelesaian konflik yang adil dan berkelanjutan. Metode yang digunakan adalah pendekatan kualitatif dengan teknik pengumpulan data melalui observasi lapangan, wawancara semi-terstruktur dengan masyarakat, tokoh lokal, dan pemerintah, serta studi dokumen terhadap regulasi dan dokumen perizinan. Hasil studi menunjukkan bahwa konflik berakar pada lemahnya transparansi perizinan, rendahnya pelibatan masyarakat, potensi kerusakan lingkungan pesisir, serta belum optimalnya pelaksanaan tanggung jawab sosial perusahaan. Dampak konflik terlihat pada meningkatnya ketegangan sosial, terganggunya aktivitas ekonomi masyarakat, dan meningkatnya kekhawatiran terhadap keberlanjutan lingkungan. Penyelesaian konflik memerlukan evaluasi perizinan, audit lingkungan independen, dialog multipihak, penguatan CSR, serta penataan zonasi wilayah tambang berbasis pembangunan berkelanjutan. Kesimpulan utama menunjukkan bahwa konflik pertambangan di Kecamatan Sampaga merupakan persoalan struktural tata kelola sumber daya alam yang hanya dapat diselesaikan melalui pendekatan partisipatif, transparan, dan berkeadilan.

Kata kunci: Konflik, Pertambangan, Pembangunan, Masyarakat, Pesisir

Pendahuluan

Indonesia dikenal sebagai negara yang kaya sumber daya alam, termasuk mineral dan bahan tambang. Pemanfaatan sumber daya pertambangan di banyak daerah di Indonesia seringkali dikaitkan dengan janji pembangunan ekonomi, peningkatan PAD, dan kesempatan kerja. Namun di banyak kasus, aktivitas pertambangan juga memunculkan konflik sosial, lingkungan, dan ekonomi dengan masyarakat lokal (Gunawan, 2023).

Salah satu aspek penting yang sering menimbulkan konflik adalah masalah penguasaan dan hak atas lahan atau sumber daya, yaitu tumpang-tindih antara izin pertambangan yang diberikan perusahaan melalui negara dengan hak atas tanah, mata pencaharian, dan ruang hidup masyarakat adat atau komunitas lokal. Ketika perusahaan memperoleh Izin Usaha Pertambangan (IUP) atau hak kelola dari pemerintah, tetapi masyarakat setempat memiliki klaim adat, lahan garapan, atau ketergantungan hidup dari lahan/ lingkungan tersebut maka konflik hampir sulit dihindari (Munauwarah). Lebih lanjut, aktivitas pertambangan sering membawa dampak negatif terhadap lingkungan dan keamanan manusia seperti kerusakan lingkungan, pencemaran, degradasi lahan, serta ancaman terhadap ketahanan hidup dan keamanan masyarakat.

Kabupaten Mamuju merupakan salah satu wilayah di Provinsi Sulawesi Barat yang memiliki potensi sumber daya alam cukup besar, khususnya di sektor pertambangan. Tambang pasir pesisir yang mendorong masuknya izin eksplorasi dan rencana operasi perusahaan tambang dalam beberapa tahun terakhir. Namun pada praktiknya, rencana dan kegiatan pertambangan ini memicu penolakan luas dari masyarakat pesisir karena khawatir terhadap kerusakan ruang hidup, hilangnya mata pencaharian (nelayan dan petani), serta ancaman pencemaran dan perubahan fungsi lahan yang dapat berlangsung jangka panjang hal ini yang menjadi faktor utama munculnya penolakan.

 ISSN 2987-677x

Selain itu, proses perizinan yang dianggap kurang transparan, minimnya pelibatan masyarakat dalam pengambilan keputusan, serta ketimpangan manfaat ekonomi yang dirasakan masyarakat turut memperkuat resistensi terhadap aktivitas pertambangan.

Secara teoretis, konflik pertambangan di Kecamatan Sampaga, Kabupaten Mamuju mencerminkan pola yang telah ditemukan di banyak wilayah Indonesia dan negara lain: benturan antara kepentingan ekstraktif (investor/ perusahaan dan pendapatan daerah) dengan hak-hak lokal atas tanah, air, dan sumber penghidupan; serta masalah tata kelola sumber daya, pengakuan hak-hak adat, dan distribusi manfaat yang timpang. Literatur kajian ekstraktif menekankan bahwa konflik semacam ini sering berakar pada lemahnya pengakuan hak atas tanah, ketimpangan kekuasaan, dan model perizinan yang lebih mengutamakan akses modal daripada partisipasi masyarakat.

Dengan mempertimbangkan konteks lokal (gelombang penolakan dan dinamika politis/ administratif di Kecamatan Sampaga, Kabupaten Mamuju) serta temuan kajian teoritik tentang konflik ekstraktif, studi kasus ini penting untuk memetakan kronologi, aktor, faktor penyebab, dampak sosial-lingkungan, dan kerangka penyelesaian yang adil serta berkelanjutan bagi semua pihak. Hasil kajian diharapkan menjadi masukan bagi pembuat kebijakan daerah, perusahaan tambang, dan masyarakat untuk perbaikan tata kelola pertambangan yang menghormati hak masyarakat dan lingkungan.

Metode

Pengumpulan data dalam studi kasus Dinamika Konflik antara Masyarakat dan Perusahaan Tambang: Studi Kasus Penolakan Tambang CV Surya Stone di Kecamatan Sampaga, Kabupaten Mamuju dilakukan dengan pendekatan kualitatif melalui beberapa metode utama, yaitu observasi, wawancara, studi dokumen, dan pengumpulan data teknis pendukung. Observasi dilakukan secara langsung di wilayah Kecamatan Sampaga, Kabupaten Mamuju yang terdampak rencana dan aktivitas pertambangan CV Surya Stone untuk mengamati kondisi sosial masyarakat, aktivitas ekonomi, respons masyarakat terhadap pertambangan, serta kondisi lingkungan sekitar.

Metode analisis yang digunakan dalam studi kasus Dinamika Konflik antara Masyarakat dan Perusahaan Tambang: Studi Kasus Penolakan Tambang CV Surya Stone di Kecamatan Sampaga, Kabupaten Mamuju adalah analisis deskriptif kualitatif yang dipadukan dengan analisis sebab–akibat. Analisis deskriptif digunakan untuk menggambarkan secara sistematis dan faktual kondisi wilayah Kecamatan Sampaga, Kabupaten Mamuju, kronologi konflik, aktor-aktor yang terlibat, serta bentuk-bentuk penolakan masyarakat terhadap aktivitas pertambangan CV Surya Stone. Data yang diperoleh melalui observasi, wawancara, dan studi dokumen disusun dalam bentuk narasi untuk menjelaskan dinamika sosial, ekonomi, dan lingkungan yang terjadi.

Selanjutnya, analisis sebab–akibat digunakan untuk mengidentifikasi hubungan antara aktivitas pertambangan CV Surya Stone dengan munculnya konflik, meliputi aspek penguasaan lahan, proses perizinan, dampak lingkungan, serta ketimpangan distribusi manfaat ekonomi. Melalui analisis ini dapat diketahui faktor-faktor utama penyebab konflik serta dampak yang ditimbulkan terhadap masyarakat dan lingkungan di Kecamatan Sampaga, Kabupaten Mamuju. Hasil analisis kemudian digunakan sebagai dasar dalam penarikan kesimpulan serta perumusan rekomendasi yang bersifat solutif bagi upaya penyelesaian konflik dan perbaikan tata kelola pertambangan yang berkelanjutan.

Hasil Kerja

Situasi Permasalahan

Konflik antara masyarakat dan perusahaan tambang merupakan fenomena yang kerap terjadi di berbagai wilayah Indonesia, terutama di daerah yang memiliki potensi sumber daya alam bernilai ekonomis tinggi. Hal ini juga terjadi di Kecamatan Sampaga, Kabupaten Mamuju, Provinsi Sulawesi Barat, yang dalam beberapa tahun terakhir menjadi lokasi rencana dan aktivitas pertambangan pasir oleh CV Surya Stone. Masuknya perusahaan ini ke wilayah Sampaga pada awalnya diproyeksikan sebagai bagian dari strategi pembangunan daerah melalui sektor pertambangan, dengan harapan dapat meningkatkan Pendapatan Asli Daerah (PAD), membuka lapangan kerja, serta mendorong pertumbuhan ekonomi lokal.

Namun, dalam dinamika pelaksanaannya, keberadaan dan aktivitas CV Surya Stone justru menimbulkan resistensi yang kuat dari masyarakat setempat. Penolakan ini muncul karena masyarakat menilai bahwa kegiatan pertambangan berpotensi menimbulkan kerusakan lingkungan yang serius, seperti degradasi lahan, pencemaran air, perubahan fungsi lahan, serta ancaman terhadap wilayah pesisir. Selain itu, masyarakat Kecamatan Sampaga yang sebagian besar menggantungkan hidup pada sektor pertanian, perikanan, dan kegiatan ekonomi berbasis sumber daya alam lokal merasa bahwa aktivitas pertambangan mengancam langsung keberlangsungan mata pencaharian mereka.

Situasi menjadi semakin kompleks karena masyarakat menilai bahwa proses perizinan yang diberikan kepada CV Surya Stone tidak sepenuhnya melibatkan partisipasi publik secara memadai. Minimnya transparansi informasi, kurangnya sosialisasi, serta keterbatasan akses masyarakat terhadap dokumen perizinan dan AMDAL menimbulkan kecurigaan dan ketidakpercayaan terhadap pemerintah daerah dan perusahaan. Kondisi ini kemudian memicu akumulasi kekecewaan yang bermuara pada aksi

 ISSN 2987-677x

penolakan terbuka, seperti unjuk rasa, pemblokiran akses menuju lokasi tambang, serta tuntutan pencabutan izin usaha pertambangan.

Secara sosial, konflik ini memunculkan polarisasi di tengah masyarakat, antara kelompok yang menolak dengan kelompok yang melihat pertambangan sebagai peluang ekonomi. Secara ekonomi, ketidakpastian aktivitas pertambangan menimbulkan kekhawatiran akan hilangnya sumber penghidupan utama masyarakat. Sementara secara lingkungan, kekhawatiran utama masyarakat berkaitan dengan potensi kerusakan ekosistem pesisir, pencemaran air tanah dan sungai, serta dampak jangka panjang terhadap keberlanjutan lingkungan hidup.

Dalam perspektif tata kelola sumber daya alam, situasi permasalahan ini mencerminkan lemahnya sinkronisasi antara kepentingan pembangunan ekonomi, perlindungan lingkungan, dan pemenuhan hak-hak masyarakat lokal. Kondisi tersebut menegaskan bahwa konflik pertambangan di Kecamatan Sampaga bukan hanya persoalan teknis eksploitasi sumber daya, tetapi juga merupakan persoalan struktural yang berkaitan dengan kebijakan perizinan, relasi kekuasaan, serta distribusi manfaat yang belum berpihak kepada masyarakat secara adil.

Berdasarkan kerangka analisis situasi permasalahan, konflik pertambangan di Kecamatan Sampaga melibatkan beberapa aktor utama sebagai pembuat keputusan, yaitu pemerintah daerah Kabupaten Mamuju, perusahaan CV Surya Stone, dan masyarakat Kecamatan Sampaga. Pemerintah daerah, khususnya dinas yang membidangi pertambangan, perizinan, dan lingkungan hidup, memiliki kewenangan dalam menerbitkan Izin Usaha Pertambangan (IUP), melakukan pengawasan, serta mengambil keputusan administratif terkait keberlanjutan operasi pertambangan. CV Surya Stone bertindak sebagai pemegang IUP sekaligus pelaksana utama kegiatan pertambangan di lapangan. Sementara itu, masyarakat Kecamatan Sampaga, baik sebagai individu maupun kelompok, termasuk tokoh adat, tokoh masyarakat, nelayan, petani, dan aktivis lingkungan merupakan pihak yang terdampak langsung karena memiliki ketergantungan terhadap lahan, wilayah pesisir, dan lingkungan hidup. Ketiga aktor ini memiliki posisi, kepentingan, serta kekuasaan yang tidak seimbang, sehingga sangat memengaruhi dinamika pengambilan keputusan dalam konflik yang terjadi.

Tujuan yang ingin dicapai oleh masing-masing pembuat keputusan menunjukkan perbedaan orientasi yang cukup tajam. Pemerintah daerah bertujuan untuk meningkatkan pertumbuhan ekonomi daerah, mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya alam, meningkatkan Pendapatan Asli Daerah (PAD), serta menciptakan iklim investasi yang kondusif. Di sisi lain, CV Surya Stone bertujuan memperoleh keuntungan ekonomi melalui eksploitasi sumber daya pasir secara legal, efisien, dan berkelanjutan, serta menjaga stabilitas operasional perusahaan. Sementara itu, masyarakat Kecamatan Sampaga bertujuan mempertahankan ruang hidup, menjamin keberlanjutan mata pencaharian, melindungi lingkungan, serta memastikan hak-hak mereka diakui dan dilibatkan dalam proses pengambilan keputusan. Perbedaan tujuan inilah yang kemudian menjadi sumber utama benturan kepentingan antara ketiga aktor tersebut.

Perbedaan orientasi tujuan tersebut juga tercermin dalam kriteria yang digunakan masing-masing pihak dalam menilai keberhasilan suatu kebijakan atau tindakan. Bagi pemerintah, keberhasilan diukur melalui aspek legalitas izin, peningkatan PAD, stabilitas sosial-politik, dan kelancaran investasi. Bagi CV Surya Stone, keberhasilan ditentukan oleh kelancaran operasional, tingkat keuntungan, kepastian hukum, serta minimnya gangguan sosial. Sementara itu, bagi masyarakat, keberhasilan sangat ditentukan oleh terjaganya kelestarian lingkungan, keberlanjutan mata pencaharian, rasa aman, serta keadilan dalam proses pengambilan keputusan. Perbedaan kriteria ini menyebabkan keputusan yang dianggap berhasil oleh pemerintah dan perusahaan belum tentu dipandang berhasil oleh masyarakat.

Ukuran kinerja dalam konteks konflik pertambangan di Kecamatan Sampaga dapat dilihat dari beberapa indikator utama, seperti besarnya realisasi investasi pertambangan, kontribusi sektor pertambangan terhadap PAD Kabupaten Mamuju, tingkat partisipasi masyarakat dalam proses perizinan dan pengawasan, kondisi lingkungan hidup sebelum dan sesudah adanya aktivitas pertambangan, serta frekuensi dan intensitas konflik sosial yang terjadi antara masyarakat dan perusahaan. Indikator-indikator tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan pembangunan tidak dapat semata-mata diukur dari aspek ekonomi, tetapi juga harus mempertimbangkan dimensi sosial dan lingkungan secara seimbang.

Dalam merespons konflik yang terjadi, terdapat sejumlah input kontrol atau tindakan alternatif yang dapat diambil oleh para pengambil keputusan. Alternatif tersebut antara lain berupa penghentian sementara atau pembekuan aktivitas pertambangan CV Surya Stone, evaluasi bahkan pencabutan IUP apabila ditemukan pelanggaran regulasi, pelaksanaan dialog multipihak yang melibatkan pemerintah, perusahaan, dan perwakilan masyarakat secara setara, penyusunan atau revisi dokumen AMDAL secara transparan dan partisipatif, penetapan zona perlindungan lingkungan serta wilayah tangkap nelayan yang tidak boleh ditambang, serta pemberian kompensasi atau skema pemberdayaan ekonomi bagi masyarakat terdampak. Berbagai alternatif ini mencerminkan adanya pilihan kebijakan yang dapat ditempuh untuk meredam konflik sekaligus mendorong pengelolaan pertambangan yang lebih adil.

 ISSN 2987-677x

Konflik pertambangan di Kecamatan Sampaga terjadi dalam konteks kebijakan pertambangan nasional yang masih menghadapi berbagai tantangan, seperti lemahnya pengawasan, rendahnya partisipasi masyarakat, serta dominannya kepentingan modal dalam proses perizinan. Di sisi lain, Kecamatan Sampaga memiliki karakteristik sosial ekonomi sebagai wilayah yang sebagian besar penduduknya menggantungkan hidup pada sektor pertanian dan pesisir. Ketergantungan yang tinggi terhadap sumber daya alam menjadikan masyarakat sangat rentan terhadap dampak negatif aktivitas pertambangan. Secara teoretis, konflik seperti ini merupakan bentuk konflik sumber daya alam (*natural resource conflict*) yang dipicu oleh tumpang tindih klaim atas lahan dan sumber daya, perbedaan kepentingan antaraktor, serta ketimpangan relasi kuasa antara negara, korporasi, dan masyarakat lokal. Dengan demikian, situasi permasalahan dalam studi kasus ini tidak hanya menggambarkan konflik lokal antara masyarakat dan CV Surya Stone, tetapi juga mencerminkan persoalan struktural dalam tata kelola pertambangan di Indonesia, khususnya terkait pengakuan hak masyarakat, perlindungan lingkungan, dan keadilan distribusi manfaat pembangunan.

Analisis Permasalahan

Konflik antara masyarakat Kecamatan Sampaga dengan perusahaan tambang CV Surya Stone dapat dipahami sebagai bentuk konflik sosial yang lahir dari pertentangan kepentingan atas penguasaan dan pemanfaatan sumber daya alam yang bernilai ekonomi tinggi. Berdasarkan teori konflik sosial yang dikemukakan Karl Marx, konflik berasal dari ketimpangan penguasaan alat produksi dan sumber daya ekonomi. Dalam konteks ini, CV Surya Stone sebagai pemilik modal, teknologi, dan akses terhadap perizinan negara berada pada posisi dominan, sementara masyarakat lokal hanya berada pada posisi sebagai pihak yang terdampak tanpa memiliki kekuasaan formal untuk menentukan arah pemanfaatan sumber daya di wilayahnya. Ketimpangan relasi kuasa ini melahirkan ketegangan struktural yang kemudian termanifestasi dalam bentuk penolakan terhadap aktivitas pertambangan.

Pemikiran Marx tersebut diperkuat oleh pandangan Lewis A. Coser yang menyatakan bahwa konflik tidak hanya merupakan gejala disfungsi sosial, tetapi juga dapat menjadi sarana bagi kelompok yang lemah untuk mengekspresikan kepentingannya dan memperjuangkan perubahan. Dalam kasus Sampaga, konflik justru menjadi media bagi masyarakat untuk menyuarakan ketidakadilan yang mereka rasakan, baik terkait ancaman kehilangan mata pencaharian, kerusakan lingkungan, maupun minimnya pelibatan dalam proses perizinan. Penolakan masyarakat, aksi protes, serta desakan evaluasi izin CV Surya Stone merupakan bentuk konkret dari konflik sebagai alat artikulasi kepentingan sosial.

Dari perspektif pembangunan berkelanjutan, konflik ini mencerminkan kegagalan dalam menjaga keseimbangan antara tiga pilar utama pembangunan, yaitu ekonomi, sosial, dan lingkungan. Secara ekonomi, pemerintah daerah dan perusahaan menempatkan sektor pertambangan sebagai instrumen pertumbuhan ekonomi dan peningkatan PAD. Namun, dari sisi sosial dan lingkungan, masyarakat menilai bahwa risiko yang mereka tanggung jauh lebih besar dibandingkan dengan manfaat ekonomi yang mereka peroleh. Potensi degradasi lahan, pencemaran air, kerusakan kawasan pesisir, serta hilangnya lahan pertanian dan wilayah tangkap nelayan bertentangan dengan prinsip keberlanjutan lingkungan. Pada saat yang sama, proses perizinan yang minim partisipasi juga bertentangan dengan prinsip keberlanjutan sosial yang menuntut keadilan, inklusivitas, dan perlindungan kelompok rentan. Ketidakseimbangan inilah yang kemudian menjadi pemicu utama konflik di Kecamatan Sampaga, sebagaimana ditegaskan oleh Bebbington et al. (2008) bahwa konflik pertambangan sering muncul ketika pembangunan hanya berorientasi pada pertumbuhan ekonomi dan mengabaikan dimensi sosial-ekologis.

Dari sudut pandang teori tanggung jawab sosial perusahaan (CSR), konflik di Kecamatan Sampaga juga menunjukkan lemahnya pelaksanaan tanggung jawab sosial oleh perusahaan tambang. Secara ideal, sebagaimana dikemukakan Carroll (1991), perusahaan tidak hanya bertanggung jawab secara ekonomi dan hukum, tetapi juga memiliki tanggung jawab etis dan filantropis terhadap masyarakat. Namun, dalam praktiknya, keberadaan CV Surya Stone belum sepenuhnya dipersepsikan masyarakat sebagai entitas yang memberikan manfaat sosial yang sebanding dengan risiko yang ditimbulkan. Ketiadaan atau lemahnya program pemberdayaan masyarakat, minimnya kompensasi yang adil, serta kurangnya upaya rehabilitasi lingkungan memperkuat persepsi negatif masyarakat terhadap perusahaan. Dalam kerangka teori stakeholder Freeman (1984), kondisi ini menunjukkan bahwa kepentingan masyarakat sebagai pemangku kepentingan utama belum mendapatkan perhatian yang proporsional. Akibatnya, perusahaan gagal memperoleh social license to operate yang stabil dan berkelanjutan.

Hubungan antara masyarakat dan korporasi dalam kasus ini juga dapat dianalisis melalui konsep *Community–Corporation Relations* dan *Social License to Operate* (SLO). Di Kecamatan Sampaga, hubungan yang terbangun antara masyarakat dan CV Surya Stone cenderung bersifat asimetris dan kurang komunikatif. Sosialisasi yang terbatas, lemahnya mekanisme konsultasi publik, serta minimnya transparansi informasi terkait AMDAL dan dampak tambang membuat masyarakat merasa diabaikan dalam pengambilan keputusan. Ketika kepercayaan

 ISSN 2987-677x

masyarakat terhadap perusahaan menurun, legitimasi sosial untuk beroperasi pun ikut melemah. Selain itu, lemahnya penerapan prinsip *Free, Prior, and Informed Consent* (FPIC) menyebabkan masyarakat merasa tidak pernah benar-benar memberikan persetujuan yang bebas, didahului informasi yang memadai, dan tanpa tekanan, sebagaimana disyaratkan dalam standar hak asasi manusia modern. Kondisi ini semakin memperuncing konflik.

Jika dianalisis dalam perspektif multidisipliner, konflik pertambangan di Kecamatan Sampaga merupakan hasil interaksi dari berbagai faktor. Dari aspek politik, konflik berkaitan dengan kebijakan perizinan yang dianggap tidak transparan dan kurang akuntabel. Dari aspek hukum, konflik mencerminkan lemahnya penegakan hukum lingkungan serta keterbatasan akses masyarakat terhadap mekanisme keadilan. Dari aspek ekonomi, konflik menunjukkan adanya ketimpangan distribusi manfaat dan beban risiko antara perusahaan dan masyarakat. Sementara dari aspek sosial dan lingkungan, konflik mencerminkan ancaman terhadap keberlanjutan ruang hidup, identitas sosial, dan sistem ekonomi lokal masyarakat berbasis pertanian dan pesisir.

Konflik ini juga menunjukkan pola eskalasi konflik sebagaimana lazim terjadi dalam konflik sumber daya alam. Pada tahap awal, konflik bersifat laten ketika masyarakat mulai merasakan kekhawatiran terhadap rencana pertambangan. Ketika kekhawatiran tersebut tidak direspons secara memadai melalui dialog dan partisipasi, konflik kemudian berkembang menjadi konflik terbuka dalam bentuk penolakan, aksi protes, dan tekanan terhadap pemerintah daerah. Jika tidak dikelola secara adil dan partisipatif, konflik ini berpotensi berkembang lebih lanjut menjadi konflik berkepanjangan yang merusak kohesi sosial masyarakat serta menghambat pembangunan daerah.

Dengan demikian, permasalahan utama dalam konflik pertambangan di Kecamatan Sampaga tidak hanya terletak pada aktivitas teknis pertambangan itu sendiri, tetapi lebih pada persoalan struktural dalam tata kelola sumber daya alam, yaitu ketimpangan relasi kuasa, lemahnya partisipasi masyarakat, ketidakseimbangan antara kepentingan ekonomi dan perlindungan lingkungan, serta belum optimalnya peran tanggung jawab sosial perusahaan. Selama persoalan-persoalan mendasar ini belum diselesaikan, konflik antara masyarakat dan CV Surya Stone akan sulit diredam secara berkelanjutan.

Alternatif Solusi

Alternatif solusi untuk menyelesaikan konflik antara masyarakat Kecamatan Sampaga dan CV Surya Stone perlu dilakukan secara bertahap, partisipatif, serta berbasis pada prinsip pembangunan berkelanjutan dan keadilan sosial. Langkah awal yang paling mendesak adalah penghentian sementara aktivitas pertambangan guna menurunkan eskalasi konflik sekaligus membuka ruang bagi proses evaluasi perizinan dan dampak lingkungan secara objektif. Penghentian sementara ini penting sebagai bentuk perlindungan terhadap masyarakat sekaligus sebagai dasar membangun kembali kepercayaan publik terhadap pemerintah dan perusahaan.

Penyelesaian konflik selanjutnya harus dilakukan melalui dialog multipihak yang melibatkan pemerintah daerah, CV Surya Stone, serta perwakilan masyarakat secara setara dan transparan. Dialog yang dimediasi oleh pihak independen diperlukan agar proses komunikasi tidak didominasi oleh salah satu pihak. Dalam konteks ini, penerapan prinsip *social license to operate* menjadi penting, karena keberlanjutan operasi perusahaan sangat bergantung pada penerimaan sosial dari masyarakat (Prno & Slocombe, 2012). Dialog juga harus disertai keterbukaan informasi mengenai dokumen perizinan, AMDAL, serta rencana operasional pertambangan.

Sebagai bentuk penguatan akuntabilitas, perlu dilakukan audit lingkungan dan hukum secara independen terhadap aktivitas CV Surya Stone. Audit ini bertujuan menilai tingkat kepatuhan perusahaan terhadap peraturan lingkungan hidup dan pertambangan. Apabila ditemukan pelanggaran, pemerintah daerah memiliki dasar hukum untuk menjatuhkan sanksi administratif hingga pencabutan izin. Langkah ini sejalan dengan pandangan bahwa kepatuhan terhadap regulasi dan pengawasan yang kuat merupakan kunci utama pencegahan konflik pertambangan (Gunningham et al., 2004).

Dalam jangka menengah, perusahaan perlu melaksanakan program tanggung jawab sosial perusahaan (CSR) yang bersifat nyata dan berorientasi pada kebutuhan masyarakat, seperti pemberdayaan ekonomi lokal, perbaikan infrastruktur desa, serta penguatan sektor pertanian dan perikanan. CSR tidak boleh hanya bersifat simbolik, melainkan harus menjadi bagian dari tanggung jawab moral dan sosial perusahaan terhadap masyarakat terdampak (Carroll, 1991).

Dalam jangka panjang, penyelesaian konflik harus diarahkan pada perbaikan tata kelola pertambangan secara menyeluruh dengan mengacu pada prinsip pembangunan berkelanjutan, yaitu keseimbangan antara pertumbuhan ekonomi, keadilan sosial, dan perlindungan lingkungan (WCED, 1987). Pemerintah daerah perlu menetapkan zonasi wilayah tambang yang jelas, melindungi kawasan ekologis dan ruang hidup masyarakat, serta memastikan adanya jaminan reklamasi dan pascatambang. Dengan komitmen bersama antara pemerintah, perusahaan, dan masyarakat, konflik pertambangan di Kecamatan Sampaga tidak hanya dapat diselesaikan, tetapi juga dapat menjadi momentum perbaikan tata kelola sumber daya alam yang lebih adil dan berkelanjutan.

 ISSN 2987-677x

Kesimpulan

Kronologi konflik pertambangan antara masyarakat dan CV Surya Stone di Kecamatan Sampaga menunjukkan bahwa konflik bermula dari masuknya perusahaan dan diterbitkannya izin pertambangan yang dinilai kurang transparan serta minim sosialisasi kepada masyarakat. Ketidakjelasan informasi tersebut memicu keresahan warga yang kemudian berkembang menjadi penolakan terbuka dalam bentuk aksi protes dan tuntutan penghentian aktivitas pertambangan.

Faktor utama penyebab konflik meliputi kekhawatiran masyarakat terhadap potensi kerusakan lingkungan pesisir, ancaman hilangnya mata pencaharian nelayan dan petani, lemahnya pelibatan masyarakat dalam proses perizinan, serta ketimpangan distribusi manfaat ekonomi. Selain itu, rendahnya kepercayaan masyarakat terhadap pemerintah dan perusahaan turut memperbesar eskalasi konflik.

Dampak konflik terhadap kehidupan masyarakat Kecamatan Sampaga terlihat pada meningkatnya ketegangan sosial di tengah masyarakat, terganggunya aktivitas ekonomi warga, serta munculnya kekhawatiran serius terhadap keberlanjutan lingkungan hidup. Konflik juga berdampak pada rasa aman masyarakat dan stabilitas sosial wilayah setempat.

Peran pemerintah daerah, CV Surya Stone, dan masyarakat dalam penyelesaian konflik menunjukkan bahwa pemerintah belum sepenuhnya optimal dalam pengawasan dan penegakan regulasi, sementara CV Surya Stone belum maksimal dalam membangun komunikasi sosial dan pelaksanaan tanggung jawab sosial perusahaan. Di sisi lain, masyarakat menunjukkan peran aktif dalam memperjuangkan hak atas lingkungan dan ruang hidup melalui aksi kolektif dan partisipasi sosial.

Rekomendasi pengelolaan pertambangan yang adil, partisipatif, dan berkelanjutan menegaskan pentingnya evaluasi menyeluruh terhadap izin pertambangan CV Surya Stone, penguatan pengawasan lingkungan, peningkatan partisipasi masyarakat dalam setiap tahapan pengambilan keputusan, serta penerapan pembagian manfaat yang lebih adil. Pengelolaan pertambangan di Kecamatan Sampaga harus mengedepankan keseimbangan antara kepentingan ekonomi, perlindungan lingkungan, dan keadilan sosial.

Referensi

Bebbington, A., Hinojosa, L., Bebbington, D. H., Burneo, M. L., & Warnaars, X. (2008). Mining and social movements: Struggles over livelihood and rural territorial development. *World Development, 36*(12), 2888–2905. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2007.11.016

Carroll, A. B. (1991). The pyramid of corporate social responsibility: Toward the moral management of organizational stakeholders. *Business Horizons, 34*(4), 39–48. https://doi.org/10.1016/0007-6813(91)90005-G

Coser, L. A. (1964). *The functions of social conflict*. Free Press.

Fitriani, L., & Kurniawan, T. (2019). Peran negara dalam konflik pertambangan: Studi kasus wilayah pesisir Jawa. *Jurnal Politik, 4*(2), 231–252.

Freeman, R. E. (1984). *Strategic management: A stakeholder approach.* Pitman.

Gunawan, L. S. (2023). Konflik pertambangan di Indonesia: Studi kasus tambang emas Martabe dan upaya meningkatkan partisipasi masyarakat dan penegakan hukum dalam industri pertambangan. *Jurnal Pendidikan Tambusai, 7*(1), 2062–2074.

Gunningham, N., Kagan, R. A., & Thornton, D. (2004). Social license and environmental protection: Why businesses go beyond compliance. *Law & Social Inquiry, 29*(2), 307–341. https://doi.org/10.1111/j.1747-4469.2004.tb00338.x

Haikal, M. F. (2021). *Pengaruh kawasan tambang liar terhadap lingkungan permukiman di Kelurahan Rimuku, Kecamatan Mamuju, Kabupaten Mamuju* (Tesis magister, Universitas Bosowa).

Hidayat, S. (2017). Dampak sosial dan lingkungan pertambangan terhadap masyarakat lokal. *Jurnal Masyarakat dan Budaya, 19*(2), 259–274.

Jaringan Advokasi Tambang. (2025). *Sulbar tolak tambang: Laporan advokasi penolakan tambang pasir di Sulawesi Barat*. JATAM.

Marx, K., & Engels, F. (1848). *The communist manifesto*. Penguin Classics.

Nugraha, E. D., Heryanto, N., & Putra, R. (2022). Heavy metal assessments of soil samples from a high natural background radiation area: A case study in Mamuju, Indonesia. *Toxics, 10*(9), 1–15. https://doi.org/10.3390/toxics10090482

Prno, J., & Slocombe, D. S. (2012). Exploring the origins of the social license to operate in the mining sector: Perspectives from governance and sustainability theories. *Resources Policy, 37*(3), 346–357. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.04.002

World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future.* Oxford University Press.

Zamroni, A. (2022). Evaluation of corporate social responsibility programs for local communities around mining companies in Indonesia. *Sustinere: Journal of Environment and Sustainability, 6*(1), 45–60.

 ISSN 2987-677x

Efek Sinergis dari *Tapered Constant* (A/V) dan Optimasi Tinggi Balok terhadap Kapasitas Lentur *Tapered I-Beam*

Titin Sundari[1,2], Suratno Lourentius[1,3], Arya Rizki Darmawan[4]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2] Program Studi Teknik Sipil Universitas Hasyim Asy 'Ari Tebuireng Jombang

[3] Progrm Studi DIII Teknik Kimia Politeknik Mangunwijaya Semarang

[4] Program Studi Teknik Sipil Universitas Lambung Mangkurat, Banjar Baru, Kalimantan Selatan

✉ titinsundari@unhasy.ac.id

✉ suratnolourentius@gmail.com

Efisiensi struktural balok-I baja non-prismatis semakin diakui dalam rekayasa infrastruktur modern, namun implementasinya sering kali terhambat oleh fenomena instabilitas yang kompleks seperti *Lateral-Torsional Buckling (LTB)*. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan parameter geometris balok tapered guna memaksimalkan kapasitas lentur di bawah batasan volume material yang konstan. Investigasi dilakukan melalui pendekatan multi-metode yang komprehensif, mengintegrasikan pengujian eksperimental di laboratorium, simulasi numerik ANSYS, serta verifikasi analitis berdasarkan standar SNI 1729:2020. Enam model benda uji dengan variasi indikator *Tapered Constant" (A/V)* dievaluasi untuk memetakan transisi stabilitas dari zona elastis ke *inelastic*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa transisi dari konfigurasi *prismatic* ke profil *moment base tapered* mampu meningkatkan kapasitas momen nominal hingga 41,5%. Selain itu, ditemukan fenomena *overstrength* eksperimental, di mana kapasitas aktual tercatat 2% hingga 4% lebih tinggi dibandingkan prediksi teoretis dan numerik, yang mengindikasikan adanya margin keamanan konservatif pada kode desain saat ini. Penelitian ini menyimpulkan bahwa konstanta *tapered* merupakan parameter desain kritis untuk efisiensi material, dan validasi numerik terbukti memiliki akurasi tinggi dalam memprediksi perilaku tekuk balok *non-prismatic*.

Kata Kunci: *tapered constant*, balok *non-prismatic*, kapasitas momen, infrastruktur

Pendahuluan

Meningkatnya permintaan global akan infrastruktur yang hemat biaya dan berkelanjutan telah menempatkan balok I non-prismatik *(tapered)* sebagai solusi utama dalam teknik struktur modern. Baja struktural telah menjadi material konstruksi pilihan karena rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi serta waktu pelaksanaan yang jauh lebih singkat (Arifi & Setyowulan, 2020). Dalam konteks bangunan industri dan jembatan, penggunaan elemen baja secara strategis sangat penting untuk memenuhi persyaratan fungsional sekaligus mengurangi konsumsi material dan dampak lingkungan secara keseluruhan (De'nan et al., 2019). Kemampuan balok *tapered* mendistribusikan material secara lebih efisien dengan menyesuaikan geometri penampang terhadap distribusi momen lentur sepanjang bentang akan meningkatkan kinerja struktural, meskipun karakteristik stabilitasnya yang kompleks menimbulkan tantangan dalam standar desain (Doksanovic et al., 2023). Keunggulan struktural balok *tapered* memungkinkan terciptanya struktur yang tidak hanya layak secara ekonomis tetapi juga mampu menjangkau bentang yang lebih besar dengan beban gravitasi yang kecil (De'nan et al., 2019).

Meskipun standar desain saat ini menyediakan kerangka kerja untuk resistansi *LTB*, investigasi ilmiah terbaru menunjukkan bahwa model analitis sering kali menghasilkan prediksi yang terlalu konservatif dan tidak sepenuhnya menangkap pengaruh parameter geometris yang bervariasi (Dogariu et al., 2017). Selain itu, verifikasi saat ini sering kali mengabaikan efek sinergis dari proses fabrikasi, seperti tegangan sisa yang ditemukan dalam profil *tapered welded*, yang menyebabkan potensi perbedaan dalam margin keamanan (Lebastard et al., 2024). Keterbatasan pendekatan ini menekankan perlunya prediksi akurat kapasitas lentur dan stabilitas melalui analisis *finite element* dan persamaan diferensial untuk analisis deformasinya (Mariappan et al., 2023).

Observasi hasil uji laboratorium menunjukkan adanya *overstrengt*h eksperimental, di mana kapasitas aktual balok melampaui prediksi teoretis berdasarkan standar SNI 1729: 2020 (AISC 2016) sebesar 2% dan simulasi numerik sebesar 4%. Temuan ini selaras dengan literatur yang menyatakan bahwa hasil eksperimen sering kali menunjukkan kapasitas lebih tinggi daripada prediksi teoretis akibat interaksi stabilitas yang kompleks pada zona *inelastic* (Arifi & Setyowulan, 2020). Perlu evaluasi komprehensif yang merekonsiliasi metode analitis tradisional dengan simulasi non-linier tingkat lanjut guna memberikan pedoman desain yang lebih presisi bagi penampang ini (Lebastard et al., 2024).

Studi ini bertujuan untuk mengatasi celah tersebut dengan melaksanakan investigasi *multi-metode* yang mengintegrasikan pengujian eksperimental, analisis elemen hingga non-linier (ANSYS), dan verifikasi analitis untuk menetapkan konfigurasi geometris optimal guna memaksimalkan kapasitas lentur pada balok-I *tapered*. Temuan ini diharapkan dapat memberikan wawasan kritis mengenai faktor *overstrength* dan batasan

 ISSN 2987-677x

stabilitas balok-I *tapered welded*, yang pada akhirnya berkontribusi pada praktik desain struktur yang lebih efisien dan andal.

Metode

Tahapan penelitian meliputi identifikasi masalah dan studi literatur, perancangan model geometri balok, pengujian sifat mekanik material, pengujian benda uji balok, analisis numerik ANSYS, serta komparasi hasil antara pendekatan teoritis, eksperimen, dan numerik.

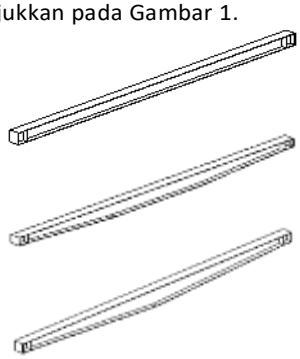
Desain Model dan Variabel Penelitian

Setiap model balok memiliki konfigurasi penampang dengan sayap balok yang bersifat prismatik, sedangkan badan balok membentuk geometri *tapered*, sementara volume total balok dijaga relatif konstan. Parameter geometrik utama meliputi tinggi *web* maksimum pada tengah bentang (h_{max}), tinggi *web* minimum pada tepi bentang (h_{min}), tebal sayap *(t_f),* lebar sayap *(b_f),* tebal *web* (t_w), dan panjang bentang balok *(L).* Selain itu, parameter penting lain yang dianalisis adalah *tapered constant*, yaitu rasio antara luas penampang di tengah bentang terhadap volume total balok. Parameter geometrik ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Geometrik Model

Model	Sudut tapered (ø)	Tinggi web tengah (h_{max})	Luas penampang ditengah bentang (A)	Volume model (V)	Tapered constant (A/V)	Ukuran penampang	
	°	mm	m2	m3			
1	90	90	0,00048	0,00058	0,83	Tebal flens (tf) :	3 mm
2	7,60	100	0,00050	0,00058	0,87	Lebar flens (bf):	50 mm
3	6,42	105	0,00051	0,00058	0,88	Tebal web (tw) :	2 mm
4	5,71	110	0,00052	0,00058	0,90	Tinggi web tepi (h_{min}):	60 mm
5	5,71	115	0,00053	0,00058	0,92	Panjang balok (L) :	1350 mm
6	5,71	120	0,00054	0,00058	0,94		

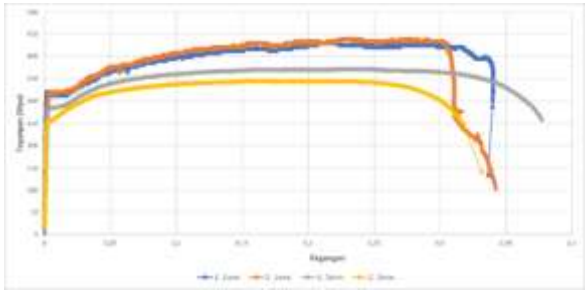
Dari enam model yang dirancang, tiga model dipilih untuk diuji secara eksperimen, yaitu model 1 *(uniform beam)*, model 3 *(linear tapered beam)*, dan model 6 *(moment base tapered beam)* dengan model perspektif seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Perspektif Model 1, 3, dan 6

Karakterisasi Material

Sifat mekanik material baja ditentukan melalui pengujian tarik terhadap spesimen pelat baja sesuai dengan standar yang berlaku. Berdasarkan uji tarik ini diperoleh hasil berupa hubungan antara beban dan deformasi berupa pertambahan panjang *(mm).* Nilai tegangan *F* dihitung dari beban *(N)* dibagi dengan luas penampang benda uji *(mm^2)*. Nilai regangan ε dihitung dari pertambahan panjang dibagi dengan panjang mula-mula. Sedangkan nilai modulus elastisitas *E* diperoleh dari nilai tegangan dibagi regangan. Data hasil pengujian diolah dengan *MS Excel*, sehingga didapatkan kurva hubungan tegangan regangan seperti disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kurva Tegangan-Regangan Plat Baja

Untuk perhitungan dipakai data benda uji dengan F_y = 252,24 MPa, F_u = 345,23 MPa, ε_y = 0,0013, dan *E* = 194406 MPa. Karakterisasi material ini penting untuk memastikan bahwa parameter material yang digunakan dalam analisis numerik dan perhitungan teoritis mencerminkan sifat mekanik aktual dari material yang digunakan pada benda uji.

Pengujian Eksperimen

Masing-masing ada 2 buah model 1, 3, dan 6 untuk merepresentasikan variasi geometri penampang dari kondisi prismatik hingga *tapered* yang paling signifikan. Benda uji balok dipasang pada sistem pengujian dengan kondisi tumpuan sederhana (*simply supported beam*) dan dibebani menggunakan beban terpusat yang ditempatkan pada tengah bentang. Pembebanan diberikan secara bertahap menggunakan *hydraulic jack* yang terhubung dengan rangka pembebanan (*loading frame*) seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. *Setting up* Pengujian

Untuk memonitor respons struktural selama pengujian, digunakan perangkat pengukuran berupa *Linear Variable Differential Transformer (LVDT)* untuk mengukur lendutan balok dan *strain gauge* yang dipasang pada sayap atas dan sayap bawah balok untuk mengukur distribusi regangan selama pembebanan. Hasil pengujian pembebanan berupa kurva beban-lendutan ke bawah dan lateral. Data regangan yang diperoleh digunakan untuk menghitung gaya tarik dan

 ISSN 2987-677x

tekan pada penampang serta untuk menentukan nilai momen lentur pada saat kondisi awal leleh material. Pengamatan visual juga dilakukan selama proses pembebanan untuk mengidentifikasi mekanisme keruntuhan struktur, khususnya untuk mendeteksi terjadinya fenomena *lateral torsional buckling (LTB).*

Analisis Teoritis Kapasitas Lentur

Analisis teoritis mengacu pada standar perencanaan kekuatan batas sesuai SNI 1729 : 2020 (Badan Standardisasi Nasional, 2020) yang mengacu pada ANSI/AISC 360-16. Perhitungan kapasitas momen nominal dilakukan dengan mempertimbangkan klasifikasi penampang, kondisi kekangan lateral, serta kemungkinan terjadinya mekanisme ketidakstabilan seperti tekuk lokal dan tekuk torsi lateral. Dalam analisis ini, kapasitas momen lentur penampang dihitung menggunakan parameter geometri penampang pada tengah bentang balok, karena lokasi tersebut merupakan titik dengan momen maksimum pada konfigurasi pembebanan yang digunakan.

1. Klasifikasi penampang
   - Penampang kompak, jika semua bagian sayap dan badan menyatu, dan pada elemen tekan mempunyai batasan $\lambda < \lambda p$.
   - Penampang non kompak, jika salah satu atau semua bagian elemen tekan mempunyai batasan $\lambda p < \lambda \leq \lambda r$.
   - Penampang langsing, jika seluruh bagian elemen tekan mempunyai rasio $\lambda \geq \lambda r$.

$$\lambda = \frac{b}{2tf} \quad (1)$$

$$\lambda p = 0{,}38\sqrt{\frac{E}{fy}} \quad (2)$$

$$\lambda r = 0{,}95\sqrt{kc.\frac{E}{Fl}} \quad (3)$$

Untuk sayap profil tersusun I-WF simetri ganda dan tunggal:

$$kc = 4\sqrt{\frac{h}{tw}} \quad \text{dengan} \quad 0{,}35 \leq kc \leq 0{,}76 \quad (4)$$

$$Fl = \frac{Fy.S_{XT}}{S_{XC}} \geq 0{,}5Fy \quad (5)$$

Untuk lentur sumbu kuat pada komponen struktur tersusun dengan badan kompak.

2. Klasifikasi keadaan batas

Profil I kompak simetri ganda, badan kompak, sayap kompak (F2) nilai kuat lentur nominal (Mn) diambil nilai terkecil dari kondisi batas leleh *(Y)* dan tekuk torsi lateral *(LTB).*

a. Kondisi leleh

$$Mn = Mp = Fy.Zx \quad (6)$$

dengan:

M_n = kuat lentur nominal (Nmm)
M_p = momen plastis (Nmm)
F_y = tegangan leleh (MPa)
Z_x = modulus plastis (mm³)

b. Kondisi *LTB*

Diperhitungkan terhadap 3 kondisi, yaitu jika L_b (jarak antara titik-titik yang dikekang untuk menahan perpindahan lateral) < *Lp* (batas panjang tidak dikekang secara lateral untuk kondisi batas leleh) maka tidak terjadi *LTB. Lr* adalah batas panjang maksimum tidak dikekang secara lateral untuk kondisi batas *LTB inelastis*.

$$Lp = 1{,}76\, ry\sqrt{\frac{E}{Fy}} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{Lr = 1{,}95rts\left(\frac{E}{0{,}7Fy}\right)\left(\sqrt{\left(\frac{Jc}{Sx.ho}\right)+\sqrt{\left(\frac{Jc}{Sxho}\right)^2+6{,}76\frac{0{,}7Fy^2}{E}}}\right)} \quad (8)$$

$$r^2ts = \frac{\sqrt{Iy.Cw}}{Sx} \quad (9)$$

Jika $Lp < Lb \leq Lr$ maka:

$$Mn = Cb\left[Mp - (Mp - 0{,}7Fy.Sx)\left(\frac{Lb-Lp}{Lr-Lp}\right)\right] \leq Mp \quad (10)$$

Jika $Lb > Lr$ maka:

$$Mn = Fcr.Sx \leq Mp \quad (11)$$

$$Fcr = \frac{Cb.\pi^2.E}{\left(\frac{Lb}{rts}\right)^2}\sqrt{1+0{,}078\left(\frac{Jc}{Sxho}\right)\left(\frac{Lb}{rts}\right)^2} \quad (12)$$

Dimana:

F_{cr} = tegangan kritis *(MPa)*
r_y = radius girasi (mm)
J = konstanta torsi (mm⁴)
C = 1 (profil I simetris ganda)
S_x = modulus penampang elastis (mm³)
h_o = jarak antara titik berat elemen sayap penampang (mm)
C_w = konstanta *warping*, untuk prohil I, $Cw = Iy\frac{ho^2}{4}$ (mm⁴)
I_y = momen inersia (mm⁴)

Analisis teoritis ini berfungsi sebagai *baseline* untuk mengevaluasi kesesuaian hasil eksperimen dan simulasi numerik serta untuk menilai tingkat konservatisme metode perhitungan yang digunakan dalam desain struktur baja.

Pemodelan Numerik Menggunakan ANSYS

Pemodelan numerik dilakukan untuk mensimulasikan perilaku struktur balok baja non-prismatik di bawah pembebanan lentur serta untuk mengevaluasi mekanisme keruntuhan yang terjadi. SNI 1729 : 2020 (AISC 2016) memberikan persamaan terbatas untuk menghitung momen kritis dalam balok non-prismatik.

Tahap awal *engineering data* dimulai dengan mendefinisikan sifat material baja menggunakan model material *nonlinier* dengan pendekatan *multilinear isotropic hardening*, sehingga kurva tegangan–regangan hasil pengujian tarik dapat diintegrasikan langsung ke dalam model. Selanjutnya tahap geometri, balok dimodelkan dalam perangkat lunak *CAD* dan kemudian diimpor ke dalam *ANSYS* dalam format *.iges*. Pada tahap

 ISSN 2987-677x

Model and Set Up, *contact body* antar elemen, jenis perletakan, dan *load step* yang akan diaplikasikan pada model disesuaikan dengan tahapan pemberian beban yang dilakukan pada saat pengujian eksperimen. Kemudian tahap *Solution and Result*, dalam tahap ini akan diperoleh *output* dari pengujian dengan *ANSYS*. Hasil simulasi berupa hubungan beban–lendutan, distribusi tegangan, serta pola deformasi dan keruntuhan yang terjadi adalah *LTB*.

Hasil Kerja

Momen kapasitas sesuai SNI 1729:2020 (AISC 2016)

Dari perhitungan teoritis persamaan (1) – (10), maka specimen termasuk penampang profil I tersusun *(built up)* dengan badan kompak, sayap kompak (F2) dengan kuat lentur M_n diambil nilai terkecil dari kondisi *Yield* dan *LTB*. Hasil perhitungan ini disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Momen Kapasitas Sesuai SNI 1729: 2020

Model	Sudut (°)	*Tapered constant (A/V)*	Mn (kNm)
1	≈ 90	0,83	4,09
3	6,42	0,88	4,92
6	5,71	0,94	5,82

Peningkatan kapasitas M_n dari model 1 ke model 3 sebesar 20,29%, dari model 3 ke model 6 sebesar 18,29% , dan dari model 1 ke model 6 adalah 42,3%

Momen Kapasitas Hasil Eksperimen

Berdasarkan data regangan dan tegangan, dihitung besarnya gaya C (*Compression*), T (*Tension*), dan jarak lengan (γ_d) sehingga momen kapasitas penampang Mn bisa dihitung. Nilai momen ini diambil pada beban ketika tegangan akan melampaui tegangan leleh material f_y = 252,24 MPa. Perhitungan Mn selanjutnya seperti ditabelkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai Momen M_n Hasil Eksperimen

Model	Sudut Ø °	*Tapered constant* (A/V)	Benda uji 1 (kNm)	Benda uji 2 (kNm)	Rata-rata (kNm)
1	≈ 90	0,83	4,06	4,32	4,19
3	6,42	0,88	4,88	4,97	4,93
6	5,71	0,94	5,40	6,47	5,93

Nilai M_n meningkat sebesar 17,66% dari mudel 1 ke model 3, dan 20,28% dari model 3 ke model 6, serta 41,53% dari model 1 ke model 6.

Momen Kapasitas Hasil Analisis Numerik

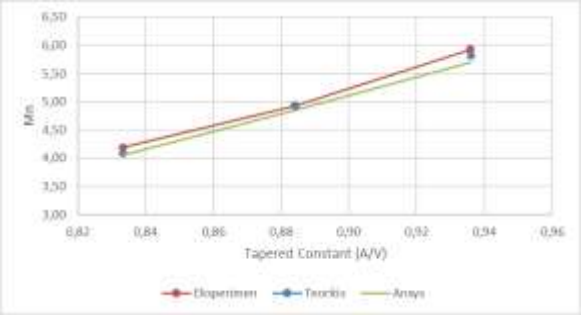
Berdasarkan kurva beban-lendutan hasil simulasi *ANSYS* dihitung nilai Mn seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Momen Kapasitas M_n Hasil Analisis *ANSYS*

Model	Sudut (°)	*Tapered constant (A/V)*	Mn (kNm)
1	≈ 90	0,83	4,05
3	6,42	0,88	4,85
6	5,71	0,94	5,70

Kapasitas momen meningkat 21,98% dari *uniform* ke *linear tapered*, 17,53% dari *linear tapered* ke *moment base tapered*, dan 40,74% dari *uniform* ke *moment base tapered*. Hasil investigasi dari tiga pendekatan ini menunjukkan korelasi yang sangat kuat antara penyelarasan geometris penampang dengan distribusi beban internal yang terjadi pada struktur, ditemukan bahwa transisi dari konfigurasi prismatik ke konfigurasi *moment-base tapered* menghasilkan peningkatan kapasitas momen nominal rata-rata sebesar 41,52%. Fenomena ini membuktikan bahwa efisiensi material dapat dicapai secara maksimal ketika geometri profil balok dikonfigurasi sedemikian rupa untuk mengikuti bentuk diagram momen *bilinear*.

Parameter *Tapered Constanta* (A/V), terbukti menjadi indikator kritis dalam menentukan efisiensi lentur balok. Hasil penelitian menunjukkan tren kenaikan kapasitas lentur yang konsisten seiring dengan meningkatnya nilai konstanta *tapered* seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Tren Kenaikan Kapasitas Lentur

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar nilai konstanta *tapered*, maka semakin tinggi pula kapasitas momen yang dapat dipikul oleh balok tersebut. Secara mekanika, rasio penampang yang lebih tinggi di lokasi momen maksimum (tengah bentang) secara efektif mendistribusikan kembali tegangan internal, sehingga material baja dapat dimanfaatkan hingga batas plastisnya tepat di titik kebutuhan puncak tanpa memerlukan penambahan berat struktur secara keseluruhan.

LTB merupakan mode keruntuhan dominan, meskipun elemen sayap dan badan telah dirancang sebagai penampang kompak untuk mencegah tekuk lokal, penambahan beban momen hingga mencapai titik kritis *(Mcr)* menyebabkan balok mengalami deformasi lateral dan rotasi puntir yang besar secara tiba-tiba. Penelitian ini mengonfirmasi bahwa meskipun proses *tapering* meningkatkan tinggi lentur efektif, penggunaan pengaku (*bracing*) untuk ketidakstabilan arah lateral menjadi aspek krusial dalam desain elemen non prismatik.

Observasi terhadap hasil pengujian laboratorium menunjukkan adanya fenomena *overstrength*, di mana kapasitas aktual balok secara konsisten berada di atas prediksi teoretis dan simulasi numerik. Kesesuaian yang sangat erat antara ANSYS dan perhitungan SNI/AISC

 ISSN 2987-677x

menegaskan keandalan analisis elemen hingga sebagai alat prediksi desain yang akurat. Model numerik terbukti mampu menangkap perilaku *inelastic* dan inisiasi tekuk dengan presisi tinggi. Hal ini memberikan dasar bagi para praktisi rekayasa untuk mengadopsi elemen *tapered* las sebagai solusi desain yang ekonomis, dengan keyakinan bahwa kapasitas strukturnya dapat diprediksi secara andal menggunakan standar yang berlaku saat ini. Pedoman SNI 1729: 2020 memberikan persamaan terbatas untuk menghitung momen kritis dalam balok non-prismatik, sehingga mengharuskan teknik pemodelan lanjutan seperti FEA.

Aspek Keberlanjutan

Penggunaan balok baja profil I non-prismatis *(tapered)* merupakan manifestasi nyata dari inovasi infrastruktur (SDG 9) dan konsumsi serta produksi yang bertanggung jawab (SDG 12). Industri baja memiliki keunggulan dalam hal keberlanjutan karena tingkat daur ulang yang sangat tinggi dibandingkan material konstruksi lainnya. Efisiensi Material secara langsung mereduksi biaya konstruksi dan meminimalisir penggunaan sumber daya alam serta menurunkan emisi gas rumah kaca selama proses produksi dan transportasi. Keberlanjutan dari sisi sosial ada pada aspek keselamatan publik melalui pemahaman mendalam terhadap fenomena LTB untuk mencegah kegagalan struktur. Integrasi antara pengujian eksperimental laboratorium dan validasi numerik dalam studi ini menunjukkan upaya sistematis untuk mencapai presisi desain yang lebih tinggi dalam menghadapi perubahan teknologi konstruksi masa depan.

Kesimpulan

Berikut adalah kesimpulan utama dari penelitian ini.

1. Kapasitas lentur balok I meningkat sering dengan bertambahnya nilai *tapered constant* (A/V). Dengan volume material yang sama, transisi dari profil *prismatic* ke profil *moment-base tapered* memberikan peningkatan kapasitas lentur tertinggi. Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi material tertinggi dicapai ketika tinggi profil maksimum (h_{max}) berada di lokasi momen maksimum.
2. Semakin kecil sudut *tapered* (geometri profil yang mendekati diagram momen), maka semakin besar kapasitas momen nominal yang dihasilkan.
3. Terdapat tren yang konsisten di mana hasil pengujian eksperimen lebih tinggi dibandingkan perhitungan teoretis (SNI 03-1729-2020)

Temuan ini memberikan dasar ilmiah yang kuat bagi praktisi rekayasa untuk mengadopsi elemen *tapered* sebagai solusi desain yang lebih ekonomis dan ringan tanpa mengurangi integritas structural. Penelitian ini merekomendasikan perlunya integrasi kekangan lateral *(lateral bracing)* yang lebih detail dalam studi selanjutnya untuk memitigasi risiko *LTB* secara lebih efektif pada balok non-prismatis.

Ucapan Terimakasih

Disampaikan terimakasih kepada Universitas Hasyim Asy'ari Tebuireng Jombang yang telah memberikan dukungan, rekan-rekan dosen Fakultas Teknik, program studi Teknik Sipil, dan dosen pembimbing serta Civitas Akademika PSPI Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya.

Referensi

Arifi, E., & Setyowulan, D. (2020). *Perencanaan Struktur baja (Berdasarkan SNI 1729:2020)*. UB Press.

Badan Standardisasi Nasional. (2020). Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural (ANSI/AISC 360-16,IDT). In *Sni 1729-2020* (Issue 8).

De'nan, F., Hashim, N. S., & Kuan, L. C. (2019). The Structural Efficiency of Tapered Steel Section with Perforation under Lateral Torsional Buckling Behaviour. *World Journal of Engineering*, *17*(6), 1–21. https://doi.org/10.1108/WJE-07-2019-0189

Dogariu, A. I., Crișan, A., Cristuțiu, M., Nunes, D. L., & Juca, A. (2017). *Behavior of Steel Welded Tapered Beam-column*. *40*(0), 345–357. https://doi.org/10.2174/1874149501711010345

Doksanovic, T., Raic, I., & Biservic, B. (2023). Buckling Resistance Resistance of of Tapered Steel Columns. *Applied Sciences MDPI*, *13*(11498), 29.

Lebastard, M., Bureau, A., & Hjiaj, M. (2024). *Lateral-torsional buckling of uniform and tapered welded I-section beams*. *303*(December 2023). https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117301

Mariappan, S., Somasundaram, K., Muthusamy, S., Sivasubramani, D. N., Suprakash, A. S., & Kothandapani, K. (2023). Lateral-Torsional Buckling of Non-Prismatic I-beams with and without Girders : Linear Analytical and Elastic FEM Approaches. *MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA). 29*(3), 397–402.

 ISSN 2987-677x

Tinjauan Daya Dukung Tanah Pada Ruas Jalan Air Besar Desa Batu Merah – Desa Rutong, Kota Ambon

Mansye Ronal Ayal[1,2] Hartono Pranjoto[1] Ritsabela Laisina[2] Felix Taihuttu[1,2] Meidy Kempa[1,2]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pattimura Ambon

✉ andremonta82@gmail.com

Daya dukung tanah merupakan salah satu faktor penting dalam perencanaan pembangunan jalan yang diperlukan untuk menentukan indeks tebal perkerasan jalan yang akan dibangun. Tanah yang memiki daya dukung rendah dapat menyebabkan retak, penurunan tanah, kerusakan pada bangunan disekitar jalan bahkan longsor. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sifat fisik dan daya dukung tanah pada area pengembangan jalan di Desa Batu Merah, Ambon yaitu ruas Jl. Air Besar – Desa Rutong Kota Ambon. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen dengan menggunakan sampel tanah terganggu yang meliputi pengujian kadar air, berat isi, berat jenis, batas-batas atterberg, analisa saringan, pemadatan standard proctor, CBR soaked. Berdasarkan klasifikasi AASHTO, sampel tanah AR1 termasuk pada kelompok A-1-b yang berjenis pecahan batu kerikil dan pasir. Untuk sampel AR2, AR5, AR6, dan AR7 dikategorikan secara berturut-turut yaitu A-2-7, A-2-4, A-2-7, A-2-5, dan A-2-7 termasuk dalam fraksi kerikil dan pasir yang berlanau dan berlempung dengan kondisi tanah sangat baik hingga baik. Sampel AR3 dan AR4 termasuk dalam fraksi pasir halus dan digolongkan ke jenis A-3. Merujuk dari hasil pengujian CBR rendam, semua sampel memiliki daya dukung tanah yang tergolong baik dengan nilai CBR > 6% dan nilai DDT > 8 maka tanah tersebut memenuhi spesifikasi sebagai *subgrade* perkerasan jalan.

Kata kunci: daya dukung, fraksi, *subgrade*, gradasi

Pendahuluan

Tanah diartikan sebagai substansi yang terdiri dari kumpulan mineral padat yang tidak saling terikat secara kimia, serta bahan organik yang telah terurai, cairan, dan gas yang mengisi celah-celah di antara partikel-partikel tersebut (Jumbri et al., 2025). Dalam konstruksi jalan dikenal istilah lapisan tanah dasar atau *subgrade* yaitu lapisan tanah paling bawah pada suatu struktur perkerasan jalan yang berfungsi sebagai pondasi untuk mendukung lapisan perkerasan di atasnya. Lapis tanah dasar dapat berupa tanah asli yang dipadatkan jika tanah aslinya baik, tanah yang didatangkan dari tempat lain dan dipadatkan atau tanah yang distabilisasi dengan kapur atau bahan lainnya (Akbar & Wesli, 2014).

Kondisi tanah dasar sangat mempengaruhi kualitas jalan. Jika daya dukung tanah dasar rendah maka perkerasan jalan akan lebih mudah mengalami kerusakan seperti retak, amblas atau bergelombang. Daya dukung tanah dasar merupakan kemampuan tanah dalam menahan beban struktur di atasnya tanpa mengakibatkan terjadi keruntuhan geser. Daya dukung tanah dasar akan sangat mempengaruhi kualitas jalan secara keseluruhan karena lapisan struktur perkerasan jalan diletakan tepat di atas lapisan tanah dasar. Fungsi tanah dasar adalah menerima tekanan akibat beban lalu lintas yang ada diatasnya oleh karena itu tanah dasar harus mempunyai kapasitas daya dukung yang optimal sehingga mampu menerima gaya akibat beban lalu lintas tanpa mengalami kerusakan (Amran & Surandono, 2017).

Kekuatan kontruksi sebuah perkerasan jalan sangat ditentukan dari besaran nilai daya dukung tanah di mana konstruksi itu diletakkan. Semakin baik nilai daya dukung tanah maka semakin baik pula ketahanan (kekokohan/kestabilan) dari konstruksi tersebut. (Clinton & Budiarnaya, 2020). Ketersediaan akses jalan yang memadai menjadi salah satu faktor penting dalam menunjang aktivitas transportasi dan distribusi di suatu kawasan. Desa Batu Merah Ambon merupakan salah satu kawasan yang sedang berada dalam masa pengembangan kawasan. Salah satu pengembangan kawasannya yaitu pembuatan akses jalan dari daerah Air Besar ke Desa Rutong begitu juga sebaliknya yang diharapkan nantinya dapat berfungsi mempercepat akses perjalanan dari dan ke kota.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Ruas jalan (ditandai dengan garis putus-putus pada peta di atas) saat dilakukan survei saat itu masih dalam tahapan pembersihan sehingga masih merupakan jalan tanah yang rencananya akan dibuat konstruksi

 ISSN 2987-677x

perkerasan di atasnya. Dalam kondisi seperti ini, sangat baik jika dilakukan penyelidikan tanah untuk mengetahui karakter fisik dan mekanis tanah dasar sebelum dilakukan pembangunan perkerasan jalan baru.



Gambar 2. Kondisi Jalan yang Diteliti

Penelitian ini dilakukan pada area jalan yang masih berupa jalan tanah dan belum ada perkerasan (terlihat pada Gambar 2) dan data yang diambil dengan beberapa batasan seperti jumlah titik pengambilan sampel. Penentuan titik pengambilan sampel dimulai dari kawasan Air Besar sepanjang 185 meter ke arah Desa Rutong sebanyak 8 titik dengan titik koordinat sebagai berikut :

- AR1 (3°41’24” S 128°13’25” E)
- AR2 (3°41’23” S 128°13’26” E)
- AR3 (3°41’22” S 128°13’27” E)
- AR4 (3°41’22” S 128°13’29” E)
- AR5(3°41’22” S 128°13’30” E)
- AR6 (3°41’23” S 128°13’32” E)
- AR7 (3°41’24” S 128°13’33” E)
- AR8 (3°41’25” S 128°13’34” E)

Penelitian ini juga mendukung *Sustainable Development Goals* (SGDs) khususnya SDG 9 tentang infrastruktur jalan yang andal dan SDG 11 tentang pengembangan sistem transportasi dan fasilitas publik berkelanjutan. Pembangunan berkelanjutan dimaksudkan untuk memenuhi kebutuhan pada saat ini dan masa mendatang. Jalan sebagai bagian pembangunan dinyatakan pula agar direncanakan dan dilaksanakan dengan memerhatikan prinsip-prinsip berkelanjutan, sesuai dengan Permen PU Nomor 05/PRT/M/2012 (Lawalata, 2019).

Metode

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimental dan berdasarkan pada metode Bina Marga. Pengujian dilakukan di Laboratorium Balai Pelaksana Jalan Nasional Maluku dengan pengujian yang dilakukan antara :

- Kadar Air (SNI 1965 - 2008)
- Berat Isi (SNI 03-3637-1994)
- Berat Jenis (SNI 1964 - 2008)
- Analisa Ayakan (SNI 3423 - 2008)
- *Atterberg Limit* (SNI 1967 - 2008) untuk batas cair dan (SNI 1966 - 2008) untuk batas plastis
- Pemadatan tipe proctor (SNI 03-1742-1989)
- CBR (SNI 03-1744-1989)

Untuk klasifikasi jenis tanah digunakan sistem klasisfikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). AASHTO lebih sering digunakan dalam bidang perkerasan jalan, dengan mempertimbangkan karakteristik tanah dasar terhadapdaya dukung dan kestabilan, sehingga sangat relevan untuk studi geoteknik di lapangan yang melibatkan pekerjaan infrastruktur transportasi (Sabilla et al., 2025). Sistem Klasifkasi ASSTHO berguna untuk menentukan kualitas tanah guna pekerjaan jalan, yaitu lapis dasar (*sub-base*) dan tanah dasar (*subgrade*).

Sistem klasifikasi AASTHO membagi tanah ke dalam 7 kelompok utama, yaitu A-1 sampai dengan A-7. Tanah berbutir yang 35 % atau kurang dari jumlah butiran tanah tersebut lolos ayakan No.200 diklasifikasikan ke dalam kelompok A-1, A-2, dan A-3. Tanah berbutir yang lebih dari 35 % butiran tanah tersebut lolos ayakan No. 200 diklasifikasikan ke dalam kelompok A-4, A-5 A-6, dan A-7 (Amran & Prasetyo, 2022). Tujuan dari klasifikasi ini adalah untuk mengetahui dan mengelompokkan tanah berdasarkan sifat dan karakteristiknya sehingga dapat diketahui perilaku tanah tersebut layak dari segi mutu sebagai lapisan tanah dasar (*subgrade*) perkerasan jalan.

Hasil Kerja

Pengujian Kadar Air

Pengujian kadar air ini dilakukan untuk mencari berapa persen kandungan air yang ada dalam tanah. Kemudian untuk mendapatkan hasil atau nilai kadar air tanah, digunakan 2 sampel lalu di oven hingga kering dan diambil nilai rata-ratanya. Berikut adalah hasil pengujian kadar air yang disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 1. Hasil Pengujian Kadar Air

Sampel	Kadar Air (%)
AR1	31.01
AR2	25.39
AR3	26.30
AR4	28.21
AR5	31.36
AR6	32.06
AR7	34.68
AR8	46.88

Pengujian Berat Isi

Dari hasi pengujian diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 2 Hasil Pengujian Berat Isi

Sampel	Berat Isi (gr/ cm^3)
AR1	1.66
AR2	1.72
AR3	1.70
AR4	1.63
AR5	1.64
AR6	1.69
AR7	1.59
AR8	1.57

Pengujian Berat Jenis

Dari hasil pengujian berat jenis tanah menggunakan piknometer, diperoleh data sebagai berikut:

 ISSN 2987-677x

Tabel 3. Hasil Pengujian Berat Jenis

Sampel	Berat Jenis
AR1	2.24
AR2	2.33
AR3	1.48
AR4	2.15
AR5	2.10
AR6	2.58
AR7	2.18
AR8	1.99

Jenis tanah berdasarkan berat jenis menurut Bowles (2012), sampel AR1, AR2, AR4, AR5, AR7, dan AR8 dapat dikategorikan bukan sebagai butiran kerikil, pasir, maupun lempung atau dapat dikategorikan sebagai jenis tanah organik. Sampel AR3 dapat dikategorikan sebagai jenis tanah gambut. Sedangkan untuk sampel AR6 memiliki nilai 2.58 yang dikategorikan sebagai jenis tanah lempung organik.

Pengujian *Atterberg Limit*

Pengujian batas cair dan plastis menggunakan tanah kering pada suhu 105oC dan disaring menggunakan saringan nomor 40. Untuk pengujian batas cair diambil nilai kadar air pada ketukan ke-25. Sedangkan untuk pengujian batas plastis dilakukan dengan menggulung tanah mencapai 3 mm sampai terjadi keretakan. Indeks Plastisitas (IP) dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$IP\ (\%) = LL - PL$$

Hasil pengujian batas *atterberg* dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4. Hasil Pengujian *Atterberg Limit*

Sampel	LL (%)	PL (%)	IP(%)
AR1	34.27	32.35	1.92
AR2	34.94	28.57	6.37
AR3	25.77	NP	NP
AR4	18.12	NP	NP
AR5	41.46	28.57	12.89
AR6	55.97	45.83	10.14
AR7	52.32	35.71	16.60
AR8	55.44	43.48	11.96

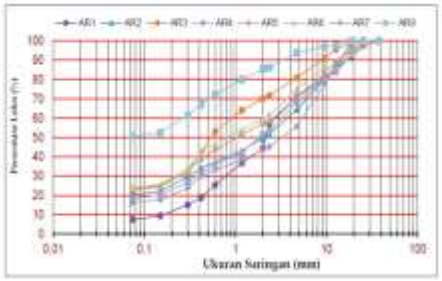
Sampel AR3 dan AR4 termasuk jenis tanah pasir dengan sifat non-plastis dan non-kohesif. Sampel AR1 memiliki sifat plastis rendah dengan jenis tanah lanau. Sampel AR2, AR5, AR6, AR7, dan AR8 termasuk jenis tanah lempung berlanau dengan plastisitas sedang.

Pengujian Analisa Ayakan

Analsis ayakan ini bertujuan untuk mengetahui distribusi ukuran butir (gradasi) dari sampel tanah yang diuji. Hasil pengujian untuk 8 tiitik sampel tanah ini dapat dilihat pada gambar berikut :

Tabel 5. Hasil Analisis Saringan

Sampel	No. Saringan	Persen Tertahan	Persen Lolos
AR1	#4	28.96	71.04
	#10	55.82	44.18
	#40	81.17	18.84
	#200	92.53	7.47
AR2	#4	38.42	61.58
	#10	50.41	49.59
	#40	66.05	33.95
	#200	79.72	20.28
AR3	#4	19.12	80.88
	#10	29.98	70.02
	#40	57.97	42.03
	#200	77.49	22.51
AR4	#4	28.73	68.27
	#10	48.49	51.51
	#40	66.41	33.59
	#200	81.84	18.16
AR5	#4	28.94	71.06
	#10	42.92	57.08
	#40	61.27	38.73
	#200	76.58	23.42
AR6	#4	25.01	74.99
	#10	40.19	59.81
	#40	57.76	42.24
	#200	75.91	24.09
AR7	#4	44.27	55.73
	#10	56.67	43.33
	#40	70.03	29.97
	#200	83.80	16.20
AR8	#4	6.26	93.74
	#10	14.85	85.15
	#40	33.05	66.95
	#200	49.41	50.59



Gambar 3. Grafik Distribusi Ukuran Butir Tanah

Secara umum grafik distribusi ukuran butir dan hasil uji analisa saringan memperlihatkan distribusi ukuran butir yang cukup baik karena kurva yang naik secara bertahap dan tidak terlalu tegak. Dari grafik distribusi ukuran butir tersebut menunjukkan bahwa sampel AR8 cenderung lebih halus dibandingkan dengan sampel tanah lainnya karena memiliki presentase lolos yang lebih tinggi pada saringan nomor #200 dibandingkan dengan sampel AR1 yang cenderung lebih kasar. Berdasarkan sistem klasifikasi AASTHO dan grafik analisa saringan di atas, sampel tanah AR1 termasuk pada kelompok A-1-b yang berjenis pecahan batu kerikil dan pasir. Untuk sampel AR2, AR5, AR6, dan AR7 dikategorikan secara berturut-turut yaitu A-2-7, A-2-4, A-2-7, A-2-5, dan A-2-7 termasuk dalam fraksi kerikil dan pasir yang berlanau dan berlempung dengan kondisi tanah sangat baik hingga baik. Sampel AR3 dan AR4 dikategorikan kelompok A-3 termasuk fraksi pasir halus dengan kondisi tanah sangat baik hingga baik.

Pengujian Pemadatan Tanah

Tujuan dari uji pemadatan ini untuk menentukan hubungan antara kadar air optimum (OMC) dengan berat isi kering tanah maksimum sebagai dasar pengendali mutu pemadatan di lapangan. Berikut ini merupakan hasil pengujian standar *proctor* untuk mengetahui nilai kadar air optimum dan berat isi kering maksimum untuk dilanjutkan dengan pengujian CBR.

Tabel 6. Hasil Pengujian Pemadatan Standar Proctor

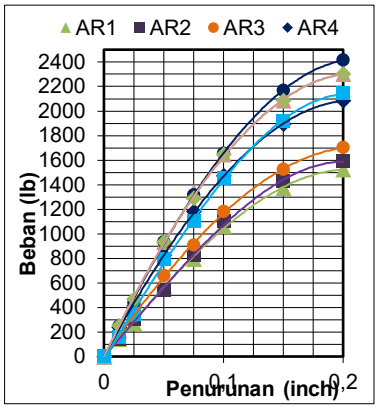
Sampel	W_{opt} (%)	γ_d maks (gr/cm^3)
AR1	14.15	1.76
AR2	9.90	1.74
AR3	7.44	1.60
AR4	18.55	1.64
AR5	18.38	1.50
AR6	18.27	1.43
AR7	16.28	1.47
AR8	17.23	1.26

 ISSN 2987-677x

Bila kadar air ditingkatkan terus secara bertahap pada usaha pemadatan yang sama, maka berat dari jumlah bahan padat dalam tanah persatuan volume meningkat secara bertahap. Namun setelah mencapai kadar air tertentu (kadar air optimum), adanya penambahan air akan menurunkan berat volume kering dari tanah. Hal ini disebabkan karena air tersebut menempati rongga pori dalam tanah yang seharusnya ditempati oleh butir-butir padat dari tanah.

Pengujian CBR *Soaked* (Rendam)

Untuk pengujian CBR rendam dilakukan perendaman selama 4 x 24 jam sesuai SNI 03-1744-1989. Pada pengujian ini, pembebanan dilakukan secara teratur hingga kecepatan penetrasi mendekati 1.27 mm (0.005 inc). Pembacaan pembebanan dilakukan pada interval penetrasi 0.025 inch hingga mencapai penetrasi 0.2 inch. Dengan menggunakan grafik yang telah dibuat, nilai CBR dihitung dengan cara membagi masing-masing beban dengan standar CBR pada penetrasi 0.1" dengan beban standar 70.31 kg (3000 psi), penetrasi 0.2" dengan beban standar 105.47 kg (4500 psi) dan hasil dari pembagian beban standar CBR dinyatakan dalam persen (%).



Gambar 4. Grafik CBR

Dengan menggunakan rumus:

$$CBR = \frac{Beban\ Terkoreksi}{Beban\ Standar} \times 100\ \%$$

diperoleh hasil seperti tabel berikut :

Tabel 6. Hasil Pengujian CBR Rendam

Sampel	CBR (%)
AR1	35.47
AR2	36.57
AR3	39.31
AR4	49.00
AR5	54.85
AR6	55.22
AR7	54.85
AR8	48.45

Daya Dukung Tanah Dasar

Dengan menggunakan rumus DDT = 4,3 log CBR + 1,7 (Sukirman, 1999) menggunakan data CBR yang telah didapat sebelumnya, maka diperoleh hasil sebagai berikut :

Tabel 7. Hasil Perhitungan Daya Dukung Tanah

Sampel	DDT
AR1	8.36
AR2	8.42
AR3	8.54
AR4	8.96
AR5	9.18
AR6	9.18
AR7	9.18
AR8	8.96

Dari tabel di atas dapat dilihat nilai DDT > 6 yaitu berkisar antara 8 sampai 9 maka tanah tersebut dapat digolongkan ke dalam kondisi sangat baik (tanah kuat dan stabil).

Kesimpulan

Berdasarkan hasil konversi nilai CBR ke DDT, dapat disimpulkan bahwa sampel tanah AR1, AR2, AR3, AR4, AR5, AR6, AR7, dan AR8 Jalan Air Besar-Rutong memiliki nilai daya dukung tanah yang tergolong baik serta memenuhi syarat spesifikasi Bina Marga untuk digunakan sebagai *subgrade* pada perkerasan jalan.

Ucapan Terimakasih

Dalam penyelesaian artikel ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada Ritsabela Laisina, S.T yang bersama penulis melakukan penelitian ini dan juga kepada Pembimbing penulisan artikel Bapak Ir. Hartono Pranjoto, B.Sc., M.Sc.,Ph.D., IPU., ASEAN Eng., ACPE. Ucapan yang sama juga penulis sampaikan untuk Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya.

Referensi

Akbar, S. J., & Wesli. (2014). *Studi Korelasi daya dukung tanah dengan indek tebal perkerasan jalan menggunakan metode Bina Marga*, *4*(1), 61–70.

Amran, Y., & Prasetyo, A. (2022). *Analisis Stabilisasi daya dukung tanah dasar menggunakan campuran arang kayu dan sulfur (studi kasus pada tanah lempung berpasir)*, *12*(1), 79–93.

Amran, Y., & Surandono, A. (2017). *Analisa daya dukung tanah (DDT) pada subgrade/tanah dasar (studi kasus ruas Jalan Ki Hajar Dewantara, 38 B Banjar Rejo Lampung Timur-Batas Kota Metro)*, *7*(1), 1–6.

Clinton, R., & Budiarnaya, P. (2020). *Analisis Pengaruh Daya Dukung Tanah Terhadap Indek Tebal Perkerasan Jalan Menggunakan*. *3*(1), 42–48.

Jumbri, I., Kalalimbong, A., & Ayal, M. R. (2025). *Identifikasi Karakteristik Tanah Pada Ruas Jalan Laha – Negeri Lima Pulau Ambon*, *6141*(14).

Lawalata, G. M. (2019). *Penetapan indikator jalan berkelanjutan*, *5*(2), 97–108.

Sabilla, A., Sitti, C., & Hildayani, R. (2025). *Klasifikasi tanah lempung berdasarkan sistem uscs (unified soil classification system) dan Aashto (American Association of State Highway and Transportation Officials)*. *4*, 737–745.

 ISSN 2987-677x

Desain dan Implementasi *Smart Monitoring System* Berbasis IoT untuk Pemantauan Sistem Energi Terbarukan Secara *Real-Time*

Diana Alia[1,2] Henna Nurdian Sari[1,2] Dian Arisusanty[1,3] Tegar[2]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2] Program Studi Teknologi Rekayasa Kelistrikan Kapal, Politeknik Pelayaran Surabaya

[3] Program Studi Transportasi Laut, Politeknik Pelayaran Surabaya

✉ diana.alia@poltekpel-sby.ac.id

Integrasi sistem *hybrid* energi terbarukan, khususnya sumber fotovoltaik surya (PV) dan turbin angin, memiliki tantangan signifikan dalam pemantauan waktu nyata dan keandalan komunikasi. Studi ini mengusulkan sistem pemantauan *real-time* berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk sistem *hybrid* energi surya-angin, dengan fokus pada evaluasi kinerja energi dan kualitas layanan (QoS) komunikasi. Sistem ini menggunakan mikrokontroler NodeMCU ESP8266 dan sensor INA219 untuk mengukur parameter tegangan dan arus, memungkinkan pemantauan berkelanjutan terhadap pembangkitan energi, penyimpanan, dan konsumsi beban. Data ditransmisikan ke *platform* berbasis *cloud* untuk visualisasi dan analisis waktu nyata. Validasi eksperimental dilakukan dalam kondisi dunia nyata dengan jarak transmisi 1–5 km di lingkungan *non-Line of Sight* (NLOS). Parameter QoS utama, termasuk laju unggah, latensi, laju bit, *Signal to Noise Ratio* (SNR), dan *Bit Error Rate* (BER), dianalisis untuk mengevaluasi kinerja komunikasi. Hasil penelitian menunjukkan rata-rata kecepatan unggah 4,93 KBps, latensi 8,72 s, laju bit 39,41 kbps, SNR 24,89 dB, dan BER 0,038%. Hubungan terbalik yang kuat antara SNR dan BER diamati, konsisten dengan model BPSK teoretis. Berbeda dengan sistem pemantauan berbasis IoT yang ada, penelitian ini mengintegrasikan evaluasi kinerja energi hibrida dengan analisis keandalan komunikasi berbasis QoS dalam kondisi NLOS yang realistis. Penyimpangan antara BER teoretis dan eksperimental dievaluasi menggunakan RMSE, yang mengkonfirmasi kesesuaian yang kuat antara hasil analitis dan terukur. Temuan ini menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan cocok untuk aplikasi pemantauan *real-time* lunak dan menyediakan kerangka kerja yang kuat untuk sistem energi terbarukan yang sadar QoS..

Kata kunci: IoT, *hybrid renewable energy, solar–wind system, real-time monitoring*, QoS, SNR, BER

Pendahuluan

Pertumbuhan pesat permintaan energi global dan kekhawatiran lingkungan telah mempercepat adopsi teknologi energi terbarukan, khususnya sistem hibrida yang menggabungkan *Photovoltage* (PV) dan turbin angin. Sistem energi terbarukan hibrida menawarkan peningkatan keandalan dan efisiensi dengan mengurangi intermitensi sumber energi individual (Ibrahim, 2024; Roy et al., 2022). Namun, integrasinya menghadirkan tantangan signifikan dalam pemantauan sistem, manajemen energi, dan keandalan operasional, terutama di lingkungan terdistribusi dan terpencil di mana pengawasan waktu nyata sangat penting (Carrasco et al., 2006; Espitia et al., 2020). Pemantauan parameter listrik yang akurat seperti tegangan dan arus sangat penting untuk memastikan kinerja sistem yang optimal, mencegah degradasi baterai, dan memperpanjang umur sistem (Chaabane et al., 2019; Jordan & Kurtz, 2013).

Kemunculan *Internet of Things* (IoT) telah memungkinkan kemampuan pemantauan canggih melalui akuisisi data waktu nyata, akses jarak jauh, dan analitik berbasis *cloud* (Al-Fuqaha et al., 2015; Li et al., 2015; Zanella et al., 2014). Studi sebelumnya telah menunjukkan efektivitas sistem pemantauan berbasis IoT dalam aplikasi PV surya, energi angin, dan energi terbarukan hibrida, meningkatkan efisiensi operasional dan deteksi kesalahan (Asnil et al., 2023; Rouibah et al., 2025; Shukla et al., 2026). Selain itu, jaringan sensor nirkabel (WSN) telah banyak digunakan untuk mendukung infrastruktur pemantauan terdistribusi (Hosseini Dehshiri, 2025; Vairavasundaram et al., 2024). Karya-karya terbaru telah mengeksplorasi kerangka kerja pemantauan hibrida yang mengintegrasikan beberapa sumber energi ke dalam *platform* terpadu, memungkinkan pelacakan berkelanjutan terhadap pembangkitan, penyimpanan, dan konsumsi energi (Eva et al., 2026; Jia et al., 2024).

Terlepas dari kemajuan ini, sebagian besar studi yang ada terutama berfokus pada pemantauan tingkat sistem dan visualisasi data, dengan perhatian terbatas pada keandalan komunikasi dan kinerja jaringan. Dalam penerapan di dunia nyata, terutama di lingkungan semi-perkotaan dan terpencil, komunikasi nirkabel sangat

 ISSN 2987-677x

dipengaruhi oleh kondisi non-garis pandang (NLOS), interferensi lingkungan, dan pelemahan sinyal (Bi et al., 2016; Jurasz et al., 2020). Faktor-faktor ini menyebabkan peningkatan latensi, penurunan *throughput*, dan tingkat kesalahan bit yang lebih tinggi, yang secara langsung berdampak pada keandalan sistem pemantauan. Metrik kualitas sinyal seperti rasio sinyal terhadap derau (SNR) dan tingkat kesalahan bit (BER) merupakan indikator penting untuk mengevaluasi kinerja komunikasi dan memastikan integritas data dalam sistem IoT (Arnon, 2015; *CommuniCation*, n.d.; etsi.org, 1999; Haoxing & System, n.d.) Oleh karena itu, mengintegrasikan analisis kualitas layanan (QoS) ke dalam sistem pemantauan energi terbarukan sangat penting untuk operasi waktu nyata yang andal.

Studi-studi terbaru telah mulai membahas pemantauan berbasis IoT dalam sistem energi terbarukan dengan fitur tambahan seperti analisis kualitas daya, transmisi data yang aman, dan pemrosesan data cerdas (Boucif et al., 2025; Hafidz et al., 2023; Rahman et al., 2024). Namun, karya-karya ini masih menunjukkan beberapa keterbatasan. Sebagian besar berfokus pada pemantauan sistem energi atau aspek komunikasi secara independen, tanpa menyediakan kerangka kerja terpadu yang mengevaluasi keduanya secara bersamaan. Selain itu, perhatian yang terbatas telah diberikan pada kinerja komunikasi dalam kondisi penyebaran yang realistis, seperti transmisi jarak jauh dan lingkungan NLOS. Akibatnya, interaksi antara kualitas sinyal dan keandalan pemantauan masih belum cukup dieksplorasi.

Tidak seperti studi pemantauan energi terbarukan berbasis IoT baru-baru ini (Boucif et al., 2025; Hafidz et al., 2023; Rahman et al., 2024), yang terutama berfokus pada integrasi sistem, keamanan, atau analitik data, karya ini secara unik mengatasi kesenjangan kritis keandalan komunikasi dengan mengintegrasikan pemantauan energi hibrida waktu nyata dengan analisis QoS komprehensif (SNR, BER, latensi, dan *throughput*) dalam kondisi NLOS dunia nyata. Studi ini memajukan teknologi terkini dengan menjembatani kesenjangan antara pemantauan energi dan kinerja komunikasi, menyediakan kerangka kerja pemantauan hibrida surya-angin yang sadar QoS dan tervalidasi secara eksperimental untuk penyebaran jarak jauh.

Untuk mengatasi tantangan ini, studi ini mengusulkan sistem pemantauan waktu nyata berbasis IoT untuk sistem energi hibrida surya-angin. Sistem ini mengintegrasikan mikrokontroler NodeMCU ESP8266 dan sensor INA219 untuk pengukuran tegangan dan arus yang akurat, sementara *platform* berbasis *cloud* memungkinkan visualisasi dan analisis waktu nyata. Kerangka kerja yang diusulkan mengevaluasi kinerja energi dan keandalan komunikasi melalui metrik QoS komprehensif, termasuk SNR, BER, latensi, dan throughput, pada jarak transmisi hingga 5 km dalam kondisi NLOS.

Metode

Sistem yang diusulkan mengintegrasikan sumber energi terbarukan hibrida yang terdiri dari panel fotovoltaik (PV) surya dan turbin angin, yang dipadukan dengan kerangka kerja pemantauan berbasis IoT. Parameter listrik diukur menggunakan sensor INA219, sementara mikrokontroler NodeMCU ESP8266 menangani akuisisi data dan transmisi nirkabel. Data yang dikumpulkan ditransmisikan ke *platform* berbasis *cloud* untuk visualisasi dan analisis waktu nyata.

Arsitektur sistem dapat direpresentasikan secara matematis sebagai model multi-lapisan:

- *Energy Layer* (E) : pembangkitan, penyimpanan, dan beban
- *Sensing Layer* (S): akuisisi tegangan dan arus
- *Communication Layer* (C): transmisi data nirkabel
- *Application Layer* (A): visualisasi *cloud*

$$S_{system} = \{E, S, C, A\}$$

Untuk mengevaluasi keandalan sistem komunikasi IoT, beberapa parameter QoS didefinisikan:

1. ***Throughput* (T):**

$$T = \frac{D}{t}$$

Dimana D adalah data yang terkirim (bit) dan t adalah waktu transmisi data (s).

2. ***Latency* (L):**

$$L = t_{receive} - t_{send}$$

3. ***Packet Error Approximation* (from BER):**

$$PER \approx 1 - (1 - BER)^n$$

Dimana n adalah jumlah bit per paket

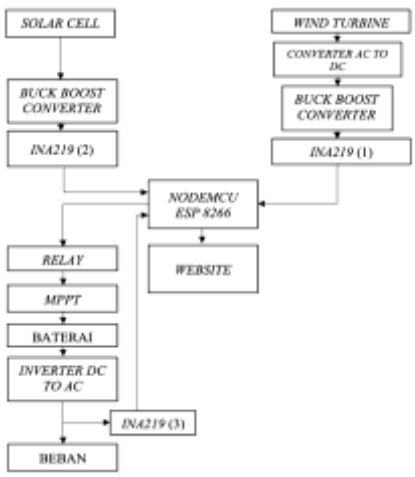
4. ***Equation Model (SNR–BER Relationship)*:**

$$BER = Q\sqrt{2 \times SNR}$$

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10}(SNR)$$

5. ***Root Mean Square Error***

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(BER_{exp,i} - BER_{theory,i})^2}$$



Gambar 1. Contoh Gambar

 ISSN 2987-677x

Hasil Kerja

Web Testing

Hasil kerja menjelaskan hasil-hasil yang telah dilakukan oleh penulis. Penulis dapat mengaitkan hasil kerja yang didapat dengan teori dan keilmuwan yang telah telah diperoleh Pengujian difokuskan pada fungsionalitas antarmuka pemantauan, terutama tampilan dan fitur pada dasbor. Dasbor menyediakan ringkasan data dan informasi waktu nyata dari seluruh sistem energi terbarukan hibrida, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. Pengujian difokuskan pada fungsionalitas antarmuka pemantauan, terutama tampilan dan fitur pada dasbor. Dasbor menyediakan ringkasan data dan informasi waktu nyata dari seluruh sistem energi terbarukan hibrida, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.

Kapasitas penyimpanan *cloud* dari *platform* pemantauan web memiliki kapasitas penyimpanan data 24 jam, karena penyimpanan yang berlebihan dapat menyebabkan pembaruan web yang berkepanjangan. Dasbor pemantauan dibagi menjadi beberapa bagian utama, masing-masing dengan fungsi spesifik untuk memfasilitasi pemantauan sistem. Bagian-bagian ini dijelaskan lebih lanjut sebagai berikut:

1. Status Sistem
   Bagian "Status Sistem" pada dasbor, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4, memberikan informasi penting mengenai kondisi umum sistem. Ini termasuk:
   a. Status Koneksi Beban: Menunjukkan apakah sistem terhubung ke beban, seperti yang ditunjukkan oleh indikator "*Solar & Battery*", yang menunjukkan sumber energi mana yang saat ini memasok beban.
   b. Status Baterai: Menampilkan tegangan baterai aktual dari Panel Surya dan Turbin Angin dalam Volt (V), memberikan informasi penting mengenai tingkat pengisian daya dan kesehatan baterai.
   c. Daya Total: Menunjukkan total daya yang dihasilkan oleh sistem secara keseluruhan dalam *Watt* (W), serta rincian daya keluaran dari setiap sumber (Panel Surya dan Turbin Angin).
2. Data Sel Surya dan Turbin Angin Waktu Nyata
   Bagian ini menampilkan parameter utama untuk setiap sumber energi secara terpisah dan secara waktu nyata. Gambar 5 menunjukkan tampilan detail untuk Sel Surya dan Turbin Angin, termasuk:
   a. Tegangan (V): Menunjukkan tegangan keluaran dari setiap sumber.
   b. Arus (A): Menunjukkan arus keluaran dari setiap sumber.
   c. Tegangan Pengisian (V): Menunjukkan tegangan pengisian baterai dari setiap sumber.
   d. Arus Pengisian (A): Menunjukkan arus pengisian baterai dari setiap sumber. Informasi ini penting untuk memantau kinerja pengisian daya dari setiap sumber.



Gambar 2. Contoh gambar

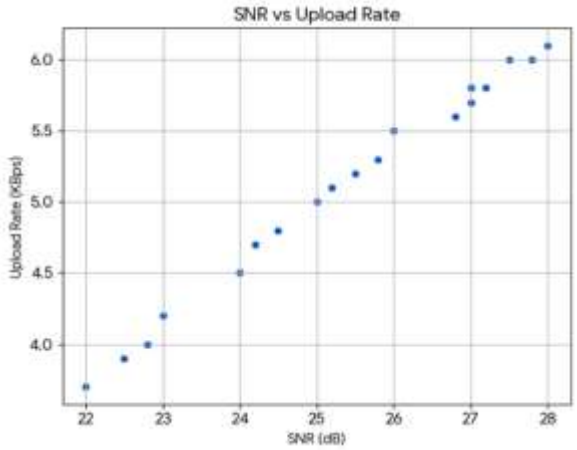
Kinerja sistem pemantauan tegangan dan arus berbasis IoT yang diusulkan dievaluasi dalam skenario dunia nyata dengan jarak transmisi mulai dari 1 hingga 5 km. Lingkungan pengujian mencakup kondisi non-garis pandang (NLOS) dengan berbagai hambatan seperti pohon dan bangunan. Parameter kunci yang diukur meliputi Ukuran Data, Laju Unggah, Latensi (Kecepatan Unggah), Laju Bit, Rasio Sinyal terhadap Derau (SNR), dan Tingkat Kesalahan Bit (BER).

Hasilnya menunjukkan korelasi negatif yang kuat antara SNR dan BER. Seperti yang diharapkan, nilai SNR yang lebih tinggi (di atas 25 dB) sesuai dengan kesalahan bit minimal. Sebaliknya, kekuatan sinyal menurun karena jarak atau hambatan. Terlepas dari fluktuasi kualitas sinyal yang disebabkan oleh hambatan, BER maksimum yang tercatat tetap di bawah 0,1%. Ini menunjukkan bahwa skema modulasi yang digunakan dalam sistem cukup kuat untuk menjaga integritas data untuk telemetri tegangan dan arus, di mana presisi data sangat penting.

Sistem ini mencapai kecepatan bit rata-rata sekitar 40,8 kbps, dengan kecepatan unggah yang berfluktuasi antara 4,0 dan 6,0 KBps. Gambar 3 menunjukkan ketergantungan *throughput* pada SNR. Analisis regresi linier mengkonfirmasi bahwa kualitas sinyal secara langsung memengaruhi kecepatan data efektif. Untuk ukuran *payload* 42 KB (mewakili data sensor yang diagregasi), pemanfaatan *bandwidth* efisien untuk protokol yang diimplementasikan. Penundaan transmisi rata-rata (Kecepatan Unggah) tercatat sekitar 8,3 detik, dengan jitter (variasi penundaan) sekitar 1,1 detik**.**

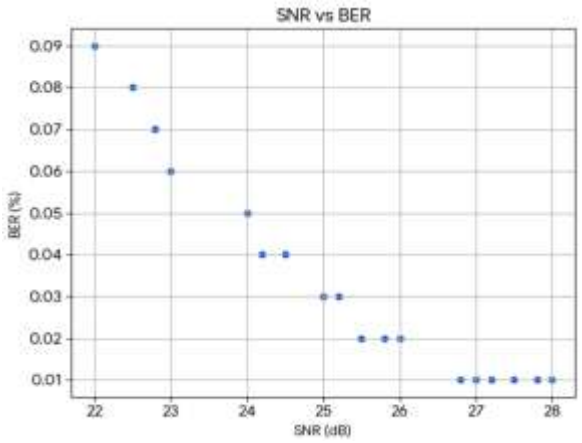
Gambar 8 menunjukkan kinerja yang umumnya stabil, terutama di pagi dan siang hari. Kecepatan Unggah & Kecepatan: Kecepatan unggah tertinggi (Kecepatan Unggah 6,1 KBps, Kecepatan Unggah 6,89 s) terjadi pada pukul 16.00, menunjukkan kondisi jaringan yang optimal. Namun, terjadi penurunan signifikan pada pukul 14.00 (Kecepatan Unggah 3,9 KBps, Kecepatan Unggah 10,77 s), yang ditunjukkan oleh "*Noise* Tinggi".

 ISSN 2987-677x



Gambar 3. Contoh Gambar

Kualitas Sinyal (SNR & BER): SNR tertinggi (28,0 dB) dan BER terendah (0,01%) juga tercatat pada pukul 16.00, yang menegaskan kualitas sinyal yang sangat baik. Sebaliknya, pada pukul 14.00, SNR turun drastis (22,5 dB) dan BER meningkat (0,08%), menunjukkan adanya "*Noise* Tinggi" yang memperlambat unggahan. Fluktuasi ini normal karena kondisi jaringan yang dinamis sepanjang hari.



Gambar 4. Contoh gambar

Gambar 9 menunjukkan hubungan antara SNR dan BER, membandingkan hasil teoritis, eksperimental, dan benchmark. Data eksperimental mengikuti kurva BPSK teoritis dengan cermat, yang mengkonfirmasi validitas model komunikasi. RMSE yang dihitung menunjukkan kesesuaian yang kuat antara teori dan pengukuran, menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan mempertahankan kinerja komunikasi yang andal dalam kondisi NLOS. Dibandingkan dengan sistem pemantauan berbasis IoT yang ada (Asnil et al., 2023; Hafidz et al., 2023; Shukla et al., 2026) sistem yang diusulkan mencapai BER yang lebih rendah dalam kondisi SNR yang serupa, menunjukkan peningkatan ketahanan dan keandalan.

Tabel 1. Contoh Tabel pada Buletin Ini

Parameter	Average
Upload Rate (KBps)	4,97
Upload Speed (s)	8,63
Bit Rate (kbps)	39,73
SNR (dB)	25,01
BER (%)	0,036

Kesimpulan

Studi ini menunjukkan bahwa keandalan komunikasi memainkan peran mendasar dalam sistem pemantauan energi terbarukan berbasis IoT. Integrasi metrik QoS memungkinkan pemahaman yang lebih mendalam tentang kinerja sistem dalam kondisi NLOS (*Non-Line-of-Sight*) yang realistis. Kesesuaian yang kuat antara hasil teoritis dan eksperimental menegaskan kekokohan kerangka kerja yang diusulkan dan menyoroti potensinya untuk penerapan yang dapat diskalakan.

Referensi

Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, *17*(4), 2347–2376. https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095

Arnon, S. (2015). Wireless communications. *Encyclopedia of Optical and Photonic Engineering Second Edition*, 3348–3367. https://doi.org/10.1081/E-EOE2-120009836

Asnil, A., Krismadinata, K., Husnaini, I., Hazman, H., & Astrid, E. (2023). Real-time monitoring system using IoT for photovoltaic parameters. *TEM Journal*, *12*(3), 1316–1322. https://doi.org/10.18421/TEM123-11

Bi, S., Zeng, Y., & Zhang, R. (2016). Wireless powered communication networks: An overview. *IEEE Wireless Communications*, *23*(2), 10–18. https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7462480

Boucif, O. H., Lahouaou, A. M., Boubiche, D. E., & Toral-Cruz, H. (2025). Artificial intelligence of things for solar energy monitoring and control. *Applied Sciences (Switzerland)*, *15*(11), 1–57. https://doi.org/10.3390/app15116019

Carrasco, J. M., Franquelo, L. G., Bialasiewicz, J. T., Galván, E., Portillo Guisado, R. C., Prats, M. Á. M., León, J. I., & Moreno-Alfonso, N. (2006). Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *53*(4), 1002–1016. https://doi.org/10.1109/TIE.2006.878356

Chaabane, M., Charfi, W., Mhiri, H., & Bournot, P. (2019). Performance evaluation of solar photovoltaic systems. *International Journal of Green Energy*, *16*(14), 1295–1303. https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1671405

Espitia, H., Machon, I., & Lopez, H. (2020). Review of Control techniques in Distributed Power Generation Systems. *Tecciencia*, *14*(27), 11–17. https://doi.org/10.18180/tecciencia.2019.27.2

etsi.org. (1999). *Tr 101 329 V2.1.1*. *1*, 1–37. https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/101300_101399/101329/02.01.01_60/tr_101329v020101p.pdf

Eva, A. J., Amin, A., Uddin, M. N., Ahmed, T., Nasim, A. A., Sani, M. S. H., & Arefin, M. S. (2026). Design and performance analysis of a hybrid solar-wind tree system with iot based real-time monitoring in Bangladesh. *Energy Conversion and Management: X*, *30*(June 2025). https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101566

 ISSN 2987-677x

Hafidz, I., Priyadi, A., Pujiantara, M., Anggriawan, D. O., & Purnomo, M. H. (2023). Development of IoT-Based portable power quality monitoring on microgrids by enhancing protection features. *IEEE Access*, *11*, 49481–49492. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3276241

Haoxing, Z., & System, C. (n.d.). *No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における 健康関連指標に関する共分散構造分析Title*.

Hosseini Dehshiri, S. J. (2025). Big data adoption in smart renewable energy networks toward sustainability through decision-making methods under uncertainty. *Results in Engineering*, *28*. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107887

Ibrahim, M. M. (2024). Energy management strategies of hybrid renewable energy systems: A review. *Wind Engineering*, *48*(1), 133–161. https://doi.org/10.1177/0309524X231200010

Jia, L., Li, Z., & Hu, Z. (2024). Applications of the internet of things in renewable power systems: A Survey. *Energies*, *17*(16), 1–19. https://doi.org/10.3390/en17164160

Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013). Photovoltaic degradation rates - An Analytical Review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *21*(1), 12–29. https://doi.org/10.1002/pip.1182

Jurasz, J., Canales, F. A., Kies, A., Guezgouz, M., & Beluco, A. (2020). A review on the complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions. *Solar Energy*, *195*(November 2019), 703–724. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.087

Li, S., Xu, L. Da, & Zhao, S. (2015). The internet of things: A survey. *Information Systems Frontiers*, *17*(2), 243–259. https://doi.org/10.1007/s10796-014-9492-7

Rahman, M. M., Joha, M. I., Nazim, M. S., & Jang, Y. M. (2024). Enhancing IoT-Based Environmental Monitoring and Power Forecasting: A Comparative Analysis of AI Models for Real-Time Applications. *Applied Sciences (Switzerland)*, *14*(24). https://doi.org/10.3390/app142411970

Rouibah, N., El Hammoumi, A., Bouttout, A., Haddad, S., Oukaci, S., Limam, A., & Benghanem, M. (2025). Smart monitoring of photovoltaic energy systems: An IoT-based prototype approach. *Scientific African*, *30*(September 2025). https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02973

Roy, P., He, J., Zhao, T., & Singh, Y. V. (2022). Recent advances of wind-solar hybrid renewable energy systems for power generation: A Review. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, *3*(January), 81–104. https://doi.org/10.1109/OJIES.2022.3144093

Shukla, G., Shukla, A. K., Shukla, K. N., & Dixit, S. (2026). IoT-enabled solar PV systems: real-time monitoring and efficiency optimization. *Results in Optics*, *22*. https://doi.org/10.1016/j.rio.2025.100949

Vairavasundaram, I., Ramu, S. K., Stephenraj, J. P., D, O. P., & Irudayaraj, G. C. R. (2024). IoT based monitoring system for DFIG based wind turbines under voltage dips. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, *9*(June). https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100690

Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, *1*(1), 22–32. https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328.

 ISSN 2987-677x

Optimasi Biaya Distribusi Material Batu Pecah pada Proyek Konstruksi di Kepulauan Maluku

Felix Taihuttu[1] Suratno Lourentius[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ felixtaihuttu@gmail.com

Distribusi material menjadi salah satu bagian yang menentukan dalam pelaksanaan proyek konstruksi, terlebih pada wilayah kepulauan yang memiliki keterbatasan akses dan biaya transportasi yang relatif tinggi. Kondisi geografis seperti dikepulauan Maluku membuat proses pengiriman material tidak hanya bergantung pada jarak, tetapi juga pada ketersediaan moda angkut darat dan laut, kapasitas suplai, serta perbedaan biaya pada setiap jalur distribusi. Penelitian ini membahas optimasi biaya distribusi material batu pecah pada proyek konstruksi di Kepulauan Maluku. Permasalahan utama adalah bagaimana menentukan pola pengiriman material dari beberapa sumber menuju beberapa Lokasi proyek agar seluruh kebutuhan material dapat terpenuhi dengan biaya yang paling efisien. Sumber material yang dianalisis terdiri atas Palu I, Seram, dan Palu II, sedangkan Lokasi tujuan distribusi meliputi Lirang, Tepa dan Tual. Total kebutuhan material batu pecah dalam penelitian adalah model transportasi, dengan pendekatan *North West Corner* (NWC) untuk memperoleh Solusi awal dan Modified Distribution (MODI) untuk menguji serta memperbaiki solusi tersebut hingga diperoleh biaya distribusi sebesar Rp6.027.875.600, sedangkan metode MODI menghasilkan biaya optimal sebesar Rp6.026.025.605. dari hasil tersebut diperoleh penghematan biaya sebesar Rp1.849.995, ini menunjukan bahwa model transportasi dapat digunakan sebagai alat bantu pengambilan keputusan dalam distribusi material konstruksi, khususnya pada wilayah kepulauan.

Kata kunci: Distribusi Material, Optimasi Biaya, *North West Corner, Modified Distribution*

Pendahuluan

Distribusi material merupakan salah satu aspek penting dalam keberhasilan pelaksanaan proyek kontruksi. Ketersediaan material yang tepat jenis, tepat jumlah, tepat mutu dan tepat waktu sangat mendukung kelancaran pelaksanaan proyek secara efisien dan efektif. Hal ini sejalan dengan kajian manajemen material konstruksi yang menegaskan bahwa proses perecanaan, pengadaan, logistic, transportasi, dan pengendalian material berpengaruh langsung terhadap kinerja proyek konstruksi terutama terhadap aspek biaya, waktu, mutu, dan efisiensi pelaksanaan (Yıldız et al., 2024). Sebaliknya, keterlambatan distribusi atau penyediaan material dapat menyebabkan terganggunya jadwal pelaksanaan, meningkatnya biaya proyek, menurunnya produktivitas pekerjaan, serta menimbulkan pemborosan dalam proyek konstruksi (Nurlaelah & Rahmattullah, 2025). Oleh karena itu perencanaan distribusi material perlu dilakukan secara cermat sebagai bagian dari pengendalian proyek konstruksi.

Pada wilayah kepulauan seperti provinsi Maluku, proses distribusi material memiliki tantangan yang lebih kompleks dibandingkan wilayah daratan. Kondisi geografis yang terdiri dari banyak pulau menyebabkan pengiriman material tidak hanya bergantung pada transportai darat, tetapi juga melibatkan transportasi laut Kajian mengenai logistik maritim di Indonesia bagian timur menunjukan bahwa efisiensi sistem logistik sangat menentukan konektivitas antar daerah (Amin et al., 2021). Wilayah kepulauan di Indonesia memerlukan perhatian khusus dalam sistem distribusi logistiknya karena transportasi laut menjadi bagian penting dalam menjaga konektivitas antar pulau dan kelancaran pasokan barang (Pamudji, 2012). Perbedaan jarak, akses Pelabuhan, ketersediaan armada, biaya angkut serta kondisi cuaca menjadi faktor yang dapat mempengaruhi besarnya biaya distribusi. Hal ini menuntut adanya perencanaan logistik yang lebih tepat agar pelaksanaan proyek berjalan efisien.

Material batu pecah merupakan salah satu material utama dalam pekerjaan konstruksi, khususnya untuk pekerjaan struktur dan jalan. Kebutuhan material yang besar ditambah dengan perbedaan lokasi sumber material, serta variasi biaya pengangkutan ke Lokasi proyek menjadikan distribusi batu pecah sebagai komponen yang perlu dianalisis. Tujuannya untuk meminimalkan total biaya distribusi tanpa mengabaikan batasan *supply* dari sumber material dan *demand* pada lokasi proyek. Peneltitian Soplanit menunjukan bahwa distribusi material pada proyek jembatan dapat dianlisis menggunakan metode transportasi NCW sebagai solusi awal dan MODI sebagai

 ISSN 2987-677x

metode optimasi akhir untuk memperoleh biaya distribusi yang lebih efisien (Soplanit et al., 2019). Kendala transportasi yang tidak lancar berdampak pada peningkatan biaya transportasi material (Kempa, 2022). Sebab itu proses pendistribusian yang tepat akan berdampak efisiensi biaya transportasi (Nteseo et al., 2021).

Dalam proyek konstruksi prinsip keberlanjutan juga perlu diterapkan dalam dalam praktik K3L pada proyek konstruksi melalui pendekatan *Triple Bottom Line*, yaitu ekonomi, sosial, dan lingkungan. Pendekatan ini menempatkan efisiensi biaya sebagai aspek ekonomi, perlindungan pekerja dan masyarkat sebagai aspek social, serta pengendalian dampak lingkungan sebagai aspek ekologis dalam pelaksanaan proyek konstruksi (Oladazimi et al., 2021). Aspek lingkungan juga perlu diperhatikan karena aktivitas konstruksi dapat menghasilkan debu, emisi, limbah, tumpahan maerial serta dampak terhadap masyarkat sekitar apabila tidak dikelola dengan baik (Kaluarachchi et al., 2021). Dengan demikian selain menghasilkan Solusi efisiensi biaya tetapi juga mendukung praktek keinsinyuran yang aman, berkelanjutan dan adaptif terhadap perubahan situasi, lingkungan maupun tantangan baru. Tujuan dari penelitian ini adalah mengindentifikasi sumber material, kapasitas dan biaya distribusi dari setiap sumber material menuju lokasi proyek.

Metode

Lokasi Penelitian berada di Lirang, Tual, dan Tepa dengan jalur distribusi material. Metode pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui observasi lapangan, wawancara dan studi dokumentasi. Metode analisis data yang digunakan dalam penelitian ini Adalah analisis deskriptif kuantitatif.

North West Corner Method (NWC) digunakan untuk memperoleh solusi awal yang layak dengan cara alokasi awal nilai sel ditetapkan pada sel yang berada diujung kiri atas tabel nilai sel awal tergantung pada kendala-kendala *supply* dan *demand* untuk 1 sel.

1. Menentukan rumus alokasi NWC

   $X_{ij} = min(a_i b_j)$ ..... (eq 1)

   dimana,

   X_{ij} =Jumlah material yang dialokasikan dari sumber ke-i menuju tujuan ke-j

   a_i =Kapasitas *supply* atau jumlah material yang tersedia pada sumber ke-i

   b_j =Kebutuhan *demand* atau jumlah material yang dibutuhkan pada tujuan ke-j

   min(a_i b_j) = Nilai terkecil antara kapasitas sumber dan kebutuhan tujuan yang dialokasikan pada sel aktif.

2. Menentukan rumus total biaya distribusi pada NWC

   $Z_{NWC} = \sum\sum C_{ij} X_{ij}$ ..... (eq 2)

   dimana,

   Z_{NWC} = total biaya distribusi berdasarkan hasil alokasi awal metode NWC

   C_{ij} = biaya distribusi per unit atau per m^3 dari sumber ke-i

   X_{ij} = jumlah material yang dikirim dari sumber ke-I menuju tujuan ke-j

   $\sum\sum$ =penjumlahan seluruh biaya pada semua kombinasi sumber dan tujuan yang memiliki alokasi pengiriman

Modified Distribution Method (MODI) digunakan untuk menguji dan memperbaiki solusi awal dari masalah transportasi agar diperoleh Solusi yang lebih optimal.

1. Menentukan rumus sel terisi

   Jumlah sel terisi = m+n-1 ..... (eq 3)

   dimana,

   m = total biaya distribusi berdasarkan hasil alokasi awal metode NWC

   n = biaya distribusi per unit atau per m^3 dari sumber ke-I menuju tujuan ke-j

   $m + n - 1$ = jumlah material yang dikirim dari sumber ke-I menuju tujuan ke-j

2. Menentukan rumus indeks baris dan kolom

   $U_i + V_j = C_{ij}$ ..... (eq 4)

   dimana,

   U_i = indeks atau multiplier untuk baris ke-i

   V_j = indeks atau multiplier untuk kolom ke-j

   C_{ij} = biaya distribusi per unit dari sumber ke-I menuju tujuan ke-j

3. Menentukan rumus indeks perbaikan

   $E_{ij} = C_{ij} - U_i - V_j$ ..... (eq 5)

   dimana,

   E_{ij} = indeks perbaikan untuk sel kosong pada baris ke-I dan kolom ke-j

   C_{ij} = biaya distribusi per unit pada sel kosong

   U_i = indeks baris ke-i

   V_j = indeks kolom ke-j

4. Menentukan rumus total biaya setelah optimasi

   $Z_{MODI} = \sum\sum C_{ij} X_{ij}$ ..... (eq 6)

   dimana,

   Z_{MODI} = total biaya distribusi setelah Solusi diuji dan diperbaiki menggunakan metode MODI

   C_{ij} = biaya distribusi per unit atau per m^3 dari sumber ke-i menuju tujuan ke-j

   X_{ij} = jumlah material yang dikirim dari sumber ke-I menuju tujuan ke-j setelah proses optimasi

Hasil Kerja

Formulasi Masalah Transportasi

Model trasnportasi berkaitan dengan situasi dimana suatu komoditas hendak dikirim dari sejumlah sumber menuju tempat tujuan. Tujuan dari persoalan tersebut adalah menentukan jumlah komoditas yang harus dikirim dari tiap-tiap tempat tujuan sehingga biaya total

 ISSN 2987-677x

pengiriman dapat di minimumkan. Oleh kerena itu, dibutuhkan data kebutuhan material, ketersedian material dan biaya pengiriman. Setelah itu, data kebutuhan, ketersediaan dan biaya pengiriman diformulasikan dalam persamaan linier. Data formulasi linier dibuatkan dalam tabel matriks model transportasi dapat diihat pada Tabel 1.

$\text{Meminimumkan Z} = \text{Rp } 872.856_{X_{1A}} + \text{Rp } 549.999_{X_{1B}} + \text{Rp } 674.999_{X_{1C}} + \text{Rp } 970.000_{X_{2A}} + \text{Rp } 687.500_{X_{2B}} + \text{Rp } 687.500_{X_{2C}} + \text{Rp } 700.000_{X_{3A}} + \text{Rp } 700.000_{X_{3B}} + \text{Rp } 700.000_{X_{3C}}$

Sedangkan, metode *Modified Distribution* (MODI) digunakan untuk menguji dan memperbaiki solusi awal dari masalah transportasi agar diperoleh solusi yang lebih optimal.

Ketersediaan

$X_{1A}+X_{1B}+X_{1C} = 4.100$
$X_{2A}+X_{2B}+X_{2C} = 1.150$
$X_{3A}+X_{3B}+X_{3C} = 2.106{,}13$

Kebutuhan

$X_{1A}+X_{1B}+X_{1C} = 5.000$
$X_{2A}+X_{2B}+X_{2C} = 35$
$X_{3A}+X_{3B}+X_{3C} = 2.221{,}13$

Tabel 1. Matriks Model Transportasi

Ke / Dari	Lirang	Tepa	Tual	Pasokan
Palu I	872856	549999	674999	4100,00
Seram	970000	687500	687500	1150,00
Palu II	700000	700000	700000	2006,13
	5000	35	2221,13	7256,13

Tabel 4 merupakan model transportasi hasil formulasi program linier terhadap biaya pengiriman batu pecah dari lokasi sumber material ke lokasi proyek.

Perhitungan Metode *North West Corner* (NWC)

Pada metode NWC akan dilakukan perhitungan solusi awal, hal akan dilakukan melalui distribusi bahan material batu pecah. Pendistribusian bahan material batu pecah berdasarkan data pasokan dan permintaan. maka jalur pendistribusian dimulai awalnya permintaan Lirang sebanyak 5.000 m³ bahan material tapi stok persediaan pasokan dari Palu I hanya 4.100 m³ sehingga semua pasokan material dari Palu I didistribusikan ke Lirang hal ini dapat digambarkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Iterasi 1 Metode NWC

Ke Dari	Lirang	Tepa	Tual	Pasokan
Palu I	4100 872856	549999	674999	4100
Seram	970000	687500	687500	1150
Palu II	700000	700000	700000	2006,13
	5.000	35	2.221,13	7256,13

Karena permintaan Lirang masih kurang 900 m³, maka diambil pasokan 900 m³ dari stok Seram untuk memenuhi kebutuhan permintaan Lirang untuk mencukupi pasokan permintaan. Dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Iterasi 2 NWC

Ke Dari	Lirang	Tepa	Tual	Pasokan
Palu I	4100 872856	549999	674999	4100
Seram	900 970000	687500	687500	1150
Palu II	700000	700000	70000	2006,13
	5.000	35	2.221,13	7256,13

Selanjutnya beralih pada permintaan di kolom kedua yaitu daerah Tepa dengan stok sebanyak 35 m³, berdasarkan hasil iterasi persediaan dari Seram masih bersisa 350 m³ sehingga dapat didistribusikan sebanyak 35 m³ untuk memenuhi kebutuhan permintaan di daerah Tepa. Dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Iterasi 3 NWC

Ke Dari	Lirang	Tepa	Tual	Pasokan
Palu I	4100 872856	549999	674999	4100
Seram	900 970000	35 687500	687500	1150
Palu II	700000	700000	70000	2006,13
	5.000	35	2.221,13	7256,13

Untuk area Tual permintaan yang dibutuhkan sebanyak 2.221,13 m³ sehingga pada lokasi Seram persediaan sisa masih ada 215 m³ dan didistribusikan ke daerah Tual. Dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Iterasi 4 NWC

Ke Dari	Lirang	Tepa	Tual	Pasokan
Palu I	4100 872856	549999	674999	4100
Seram	900 970000	35 687500	215 687500	1150
Palu II	700000	700000	70000	2006,13
	5.000	35	2.221,13	7256,13

Namun stok permintaan untuk area Tual belum terpenuhi sehingga menggunakan pasokan dari daerah Palu II sebanyak 2.006,13 m³ sehingga dapat terpenuhi permintaan pada daerah Tual.

Tabel 6. Iterasi 5 NWC

Ke Dari	Lirang	Tepa	Tual	Pasokan
Palu I	4100 872856	549999	674999	4100
Seram	900 970000	35 687500	215 687500	1150
Palu II	700000	700000	2006,13 70000	2006,13
	5.000	35	2.221,13	7256,13

Selanjutnya pada iterasi 5, karena kolom C3 telah didistribusikan sebanyak 2006,13 m³, maka telah memenuhi jumlah pasokan dan permintaan yang ada.

Total biaya distribusi bahan material batu pecah:

 ISSN 2987-677x

$$Z = \text{Rp } 872.856\ (4.100) + \text{Rp } 970.000\ (900) + \text{Rp } 687.500\ (35) + \text{Rp } 687.500\ (215) + \text{Rp } 700.000\ (2.006{,}13)$$
$$Z = \text{Rp } 6.027.875.600$$

Perhitungan Metode Modified Distribution

Hasil penyelesaian dengan metode NWC selanjutnya akan dikaji untuk mengetahui apakah sudah optimal atau belum dengan menggunakan metode MODI. Gambar 1 dan Tabel 1 merupakan contoh gambar dan tabel yang terdapat pada sesi hasil kerja. Keterangan gambar atau tabel dijelaskan terlebih dahulu diteks sebelum menjelelaskan diagram atau data dalam gambar dan tabel.

Dari tabel 6 diketahui jumlah alokasi material ke lokasi proyek Lirang Adalah 4.100 m³ dari sumber Palu I dan 900 m³ dari sumber Seram, jumlah alokasi material untuk lokasi proyek Tepa dari sumber Seram Adalah senilai 35 m³ dan jumlah alokasi material untuk lokasi proyek Tual Adalah senilai 315 m³ dari sumber Seram dan 2.006,13 m³ dari sumber Palu II.

$$U_i + V_j = C_{ij}\ \text{, misalkan } U_1 = 0$$

Palu I – Lirang
$0 + V_1 = \text{Rp } 872.856$
$V_1 = \text{Rp } 872.856$

Seram – Lirang
$U_2 + V_1 = \text{Rp } 970.000$
$U_2 = \text{Rp } 872.856\text{-Rp. } 872.856$
$U_2 = \text{Rp } 97.144$

Seram – Tepa
$U_2 + V_2 = \text{Rp } 687.500$
$V_2 = \text{Rp } 687.500\text{ -Rp. } 97.144$
$V_2 = \text{Rp } 590.356$

Seram – Tual
$U_2 + V_3 = \text{Rp } 687.500$
$V_3 = \text{Rp } 687.500\text{ -Rp. } 97.144$
$V_3 = \text{Rp } 590.356$

Palu II – Tual
$U_3 + V_3 = \text{Rp } 687.500$
$U_3 = \text{Rp } 687.500\text{ -Rp. } 590.356$
$U_3 = \text{Rp } 109.144$

Dari perhitungan di atas dilanjutkan dengan menghitung nilai kotak indeks perbaikan dengan menggunakan persamaan:

$$C_{ij} - U_i - V_j = K_{ij}$$

Palu I-Tual
$= C_{32} - U_3 - V_2$
$= \text{Rp } 674.999 - \text{Rp } 97.144 - \text{Rp } 674.999$
$= -\text{ Rp } 97.144$

Seram-Tepa
$= C_{22} - U_2 - V_2$
$= \text{Rp } 687.500 - \text{Rp } 97.144 - \text{Rp } 590.356$
$= 0$

Palu II-Lirang
$= C_{31} - U_3 - V_1$
$= \text{Rp } 700.000 - \text{Rp } 109.144 - \text{Rp } 872.856$
$= -\text{ Rp } 282.500$

Palu II-Tepa
$= C_{32} - U_3 - V_2$
$= \text{Rp } 700.000 - \text{Rp } 109.144 - \text{Rp } 590.356$
$= 0$

Karena nilai indeks masih ada nilai *negative* pada kolom Seram – Tepa, maka diambil nilai alokasi material terendah yaitu 35 m³. Kemudian dikurangi dengan nilai alokasi material pada kolom Palu I – Lirang sehingga nilai alokasi materialnya dari 4.100 m³ menjadi 4.065 m³ dan nilai 900 m³ dijumlahkan dengan 35 m³ menjadi 935 m³, untuk nilai 35 m³ dari Seram – Tepa dialokasikan dari Palu I – Tepa, sehingga pada sumber Seram - Tepa menjadi 0, selanjutnya 215 dijumlahkan dengan 35 m³ menjadi 250 m³, dan nilai 2.006,13 dikurangi dengan 35 m³ menjadi 1.971,13 m³, dapa dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 7. Iterasi Metode MODI

Ke Dari	Lirang		Tepa		Tual		Pasokan
Palu I	4065	872856	35	549999		674999	4100
Seram	935	970000	0	687500	250	687500	1150
Palu II		700000		700000	1971,13	70000	2006,13
	5.000		35		2.221,13		7256,13

Total biaya optimal distribusi bahan material batu pecah:

$$Z = Rp\ 872.856\ (4.065) + Rp\ 970.000\ (935) + Rp\ 549.999\ (35) + Rp\ 687.500\ (250) + Rp\ 700.000\ (1.971{,}13)$$

Berdasarkan hasil perhitungan MODI didapatkan total biaya optimal distribusi sebesar Rp 6.026.025.605.

Kemanfaatan Proyek Bagi Profesi Insinyur

Secara keseluruhan, urgensi proyek ini terletak pada kebutuhan untuk mengendalikan biaya distribusi material pada wilayah kepulauan yang memiliki tantangan geografis, logistik dan biaya transportasi yang kompleks. Kemanfaatannya bagi profesi insinyur adalah memberikan contoh ntara bagaimana ilmu tekni, analisis kuatitatif, manajemen lofistik, etika profei, K3L dan prinsip keberlanjutan dapat digabungkan dalam satu proses pengambilan keputusan. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya penting sebagai kajian akademik, tetapi juga relevan sebagai pembelajaran praktik keinsinyuran dalam menghadapi persoalan distribusi material konstruksi di wilayah kepulauan.

Kesimpulan

Kesimpulan yang dihasilkan dari penelitian ini antara lain sebagai berikut.

1. Tingginya biaya pengiriman dipengaruhi oleh perbedaan lokasi sumber material, jarak distribusi, harga material dan moda transportasi.

 ISSN 2987-677x

2. Pemilihan sumber material tidak dapat hanya didasarkan pada harga material terendah dan total biaya distribusi, namun juga dipengaruhi oleh biaya angkut dari *quarry* ke pelabuhan, biaya angkutan laut, biaya angkutan dari pelabuhan ke lokasi proyek, serta jarak pengiriman.
3. Penggunaan metode NWC menghasilkan total biaya distribusi sebesar Rp 6.027.875.600, sedangkan dengan menggunakan metode MODI menghasilkan total biaya distribusi sebesar Rp 6.206.025.605. Hasil akhir menggunakan metode MODI dinyatakan optimal dengan penghematan biaya sebesar Rp 1.849.995.

Ucapan Terimakasih

Penulis ucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah mendukung dalam proses penulisan penelitian ini.

Referensi

Amin, C., Mulyati, H., Anggraini, E., & Kusumastanto, T. (2021). Impact of maritime logistics on archipelagic economic development in eastern Indonesia. *Asian Journal of Shipping and Logistics*, *37*(2), 157–164. https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2021.01.004

Kaluarachchi, M., Waidyasekara, A., Rameezdeen, R., & Chileshe, N. (2021). Mitigating dust pollution from construction activities: A behavioural control perspective. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(16). https://doi.org/10.3390/su13169005

Kempa, M. (2022). implementasi metode vogel's approximation method (VAM) dan stepping stone untuk optimalisasi biaya distribusi material besi beton pada daerah kepulauan di Provinsi Maluku. *Optimasi Biaya Distribusi Material*.

Nteseo, S., Rifai Katili, M., Wungguli, D., Negeri Gorontalo, U., Jendral Sudirman No, J., & Gorontalo, K. (2021). Metode north west corner untuk meminimumkan biaya transportasi dengan uji optimal stepping stone pada distribusi tabung LPG 3 kg. *JES-MAT*, 7(2).

Nurlaelah, & Rahmattullah, I. (2025). The Impact of Construction Material Supply Delays on Contractor X in Jakarta, Indonesia. *Engineering and Technology Journal*, *10*(05). https://doi.org/10.47191/etj/v10i05.01

Oladazimi, A., Mansour, S., Hosseinijou, S. A., & Majdfaghihi, M. H. (2021). Sustainability identification of steel and concrete construction frames with respect to triple bottom line. *Buildings*, *11*(11). https://doi.org/10.3390/buildings11110565

Pamudji, A. (2012). Pengembangan Indikator Logistik Untuk Wilayah Kepulauan. *Logistik*.

Soplanit, P. P. G., Dundu, A. K. T., & Mangare, J. B. (2019). Optimasi biaya distribusi material dengan kombinasi metode NWC (north west corner) dan MODI (modified distribution) pada proyek pembangunan jembatan di Sulawesi Utara. *Jurnal Sipil Statik*, *7*(12), 1633–1640.

Yıldız, S., Güneş, S., & Kıvrak, S. (2024). Examining the Impact of Material Management Practices on Project Performance in the Construction Industry. *Buildings*, *14*(7). https://doi.org/10.3390/buildings14072076

 ISSN 2987-677x

Rancang Bangun *Airframe Flywing VTOL Bomb Carrier*

Pompy Pratisna[1] Aris Tri Ika[2] Taufik Ramdhan[3] Rega Ardiyansyah Wahid[4] Erpan Sahiri[5]

[1,2,3,4,5] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[1,2,3,4,5] Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut (STTAL)

✉ www.sttal.ac.id
✉ pratisnapompy@gmail.com
✉ udez459@gmail.com
✉ ardiansyahrega@gmail.com

With the increasing need for unmanned aerial vehicles (UAVs) to support military and security operations, vertical takeoff and landing (VTOL) technology is gaining attention due to its limited takeoff and landing flexibility. This research aims to design and build a VTOL flywing bomb carrier airframe system that functions as a UAV platform for strike missions against critical objects such as buildings and strategic infrastructure. The aircraft's flying wing design aims to improve the UAV's stability, range, and energy efficiency when carrying bomb payloads. This research includes aircraft structural design, aerodynamic simulations, and VTOL capability testing to ensure flight stability, strike accuracy, and load carrying capacity. The results of this research are expected to produce a UAV platform that is effective, accurate, and easy to operate in various terrain conditions. This innovation is expected to contribute significantly to the development of advanced unmanned aerial vehicles to meet defense technology needs and enhance national defense capabilities.

Kata kunci: UAV, VTOL, *flywing, bomb carrier, strike, vital objects, defense*

Pendahuluan

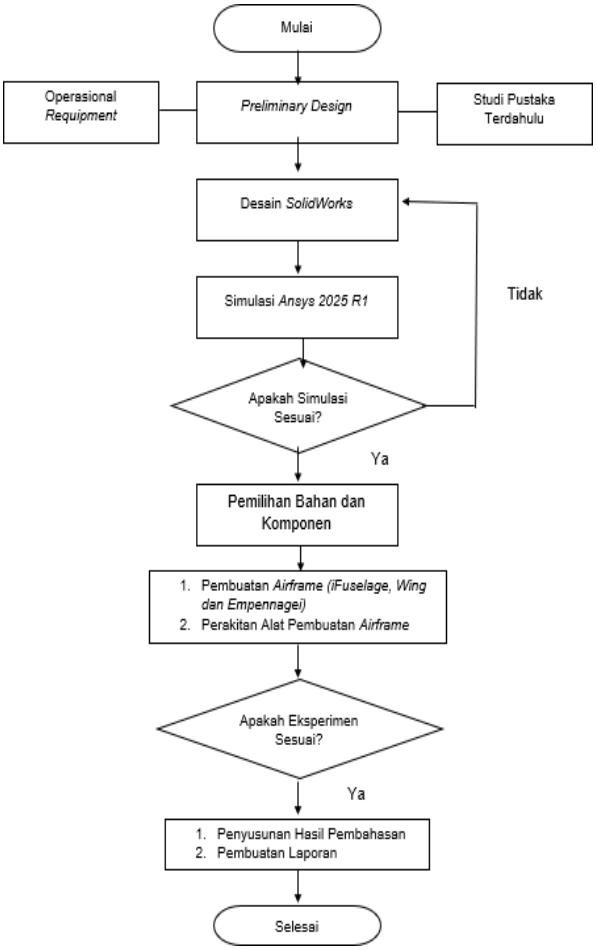
Pesawat tanpa awak atau *Unnamed Aerial Vehicle* (UAV) semakin menjadi kebutuhan strategis dalam mendukung operasi militer modern. Salah satu yang mendasari pengembangan teknologi UAV di Indonesia adalah Peraturan Panglima TNI Nomor 45/VI/2010 mengenai kebijakan penguasaan teknologi dan pengembangan alutsista nasional. Dalam peraturan ini menekankan pentingnya kemandirian teknologi untuk mendukung operasi TNI di bidang pertahanan. Salah satu inovasi terkini adalah pengembangan sistem *Flywing* VTOL (*Vertical Take-off and Landing*) yang memungkinkan pesawat beroperasi di area dengan infrastruktur terbatas.

Metode

Prosedur Penelitian

Dalam prosedur penelitian ini akan dibahas mengenai waktu dan tempat penelitian serta alat dan bahan yang akan digunakan dalam pembuatan alat ini, kemudian merancang, mengumpulkan data, dan mengolah data.

a. Menggambar desain rangka pada *prototype drone rescue vtol drone* yang akan dibuat dengan menggunakan program *solidwork*. Desain ini yang menggambarkan beberapa tampakan desain rangka pada *prototype drone* yang akan dibuat.
b. Pembuatan *prototype drone* ini dilakukan secara manual. Dimulai dari pembuatan rangka atau *frame rescue vtol drone* dengan menggunakan material serabut karbon tipe standar.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu menjadi salah satu acuan penulis dalam melakukan penelitian, sehingga penulis

 ISSN 2987-677x

dapat lebih dalam menggali dan mengkaji penelitian yang dilaksanakan. Dalam memperkaya bahan kajian pada penelitian, penulis mengangkat beberapa penelitian sebagai referensi. Adapun beberapa penelitian terdahulu yang penulis jadikan acuan dalam penulisan penelitian di antaranya:

a. Rancang Bangun Sistem Kontrol *Drone* UAV.
b. Rancang Bangun *Scan Eagle*.

Hasil Kerja

Perancangan Awal

Proses perancangan sistem yang difokuskan pada pembuatan *airframe* untuk *drone VTOL* (*Vertical Take-Off and Landing*) yang dirancang khusus untuk misi penyelamatan. Perancangan komponen keras dari *drone* ini tergolong cukup rumit karena harus mempertimbangkan berbagai aspek seperti kekuatan material, ukuran fisik, kebutuhan daya, dan performa aerodinamis. Material utama yang digunakan untuk membangun *airframe* adalah *polyfoam*, yakni bahan berbentuk busa yang berasal dari polimer poliuretan atau polietilena. *Polyfoam* dipilih karena sifatnya yang ringan, tahan terhadap air, memiliki isolasi termal yang baik, serta mampu menyerap tekanan dan benturan. Desain tiga dimensi (3D) dari *drone* ini dibuat menggunakan perangkat lunak *SolidWorks.*



Gambar 2. Desain *Airframe Flying VTOL BOM Carrier*

Perancangan Sayap *Drone*

Perancangan sayap pesawat merupakan elemen penting dalam desain pesawat karena sangat memengaruhi kinerja dan efisiensi penerbangan.



Gambar 3. *Straight Wing VTOL BOM Carrier*



Gambar 4. *Fuselage* dan *Wing VTOL BOM Carrier Drone* Tampak Samping

Perancangan Tail *Drone*

Perancangan *V-tail* (ekor V) pada *drone* pembawa bom (*bomb carrier drone*) adalah strategi desain yang banyak digunakan dalam pengembangan pesawat ringan dan *drone modern*. Penggunaan ekor V pada *drone* pembawa bom dapat memberikan keunggulan dalam hal kecepatan, efisiensi bahan bakar, dan profil siluet yang lebih rendah, yang penting untuk mengurangi deteksi radar. Namun, desain ini tetap perlu mempertimbangkan faktor kompleksitas sistem kontrol dan kestabilan, terutama saat menghadapi kondisi cuaca buruk atau misi dengan manuver ekstrem.



Gambar 5. *V-Tail* Pandangan *Isometric*

Prosedur Simulasi dan Analisis Menggunakan ANSYS

Proses simulasi aliran fluida pada model yang telah dirancang dimulai dengan tahap impor desain dari perangkat lunak pemodelan *SolidWorks* ke *ANSYS Workbench* untuk dilakukan analisis menggunakan modul *Fluent*. Tahapan-tahapan secara sistematis dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Pembuatan dan Ekspor Desain di *SolidWorks*
   Model tiga dimensi dari objek yang akan dianalisis, seperti saluran fluida atau komponen mekanik yang berinteraksi dengan aliran udara atau cairan, terlebih dahulu dibuat menggunakan perangkat lunak *SolidWorks*.
2. Impor *Geometry* ke ANSYS *Workbench*
   Setelah model berhasil diekspor, langkah selanjutnya adalah membuka ANSYS Workbench. Di dalam *Workbench*, modul *Fluent* dipilih dengan cara melakukan *drag-and-drop* ke area proyek.
3. Penyuntingan *Geometry*

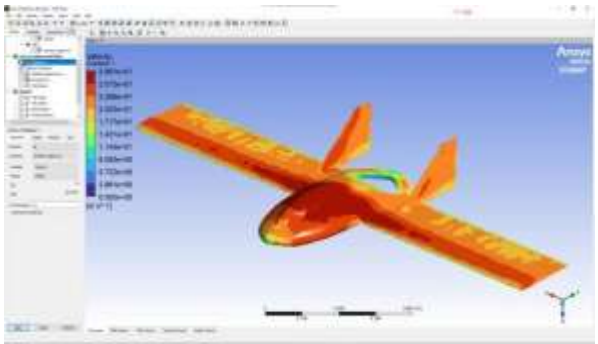
 ISSN 2987-677x

4. Proses *Meshing*
   Pembuatan *mesh* pada model yang telah diimpor. Proses ini dilakukan dengan membuka bagian *Mesh* pada modul *Fluent* di ANSYS *Workbench*.
5. *Setup* Simulasi *Fluent*
   Proses *setup* simulasi dengan membuka *Fluent Setup*. Tahapan dalam *setup* meliputi:
   a. *General Settings*: Pemilihan model 2D atau 3D sesuai desain, penentuan jenis *solver* (umumnya *pressure-based* untuk aliran *incompressible*), dan pengaturan *time-step* (*steady* atau *transient*).
   b. *Models*: Mengaktifkan model fisika sesuai kebutuhan, seperti model turbulensi (misal *k-epsilon*), *energy equation* jika melibatkan perpindahan panas, dan sebagainya.
   c. *Materials*: Menentukan jenis fluida yang digunakan, seperti udara, air, atau oli, serta mendefinisikan properti fisik fluida jika tidak tersedia dalam pustaka *default*.
   d. *Boundary Conditions*: Menentukan kondisi batas pada *inlet*, *outlet*, dan dinding (*wall*), seperti kecepatan masuk, tekanan keluar, dan kondisi *slip* atau *no-slip*.
   e. *Initialization*: Melakukan *initialization* pada domain simulasi sebagai awalan untuk proses iterasi.

Visualisasi dan Analisis Hasil

Setelah proses simulasi selesai dan hasil dianggap konvergen, dilakukan proses *post-processing* menggunakan modul *Fluent* atau *CFD-Post*. Analisis hasil meliputi:

a. Visualisasi kontur kecepatan (*velocity contour*)
b. Visualisasi kontur tekanan (*pressure contour*)
c. Vektor aliran (*velocity vectors*)
d. Garis aliran (*streamlines*)
e. Profil distribusi suhu (jika relevan)
f. Grafik dan *plot* hasil simulasi pada lintasan tertentu.



Gambar 6. Visualisasi *Velocity Countur* pada *Drone* oleh ANSYS

Analisis Desain *Airframe Flywing VTOL BOMB Carrier*

Secara keseluruhan, analisis ini memberikan gambaran mengenai seberapa efisien sebuah sayap dalam menghasilkan gaya angkat pada pesawat. Besarnya gaya angkat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti bentuk profil sayap, sudut serang, kecepatan aliran udara, serta kerapatan udara. Selain itu, analisis ini juga memberikan wawasan tentang kinerja aerodinamis pesawat secara umum. Desain yang akan di analisis memiliki dimensi sebagai berikut:

a. Panjang : 130 cm
b. Lebar : 50 cm
c. Tinggi : 15 cm
d. Berat Pesawat : 3,6 kg tanpa bom
e. Diameter bom : 7 cm
f. Berat bom : 1,3 kg

Hasil Analisis Fulida

Proses analisa fluida menggunakan ANSYS diperoleh besaran gaya angkat (*lift*) dan gaya hambat (*drag*) dengan variabel sudut serang atau *angle of attack* (15°) dan variabel kecepaan aliran udara (22 m/s). Hasil analisa fluida menampilkan besaran gaya secara numerik dan juga grafik yang konfergen.

Tabel 1. *Output* Gaya Hambat *Drone* dengan Sudut Serang 15° pada Kecepatan Aliran Fluida Udara 22 m/s

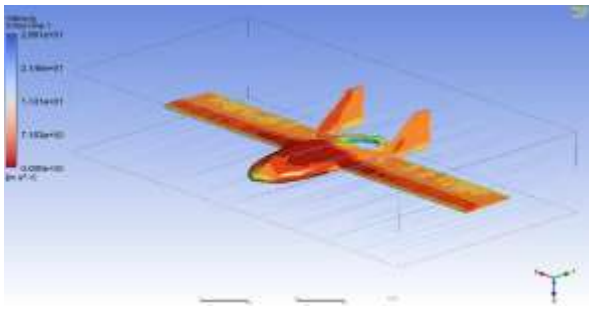
Forces – Direction Vector (1 0 0)

	Forces (N) Pressure	Viscous	Total	Coefficients Pressure	Viscous	Total
Zone aircraft	2,4523235	-0,00083554447	2,4514879	0,0077311216	-26,341125	0,0077284875
Net	2,4523235	-0,00083554447	2,4514879	0,0077311216	-26,341125	0,0077284875

Tabel 2. *Output* Data Gaya Angkat *Drone* dengan Sudut Serang 15° pada Kecepatan Aliran Fluida Udara 22 m/s



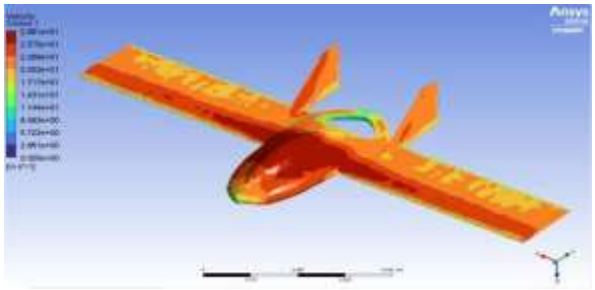
Ketika sudah mendapatkan hasil yang sesuai dari perhitungan, maka selanjutnya dapat menampilkan sebuah visualisasi aliran udara pada *drone* baru. Visualisasi yang ditampilkan, yaitu sebuah *velocity streamlane*.



Gambar 7. *Velocity Streamline* pada Kecepatan Udara 22 m/s Melewati *Drone* 15° Tampak Isometri

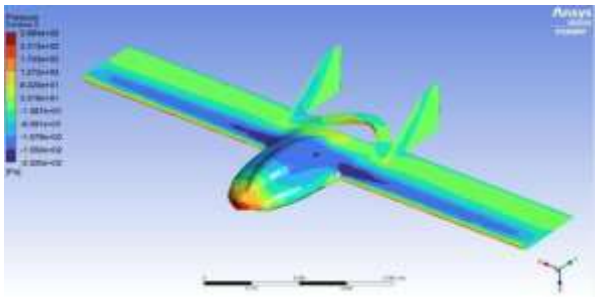
 ISSN 2987-677x

Velocity contour adalah representasi grafis yang menunjukkan daerah dengan kecepatan yang sama melalui garis atau gradien warna. Garis kontur atau gradien warna tersebut menggambarkan bagaimana kecepatan berubah di ruang, memberikan gambaran visual tentang distribusi kecepatan.



Gambar 8. Hasil Pengujian *Velocity Contour*

Pressure contour adalah representasi grafis yang menggambarkan distribusi tekanan. Ini dilakukan dengan menghubungkan titik-titik dengan nilai tekanan yang sama (*iso-line*), menciptakan garis-garis kontur yang menyerupai peta topografi, dengan jarak antara garis kontur menunjukkan gradien tekanan.

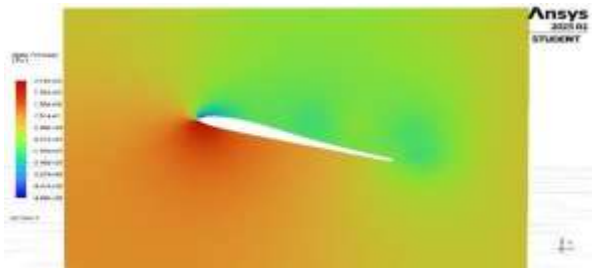


Gambar 9. Hasil Simulasi *Preassure Contour*

Dari hasil analisis fluida, dapat disimpulkan bahwa desain *drone VTOL* yang dirancang telah memenuhi kriteria aerodinamika yang baik berdasarkan hasil simulasi kecepatan aliran udara. Selanjutnya, akan dilakukan pengujian *preassure countur*.

Hasil Airfoil

Analisa pengujian *airfoil* pada *software* maka harus memperhatikan *mesh* yang digunakan pada pengujian, nilai *mesh* yang tidak sesuai tersebut bisa menghasilkan hasil yang tidak sesuai dengan pengujian yang dilakukan, berikut proses *meshing* yang dilakukan penulisan terhadap pengujian *airfoil* pada *software* ANSYS R1 2025.



Gambar 10. Analisis *Airfoil Drone* dengan Menggunakan *Software* ANSYS R1 2025

Gambar menunjukkan hasil kontur tekanan statis (*Static Pressure* [Pa]) di sekitar profil *airfoil* yang dianalisis. Dari hasil simulasi tersebut, terlihat adanya perbedaan tekanan signifikan antara sisi atas dan bawah *airfoil.* Warna merah menunjukkan area dengan tekanan statis tinggi, sedangkan warna biru hingga biru tua menunjukkan area dengan tekanan statis rendah. Tekanan rendah di sisi atas *airfoil* (area biru) dan tekanan tinggi di sisi bawah (area merah) menjadi indikator utama terbentuknya gaya angkat.

Dengan demikian, kombinasi antara analisis visual distribusi tekanan dan data numerik dari simulasi mendukung bahwa *airfoil* ini memiliki performa yang stabil, efisien, dan ideal untuk berbagai kondisi operasi *drone*, termasuk saat *manuver* pada kecepatan rendah dan menengah.

Sudut Serang (°)	Cl (Coefficient Lift)	CD (Coefficient Drag)	CL/CD
-4	-0.30	0.015	-20
0	0.00	0.012	0.00
4	0.5	0.015	33.3
8	0.9	0.02	45
12	1.2	0.035	34.3
15	1.3	0.06	21.7
18	1.1	0.9	12.2
20	0.8	0.12	6.7

Pada sudut serang 15°, *airfoil* MH 43 menunjukkan performa optimal dengan CL sebesar 1.3 dan CL/CD sebesar 21.7, sebelum mengalami penurunan efisiensi akibat fenomena *stall*.

Hasil *Wing*

Analisis struktur dan karakteristik aerodinamika sayap pada *drone* VTOL (*Vertical Take-off and Landing*) sangat krusial, karena sayap harus mampu menjalankan dua fungsi utama: sebagai elemen penghasil daya angkat dalam penerbangan horizontal dan sebagai penopang rotor untuk manuver vertikal, seperti lepas landas dan pendaratan.

Kesimpulan

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai kesimpulan berdasarkan pengujian dan analisa Rancang Bangun Airframe *Flywing Vtol Bomb Carrier*.

a. Perancangan Desain *Airframe Flywing VTOL Bom Carrier Airframe* telah berhasil dirancang menggunakan konfigurasi sayap terbang (*flywing*) yang memungkinkan efisiensi *aerodinamis* yang tinggi, kestabilan terbang yang optimal, dan kemampuan mengangkut muatan bom.
b. Analisis *Aerodinamika* Hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan ANSYS *Fluen*t menunjukkan bahwa aliran udara di sekitar airframe berjalan secara laminar dan stabil, tanpa adanya turbulensi besar. Simulasi *velocity contour* dan *pressure contour* menunjukkan distribusi kecepatan dan tekanan yang mendukung terbentuknya gaya

 ISSN 2987-677x

angkat secara optimal. Kecepatan tertinggi mencapai 28,6 m/s dan tekanan maksimum berada pada bagian hidung *drone*. Ini membuktikan bahwa desain telah memenuhi syarat efisiensi aerodinamis untuk *UAV VTOL*.

c. Pemilihan *material* bahan utama yang digunakan adalah *polyfoam*, yang dipilih karena sifatnya yang ringan, mudah dibentuk, tahan air, serta dapat menyerap energi benturan dengan baik. Penggunaan *polyfoam* dalam *airframe* memberikan kekuatan struktural yang cukup untuk menopang muatan bom tanpa mengorbankan kestabilan penerbangan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini telah menjawab seluruh rumusan masalah, yaitu perancangan *airframe* yang stabil dan efisien, analisis performa *aerodinamika* yang baik, serta pemilihan *material* yang sesuai untuk mendukung misi *UAV* dengan muatan bom.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada: Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut (STTAL), tim pengembang, dan dosen pembimbing, serta semua pihak yang telah mendukung penelitian ini.

Referensi

BDR, M. F., Ridwan, I., Adzima, A. F., & Anshori, M. F. (2021). Penggunaan pesawat tanpa awak (drone) dalam melakukan pemantauan dan identifikasi otomatis pada pertanaman jagung di Kelompok Tani Pattarowangta, Kabupaten Takalar. *Jurnal Dinamika Pengabdian, 7*(1), 191–201.

Engineers Edge. (2022). *Gas table*. https://www.engineersedge.com/physics/properties_of_air_at_1_atm_pressure_13828.htm. Diakses pada 29 Juni 2024.

Firmansyah, M. Z., & Puspitasari. (2021). Using drones as part of counter-terrorism: A review of security regulations and procedures. *Nakhoda: Jurnal Ilmu Pemerintahan, 20*(1), 43–58.

Firmanto, B. (2023). *Merawat Indonesia dari udara (Studi numerik aerodinamika sayap airfoil NACA)*. Amerta Media.

Güzelbey, İ. H., Eraslan, Y., & Doğru, M. H. (2019). Effects of taper ratio on aircraft wing aerodynamic parameters: A comparative study. *European Mechanical Science, 3*(1), 18–23. https://doi.org/10.26701/ems.487516

Ilmu Terbang. (2009). *Bab 3c sumbu pesawat*. https://www.ilmuterbang.com/artikel-mainmenu-29/teori-penerbangan-mainmenu-68/201-bab-3c-sumbu-pesawat. Diakses pada 27 Oktober 2023 pukul 11.15 WIB.

Mahardian, D. (2017). *Analisa struktur multi-platform Skywalker dan Reaper UAV* [Diploma thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. ITS Repository.

NASA Glenn Research Center. (n.d.). *NASA Glenn Research Center*. https://www.grc.nasa.gov/. Diakses pada 28 Oktober 2023 pukul 10.15 WIB.

Nugroho, F. (2008). *Prinsip penerbangan – 4 gaya yang mempengaruhi pesawat*. Ilmu Terbang. https://www.ilmuterbang.com/artikel-mainmenu-29/teori-penerbangan-mainmenu-68/71-aerodinamika-4-gaya-yang-mempengaruhi-pesawat. Diakses pada 27 Oktober 2023 pukul 10.30 WIB.

Prasetya, T. A. (2015). *Airfoil*. Belajar Terbang. https://binadhirgantara.blogspot.com/2015/02/airfoil.html. Diakses pada 28 Oktober 2023 pukul 09.25 WIB.

Saputra, R. E., Aulia, S., & Rangkuti, S. (2021). Desain prototype sistem kendali dan pelacakan pada mesin boat. *Jurnal Rekayasa Elektrika, 17*(2), 79–85. https://doi.org/10.17529/jre.v17i2.19900

Sari, N. M., & Kushardono, D. (2019). Analisis dampak pembangunan infrastruktur Bandara Internasional Jawa Barat terhadap alih fungsi lahan pertanian melalui citra satelit resolusi tinggi. *Jurnal Geografi, 11*(2), 146–162. https://doi.org/10.24114/jg.v11i2.13470

Selig, M. (1984). *NACA 2.5411 (NACA2411-il)*. Airfoil Tools. http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca2411-il. Diakses pada 29 Januari 2023.

Suciani, A., & Rahmadi, M. T. (2019). Pemanfaatan *drone* DJI Phantom 4 untuk identifikasi batas administrasi wilayah. *Jurnal Geografi, 11*(2), 218–223. https://doi.org/10.24114/jg.v11i2.10604

Wikipedia. *Pengaruh Coandă*. https://id.wikipedia.org/wiki/Pengaruh_Coand%C4%83. Diakses pada 27 Oktober 2023 pukul 11.20 WIB.

ISSN 2987-677x

Analisis Suhu Tidak Normal pada Mesin Pendingin Bahan Makanan di Kapal MT. Maritim Khatulistiwa

Tegar Putra Ardiansyah[1] Intan Sianturi[2] Bugi Nugraha[1,2] Rizqi Aini Rakhman[1,2] Suratno Lourentius[2]

[1] Program Studi Transportasi Laut, Politeknik Pelayaran Surabaya

[2] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ tegarputra423@gmail.com
✉ intan52.anturi@gmail.com
✉ bugi.nugraha@poltekpel-sby.ac.id
✉ rizqi.aini@poltekpel-sby.ac.id
✉ suratno.lourentius@gmail.com

Mesin pendingin bahan makanan merupakan peralatan penting di kapal untuk menjaga kualitas bahan makanan selama pelayaran. Pada Kapal MT. Maritime Khatulistiwa ditemukan permasalahan berupa temperatur ruang pendingin yang kurang optimal, sehingga berpotensi menurunkan kualitas bahan makanan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui penyebab terjadinya suhu tidak normal pada ruang pendingin serta upaya yang dapat dilakukan agar temperatur Kembali optimal. Metode penelitian yang digunakan adalah metode deskriptif kualitatif melalui observasi, wawancara, dan studi dokumentasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyebab utama kurang optimalnya suhu ruang pendingin adalah kondisi komponen mesin pendingin yang tidak bekerja maksimal, kurangnya perawatan berkala, serta pengoperasian yang belum sesuai prosedur. Upaya perbaikan dilakukan melalui perawatan rutin, pemeriksaan komponen, dan peningkatan pemahaman masinis

Kata kunci: mesin pendingin, suhu tidak normal, ruang pendingin, bahan makanan

Pendahuluan

Indonesia adalah negara kepulauan terbesar di dunia yang terdiri lebih dari 17.000 pulau yang dipisahkan oleh lautan. Kondisi geografis tersebut menjadikan laut sebagai jalur utama penghubung antarwilayah, baik untuk mobilitas manusia maupun distribusi barang. Transportasi laut memiliki keunggulan berupa biaya operasional yang relatif rendah, kapasitas angkut besar, serta mampu menjangkau wilayah-wilayah yang tidak dapat dilalui moda transportasi lain. Oleh karena itu, kapal memegang peranan strategis dalam mendukung perekonomian nasional, ketahanan pangan, kegiatan industri, dan rantai pasok internasional. Dalam menunjang seluruh aktivitas tersebut, kapal dituntut untuk beroperasi dalam kondisi optimal agar dapat mencapai tujuan pelayaran dengan aman dan efisien.

Di samping mesin penggerak utama, terdapat berbagai peralatan pendukung (*auxiliary machinery*) yang berfungsi menjaga kelancaran operasi kapal. Salah satu peralatan yang sangat penting adalah mesin pendingin (*refrigeration system*) yang berfungsi sebagai sarana penyimpanan bahan makanan bagi seluruh awak kapal. Mengingat perjalanan kapal dapat berlangsung dalam waktu lama, ketersediaan bahan makanan yang aman dan layak konsumsi menjadi faktor utama dalam menjaga kesehatan, kenyamanan, serta produktivitas awak kapal.

Tanpa sistem pendingin yang bekerja dengan baik, bahan makanan akan mudah mengalami pembusukan akibat aktivitas mikroorganisme, sehingga dapat menimbulkan risiko kesehatan bagi awak kapal. Selain itu, kerusakan pada sistem pendingin juga dapat menyebabkan kerugian operasional, baik dari segi biaya penggantian bahan makanan maupun terganggunya aktivitas pelayaran. Oleh karena itu, kinerja mesin pendingin harus selalu dijaga agar mampu mempertahankan suhu sesuai standar yang ditentukan.

Namun, dalam praktiknya sering terjadi permasalahan berupa suhu yang tidak normal pada mesin pendingin, seperti suhu yang terlalu tinggi atau tidak stabil. Kondisi ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, antara lain kebocoran refrigeran, kinerja kompresor yang menurun, kondensor yang kotor, maupun gangguan pada sistem kontrol. Apabila tidak segera ditangani, kondisi tersebut dapat mengganggu fungsi utama sistem pendingin dan berdampak pada kualitas bahan makanan yang disimpan. Berdasarkan permasalahan tersebut, maka perlu dilakukan analisis terhadap penyebab terjadinya suhu tidak normal pada mesin pendingin bahan makanan di kapal, serta upaya penanganan yang tepat untuk mengembalikan kinerja sistem agar dapat beroperasi secara optimal.

Bahan makanan yang disimpan di kapal umumnya terdiri atas bahan kering dan bahan basah. Bahan makanan basah, seperti daging, ikan, sayuran, dan buah-buahan, memiliki karakteristik mudah rusak (*perishable*) karena kadar airnya tinggi serta sangat sensitif terhadap perubahan suhu. Oleh karena itu, bahan-bahan tersebut memerlukan ruang pendingin dengan pengaturan temperatur yang ketat agar tetap segar dan layak konsumsi. Sebagai contoh, daging dan ikan harus disimpan pada suhu beku hingga terbentuk kristal es secara merata, sehingga dapat memperlambat aktivitas mikroorganisme dan menjaga kualitas bahan makanan. Apabila penyimpanan tidak sesuai dengan standar yang ditetapkan, maka bahan makanan dapat mengalami perubahan tekstur, menimbulkan bau tidak sedap, serta memicu pertumbuhan bakteri yang berbahaya bagi kesehatan.

 ISSN 2987-677x

Pada kapal MT. Maritime Khatulistiwa, mesin pendingin merupakan salah satu fasilitas vital yang mendukung pemenuhan kebutuhan logistik selama pelayaran. Namun, dalam pelaksanaannya ditemukan permasalahan berupa temperatur ruang pendingin yang tidak stabil dan tidak sesuai dengan nilai standar operasional. Ketidaknormalan suhu ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, antara lain kerusakan komponen mesin pendingin, kebocoran refrigeran, penyumbatan pada sistem perpipaan, kurangnya sirkulasi udara dalam ruang pendingin, serta kesalahan dalam proses pengoperasian maupun perawatan.

Apabila suhu ruang pendingin tidak mencapai standar yang telah ditetapkan, maka kualitas bahan makanan akan menurun dalam waktu relatif singkat. Kondisi seperti daging yang menjadi lembek, ikan yang tidak membeku sempurna, serta sayuran yang cepat layu merupakan indikasi bahwa sistem pendinginan tidak bekerja secara optimal. Hal ini tidak hanya berdampak pada kenyamanan awak kapal, tetapi juga berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan seperti keracunan makanan apabila bahan yang telah rusak tetap dikonsumsi. Selain itu, kerusakan bahan makanan juga menyebabkan kerugian operasional karena diperlukan pengadaan ulang logistik saat kapal berada di pelabuhan.

Permasalahan ketidaknormalan suhu pada mesin pendingin tidak hanya terjadi pada MT. Maritime Khatulistiwa, tetapi juga pernah terjadi pada kapal lain. Sebagai contoh, pada MV Strait Mas tahun 2023 terjadi peningkatan suhu ruang penyimpanan daging dan ikan dari kondisi normal -14°C hingga -17°C menjadi +26°C. Kondisi tersebut menyebabkan bahan makanan tidak layak konsumsi dan harus dibuang. Kasus ini menunjukkan bahwa gangguan kecil pada sistem pendingin dapat berkembang menjadi kerusakan yang lebih serius apabila tidak segera ditangani, serta dapat mengganggu kelancaran operasional kapal secara keseluruhan.

Untuk mencegah terjadinya permasalahan tersebut, diperlukan pemahaman yang baik dari setiap masinis mengenai prinsip kerja sistem pendingin, komponen utama, gejala kerusakan, serta prosedur *troubleshooting*. Selain itu, pelaksanaan perawatan (*maintenance*) yang terencana, rutin, dan sesuai standar sangat diperlukan guna menjaga kinerja mesin tetap optimal. Perawatan yang baik tidak hanya dapat memperpanjang umur peralatan, tetapi juga mencegah terjadinya kerusakan yang lebih besar. Mesin yang beroperasi secara terus-menerus tanpa pemeriksaan berkala cenderung mengalami penurunan kinerja, sehingga tidak mampu mempertahankan suhu sesuai dengan kebutuhan.

Metode

Penelitian ini dilaksanakan di atas kapal MT. Maritime Khatulistiwa, yaitu kapal jenis *Oil/Chemical Tanker* berbendera Indonesia yang dioperasikan oleh PT Synergy Marine Indonesia. Fokus penelitian diarahkan pada sistem mesin pendingin bahan makanan (*refrigeration system*), khususnya ruang pendingin (*refrigerated room*) dan komponen pendukungnya di area kamar mesin. Penelitian dilakukan selama penulis melaksanakan praktek laut pada periode November 2024 sampai dengan November 2025. Selama pelaksanaan penelitian, penulis melakukan pengamatan langsung terhadap kondisi operasional mesin pendingin bahan makanan di atas kapal. Penulis juga melakukan pencatatan data operasional dan dokumentasi terkait kondisi suhu yang tidak normal pada ruang pendingin. Data penelitian terdiri dari data primer yang diperoleh melalui observasi dan wawancara informal serta data sekunder yang diperoleh dari buku, jurnal, dokumen resmi, dan arsip pendukung lainnya.

Metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode deskriptif kualitatif dengan menyesuaikan teknik pengumpulan data terhadap masalah yang diteliti. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui observasi, wawancara, dan studi kepustakaan. Observasi dilakukan dengan mengamati secara langsung proses pengoperasian dan perawatan mesin pendingin selama praktek laut berlangsung. Wawancara dilakukan secara informal kepada awak kapal yang berkaitan dengan pengoperasian sistem pendingin untuk memperoleh informasi yang relevan.

Selain itu, studi kepustakaan dilakukan dengan mempelajari berbagai referensi seperti buku, jurnal ilmiah, dan sumber literatur lainnya yang mendukung penelitian. Dengan menggunakan ketiga teknik tersebut, penulis dapat memperoleh data yang lengkap dan mendalam sehingga mendukung proses analisis dan pemecahan masalah penelitian secara efektif.

Hasil Kerja

Situasi Permasalahan

Sistem mesin pendingin bahan makanan pada kapal MT. Maritime Khatulistiwa memiliki peranan penting dalam menjaga kualitas bahan makanan selama pelayaran berlangsung. Berdasarkan hasil observasi selama praktek laut, ditemukan adanya ketidakstabilan suhu pada ruang pendingin yang menyebabkan temperatur berada di atas batas normal yang telah ditentukan. Suhu ruang pendingin yang seharusnya berada pada kisaran -14°C hingga -17°C tidak dapat dipertahankan secara konsisten. Kondisi tersebut menyebabkan beberapa bahan makanan mengalami penurunan kualitas, seperti daging yang tidak membeku sempurna, ikan yang mengalami perubahan tekstur, serta sayuran yang cepat layu. Keadaan ini menunjukkan bahwa sistem pendingin belum bekerja secara optimal dalam menjaga kualitas bahan makanan selama pelayaran. Permasalahan tersebut memerlukan perhatian khusus karena berkaitan langsung dengan kebutuhan logistik kapal dan kesehatan awak kapal.

Dalam kondisi operasional kapal yang berlangsung secara terus menerus, sistem pendingin dituntut mampu bekerja secara stabil dan efisien. Berdasarkan hasil pengamatan, faktor teknis dan operasional menjadi penyebab utama terjadinya ketidaknormalan suhu pada ruang pendingin. Masinis kapal sebagai pihak yang bertanggung jawab terhadap pengoperasian dan perawatan mesin pendingin memiliki peran penting dalam menjaga

 ISSN 2987-677x

kestabilan sistem. Upaya yang dilakukan difokuskan pada pemeriksaan kondisi komponen mesin pendingin serta pelaksanaan perawatan secara berkala. Selain itu, pengoperasian sistem sesuai prosedur juga menjadi faktor penting dalam menjaga performa mesin pendingin. Dengan penanganan yang tepat, diharapkan suhu ruang pendingin dapat kembali stabil sehingga kualitas bahan makanan tetap terjaga selama pelayaran.

Rumusan Masalah

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan di atas kapal MT. Maritime Khatulistiwa, ditemukan adanya permasalahan utama berupa ketidaknormalan suhu pada mesin pendingin bahan makanan. Suhu ruang pendingin yang tidak stabil menyebabkan kualitas bahan makanan menurun sehingga berpotensi mengganggu kebutuhan logistik selama pelayaran. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem pendingin mengalami gangguan yang dipengaruhi oleh beberapa faktor teknis maupun operasional. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk mengetahui penyebab terjadinya kenaikan suhu pada ruang pendingin. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui komponen-komponen yang mempengaruhi performa sistem pendingin. Dengan demikian, hasil penelitian diharapkan mampu memberikan pemahaman mengenai faktor penyebab ketidaknormalan suhu pada sistem pendingin kapal.

Selain mengidentifikasi penyebab gangguan pada sistem pendingin, penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui upaya yang dapat dilakukan guna mengembalikan dan menjaga kestabilan suhu ruang pendingin. Berdasarkan hasil observasi, tindakan perawatan yang kurang optimal menjadi salah satu faktor yang menyebabkan penurunan performa mesin pendingin. Oleh karena itu, diperlukan langkah perbaikan yang tepat agar sistem pendingin dapat kembali bekerja sesuai standar operasional kapal. Penelitian ini diarahkan untuk mencari solusi yang efektif dalam meningkatkan efisiensi sistem pendingin selama pelayaran. Upaya tersebut meliputi pemeriksaan komponen, perawatan berkala, dan penerapan prosedur pengoperasian yang benar. Dengan adanya solusi yang tepat, diharapkan kualitas bahan makanan dapat tetap terjaga dengan baik selama kapal beroperasi.

Analisis Permasalahan

Berdasarkan hasil observasi dan pemeriksaan di lapangan, ketidaknormalan suhu pada mesin pendingin disebabkan oleh beberapa faktor teknis yang saling berkaitan. Salah satu faktor utama adalah menurunnya kinerja kompresor yang menyebabkan sirkulasi refrigeran tidak berjalan secara optimal. Selain itu, kondisi kondensor yang kotor menghambat proses pelepasan panas sehingga efisiensi sistem pendingin menurun. Hasil pemeriksaan juga menunjukkan adanya indikasi kebocoran refrigeran yang menyebabkan kemampuan sistem dalam menyerap panas menjadi berkurang. Akibatnya, suhu ruang pendingin mengalami kenaikan dan tidak dapat mencapai kondisi yang diinginkan. Permasalahan tersebut menunjukkan bahwa beberapa komponen utama sistem pendingin mengalami penurunan performa selama pengoperasian kapal.

Selain faktor teknis, faktor operasional juga menjadi penyebab terjadinya gangguan pada sistem pendingin bahan makanan. Kurangnya perawatan berkala menyebabkan beberapa komponen mengalami penurunan fungsi dan efisiensi kerja. Penyumbatan pada filter dan katup ekspansi juga menghambat aliran refrigeran sehingga distribusi pendinginan menjadi tidak merata. Di samping itu, sirkulasi udara di dalam ruang pendingin kurang optimal karena adanya hambatan pada aliran udara. Kesalahan pengoperasian sistem pendingin oleh operator juga turut mempengaruhi stabilitas suhu ruang pendingin. Oleh karena itu, diperlukan tindakan perawatan dan pengawasan yang lebih baik agar sistem pendingin dapat bekerja secara maksimal selama pelayaran.

Alternatif Solusi

Berdasarkan hasil analisis permasalahan, terdapat beberapa alternatif solusi yang dapat dilakukan untuk mengatasi ketidaknormalan suhu pada mesin pendingin bahan makanan. Langkah pertama yang dilakukan adalah membersihkan kondensor secara berkala agar proses pelepasan panas dapat berjalan lebih efektif. Selain itu, dilakukan pemeriksaan terhadap kemungkinan adanya kebocoran refrigeran pada sistem pendingin. Jika ditemukan kebocoran, maka dilakukan perbaikan serta pengisian refrigeran sesuai kebutuhan sistem. Pemeriksaan terhadap kondisi kompresor juga dilakukan untuk memastikan komponen tersebut masih bekerja secara optimal. Dengan kondisi komponen yang baik, proses pendinginan diharapkan dapat kembali bekerja secara normal.

Alternatif solusi lainnya adalah melakukan pembersihan filter dan pemeriksaan katup ekspansi agar aliran refrigeran tetap lancar. Selain itu, peningkatan sirkulasi udara di dalam ruang pendingin dilakukan dengan memastikan tidak terdapat hambatan pada jalur aliran udara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perawatan rutin dan terjadwal sangat penting untuk menjaga kestabilan kerja sistem pendingin. Oleh karena itu, penerapan program maintenance secara berkala menjadi salah satu solusi utama dalam mencegah terjadinya gangguan. Pelatihan kepada masinis mengenai prosedur pengoperasian sistem pendingin yang benar juga perlu dilakukan secara berkala. Dengan penerapan solusi tersebut, diharapkan suhu ruang pendingin dapat kembali stabil sesuai standar operasional kapal.

Rekomendasi Solusi

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, solusi yang paling efektif untuk mengatasi ketidaknormalan suhu adalah kombinasi antara perawatan rutin dan perbaikan komponen yang mengalami kerusakan. Pemeriksaan menyeluruh terhadap sistem pendingin perlu dilakukan secara berkala, terutama pada kompresor, kondensor, dan jalur refrigeran. Hasil penelitian

 ISSN 2987-677x

menunjukkan bahwa kebocoran refrigeran dan penurunan kinerja kompresor menjadi faktor utama yang menyebabkan suhu ruang pendingin tidak stabil. Oleh karena itu, pemeriksaan dan perbaikan terhadap kedua komponen tersebut menjadi prioritas utama. Selain itu, pembersihan kondensor dan filter secara rutin juga perlu dilakukan agar efisiensi sistem pendingin tetap terjaga. Dengan kondisi komponen yang bersih dan terawat, proses pendinginan dapat berlangsung lebih optimal.

Selain tindakan teknis, penerapan prosedur operasi standar (*Standard Operating Procedure/SOP*) juga perlu dilakukan secara konsisten oleh seluruh masinis kapal. Hasil observasi menunjukkan bahwa kesalahan dalam pengoperasian sistem pendingin dapat mempercepat penurunan performa mesin. Oleh karena itu, peningkatan disiplin kerja dan pemahaman terhadap prosedur pengoperasian sangat diperlukan. Pelatihan secara berkala mengenai pengoperasian dan perawatan mesin pendingin juga perlu diberikan kepada seluruh personel yang terkait. Dengan adanya peningkatan kompetensi, masinis diharapkan mampu mendeteksi gangguan lebih awal serta melakukan tindakan penanganan dengan tepat. Penerapan rekomendasi ini diharapkan mampu menjaga kestabilan suhu ruang pendingin serta mencegah terjadinya kerusakan yang lebih besar di masa mendatang.

Kajian Etika

Dalam pelaksanaan penelitian ini, penulis menjunjung tinggi nilai kejujuran dan objektivitas dalam menyajikan data hasil penelitian. Seluruh data yang diperoleh berasal dari hasil observasi langsung selama praktek laut di atas kapal MT. Maritime Khatulistiwa tanpa adanya manipulasi data. Penulis menyusun hasil penelitian berdasarkan kondisi nyata yang terjadi pada sistem mesin pendingin bahan makanan. Selain itu, penulis juga menjaga integritas ilmiah dengan menggunakan sumber referensi yang relevan dan dapat dipertanggungjawabkan. Penerapan etika penelitian sangat penting agar hasil penelitian memiliki nilai ilmiah dan profesional yang baik. Dengan demikian, penelitian ini dapat dijadikan sebagai bahan evaluasi dan pembelajaran dalam meningkatkan sistem pendingin di atas kapal.

Selain aspek kejujuran, penelitian ini juga memperhatikan tanggung jawab terhadap lingkungan dan keselamatan kerja. Kebocoran refrigeran yang terjadi pada sistem pendingin berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan apabila tidak ditangani dengan benar. Oleh karena itu, setiap tindakan perbaikan dan penanganan refrigeran dilakukan sesuai prosedur yang berlaku. Penulis juga memperhatikan kepatuhan terhadap aturan operasional dan standar keselamatan kerja di atas kapal. Seluruh kegiatan penelitian dilakukan tanpa mengganggu aktivitas operasional kapal selama pelayaran berlangsung. Dengan penerapan etika penelitian yang baik, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat secara akademis maupun praktis.

Kajian Keselamatan, Kesehatan Kerja, dan Lingkungan

Pelaksanaan pengoperasian dan perawatan mesin pendingin di atas kapal MT. Maritime Khatulistiwa harus memperhatikan aspek keselamatan, kesehatan kerja, dan lingkungan (K3L). Berdasarkan hasil observasi, terdapat beberapa potensi bahaya yang dapat terjadi, seperti kebocoran refrigeran, tekanan tinggi pada sistem pendingin, dan paparan suhu ekstrem di ruang pendingin. Kebocoran refrigeran dapat membahayakan kesehatan awak kapal apabila terhirup dalam jumlah tertentu. Selain itu, tekanan tinggi pada sistem pendingin juga berpotensi menyebabkan kecelakaan kerja apabila penanganannya tidak sesuai prosedur. Oleh karena itu, penggunaan alat pelindung diri (APD) dan penerapan prosedur kerja yang aman menjadi sangat penting dalam kegiatan perawatan mesin pendingin. Dengan penerapan K3L yang baik, risiko kecelakaan kerja dapat diminimalisir selama proses operasional berlangsung.

Selain memperhatikan keselamatan kerja, aspek lingkungan juga menjadi bagian penting dalam pengoperasian sistem pendingin kapal. Penggunaan dan penanganan refrigeran harus dilakukan dengan hati-hati agar tidak menimbulkan pencemaran lingkungan laut maupun udara. Limbah hasil perawatan mesin pendingin juga harus dikelola sesuai prosedur yang berlaku di atas kapal. Pemeriksaan rutin terhadap kondisi sistem pendingin dilakukan untuk mencegah terjadinya kebocoran refrigeran yang dapat merusak lingkungan. Selain itu, penyediaan fasilitas keselamatan seperti alat pemadam kebakaran dan prosedur tanggap darurat juga harus selalu tersedia dan siap digunakan. Dengan penerapan aspek keselamatan, kesehatan kerja, dan lingkungan secara baik, operasional sistem pendingin dapat berjalan lebih aman, efisien, dan ramah lingkungan.

Kajian Profesionalisme

Profesionalisme masinis dalam pengoperasian dan perawatan mesin pendingin sangat berpengaruh terhadap kestabilan sistem pendingin di atas kapal MT. Maritime Khatulistiwa. Berdasarkan hasil penelitian, masinis dituntut memiliki kompetensi dan pemahaman yang baik mengenai prinsip kerja sistem pendingin, prosedur pengoperasian, serta teknik perawatan mesin. Kemampuan dalam mendeteksi gangguan dan melakukan tindakan penanganan secara tepat menjadi bagian penting dalam mendukung kelancaran operasional kapal. Selain itu, penerapan standar teknis dan regulasi keselamatan kerja harus dilakukan secara disiplin agar pekerjaan dapat dilaksanakan secara profesional. Dengan kemampuan dan pengetahuan yang memadai, masinis dapat menjaga performa sistem pendingin tetap optimal selama pelayaran berlangsung. Profesionalisme kerja juga mencerminkan tanggung jawab personel terhadap keselamatan operasional kapal dan kualitas bahan makanan yang disimpan.

Selain kompetensi teknis, peningkatan profesionalisme juga memerlukan pelatihan dan pengembangan kemampuan secara berkelanjutan.

 ISSN 2987-677x

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelatihan berkala sangat penting untuk meningkatkan keterampilan masinis dalam menangani gangguan pada sistem pendingin. Pengalaman kerja dan pemahaman terhadap prosedur operasional juga menjadi faktor yang mendukung kualitas kerja personel di atas kapal. Masinis yang profesional akan mampu melaksanakan tugas sesuai standar operasional dan menjaga efisiensi sistem pendingin secara konsisten. Selain itu, sikap disiplin dan tanggung jawab dalam melaksanakan perawatan mesin menjadi bagian penting dalam mendukung keberhasilan operasional kapal. Dengan profesionalisme yang baik, sistem pendingin dapat bekerja secara optimal, aman, dan berkelanjutan selama kapal beroperasi.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan di atas kapal MT. Maritime Khatulistiwa, dapat disimpulkan bahwa ketidaknormalan suhu pada mesin pendingin bahan makanan disebabkan oleh beberapa faktor teknis dan operasional yang saling berkaitan. Faktor teknis yang memengaruhi antara lain menurunnya kinerja kompresor, kondisi kondensor yang kotor, kebocoran refrigeran, penyumbatan pada sistem perpipaan atau katup ekspansi, serta kurang optimalnya sirkulasi udara di dalam ruang pendingin. Selain itu, faktor operasional seperti kesalahan dalam pengoperasian dan kurangnya pelaksanaan perawatan berkala juga menjadi penyebab menurunnya performa sistem pendingin. Kondisi tersebut menyebabkan suhu ruang pendingin tidak dapat dipertahankan sesuai standar yang telah ditetapkan, sehingga kualitas bahan makanan mengalami penurunan selama pelayaran berlangsung. Oleh karena itu, sistem pendingin memerlukan perhatian dan penanganan yang tepat agar dapat bekerja secara optimal. Dengan sistem pendingin yang baik, kualitas bahan makanan di atas kapal dapat tetap terjaga dengan aman dan layak konsumsi.

Upaya yang dapat dilakukan untuk mengatasi ketidaknormalan suhu pada mesin pendingin adalah melaksanakan perawatan (*maintenance*) secara rutin dan terjadwal terhadap seluruh komponen sistem pendingin. Pemeriksaan berkala terhadap kompresor, kondensor, sistem perpipaan, serta kemungkinan kebocoran refrigeran sangat penting dilakukan untuk menjaga efisiensi kerja sistem. Selain itu, pembersihan kondensor dan filter perlu dilakukan secara rutin agar proses pendinginan dapat berlangsung secara maksimal. Pengoperasian sistem pendingin juga harus dilakukan sesuai prosedur standar (*Standard Operating Procedure/SOP*) guna menghindari kesalahan operasional yang dapat memengaruhi performa mesin. Peningkatan kompetensi dan keterampilan masinis melalui pelatihan juga menjadi faktor penting dalam mendukung keberhasilan pengoperasian dan perawatan sistem pendingin. Dengan penerapan langkah-langkah tersebut, diharapkan sistem pendingin mampu bekerja secara optimal dan menjaga kestabilan suhu ruang penyimpanan selama pelayaran.

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, penulis memberikan beberapa saran yang diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan dalam meningkatkan kinerja sistem pendingin bahan makanan di atas kapal MT. Maritime Khatulistiwa. Pihak kapal, khususnya masinis, disarankan untuk melaksanakan perawatan mesin pendingin secara rutin dan terjadwal guna mencegah terjadinya kerusakan yang lebih besar pada sistem. Pemeriksaan secara berkala terhadap kompresor, kondensor, sistem perpipaan, dan komponen lainnya juga perlu dilakukan untuk memastikan seluruh sistem bekerja dengan baik dan tidak mengalami kebocoran refrigeran. Selain itu, penerapan prosedur operasi standar (*Standard Operating Procedure/SOP*) harus dilaksanakan secara konsisten dalam setiap kegiatan pengoperasian dan perawatan mesin pendingin. Peningkatan pemahaman dan keterampilan masinis melalui pelatihan teknis juga sangat diperlukan agar setiap gangguan dapat ditangani dengan cepat dan tepat. Dengan penerapan saran tersebut, diharapkan sistem pendingin dapat bekerja lebih optimal, aman, dan berkelanjutan sehingga kualitas bahan makanan selama pelayaran tetap terjaga dengan baik.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing, pihak Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya, serta seluruh awak kapal MT. Maritime Khatulistiwa yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan bantuan selama proses penyusunan makalah studi kasus ini.

Referensi

Arismunandar, W., & Saito, H. (2025). *Penyegaran udara (Air conditioning).* Jakarta: PT Pradnya Paramita.

Cahyono, Y., & et al. (2019). Literature review sebagai metode penelitian dalam bidang teknik. *Jurnal Ilmiah Teknik*, 7(1), 1–10.

Gunawan, T. (2014). *Sistem refrigerasi dan tata udara.* Jakarta: Erlangga.

Harjuansyah, Y., & et al. (2017). Perawatan dan perbaikan mesin pendingin di kapal. *Jurnal Teknik Pelayaran*, 45–52.

Hasanah, H. (2017). Teknik-teknik observasi dalam penelitian kualitatif. *Jurnal Ilmiah Ilmu Sosial*, 3(1), 21–29.

Rismaya, R., Pramudantoro, T. P., & Khakim, N. (2023). Analisis pengaruh setting temperatur berbeda terhadap produksi air kondensat pada mini freezer. *Pre-Cooler,* 453-457.

Sarwono, J. (2006). *Metode penelitian kuantitatif dan kualitatif.* Yogyakarta: Graha Ilmu.

Sumanto, M. A. (2004). *Dasar-dasar mesin pendingin.* Yogyakarta: Andi.

Suryaman, Y., & Prayogo, D. (2018). Optimalisasi kinerja mesin pendingin guna menjaga kualitas bahan makanan di atas kapal MT Pujawati. *Dinamika Bahari, 9(1), 2165–2171*, https://doi.org/10.46484/db.v9i1.84.

 ISSN 2987-677x

Analisis Risiko Kecelakaan Kerja Bongkar Muat dalam Kegiatan *Stevedoring* dengan Metode *Job Safety Analysis* di PT Siam Maspion Terminal

Putri Shafira Devinta[2], Rizqi Aini Rakhman[1,2], Sri Mulyanto Herlambang[1,2], Elly Kusumawati[2] Dr. Ir. Suratno Lourentius[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2] Program Studi Transportasi Laut, Politeknik Pelayaran Surabaya

✉ putrishafiradevinta@gmail.com
✉ rizqi.aini@poltekpel-sby.ac.id
✉ suksesbareng20@gmail.com
✉ suranto.lourentius@gmail.com

Kegiatan bongkar muat *stevedoring* di pelabuhan memiliki potensi risiko kecelakaan kerja yang tinggi akibat penggunaan alat berat, perpindahan muatan, dan interaksi pekerja di area operasional. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi risiko kecelakaan kerja serta upaya pengendalian risiko pada kegiatan *stevedoring* di PT Siam Maspion Terminal menggunakan metode *Job Safety Analysis* (JSA). Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain *descriptive survey*. Populasi dan sampel penelitian berjumlah 30 responden yang terdiri dari pegawai, tim operasional, dan tenaga kerja bongkar muat dengan teknik total *sampling*. Instrumen penelitian meliputi kuesioner, observasi, dokumentasi, dan studi literatur. Analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif menggunakan matriks risiko AS/NZS 4360:2004 melalui pengukuran tingkat kemungkinan dan tingkat keparahan. Hasil penelitian menunjukkan terdapat 10 potensi kecelakaan kerja pada proses *stevedoring*, dengan 9 risiko berada pada kategori tidak diinginkan dan 1 risiko pada kategori dapat diterima dengan kontrol. Risiko tertinggi ditemukan pada proses pengarahan sling muatan dengan nilai risiko 14,98. Kesimpulan penelitian menunjukkan bahwa penerapan SOP, penggunaan APD, inspeksi alat, dan pengawasan kerja secara konsisten diperlukan untuk menurunkan risiko kecelakaan kerja pada kegiatan *stevedoring*.

Kata kunci: *Cargo Handling, Job Safety Analysis, Occupational Safety, Risk Assessment, Stevedoring*

Pendahuluan

Transportasi laut memiliki peran penting dalam sistem *supply chain* global karena menjadi sarana utama perdagangan antarnegara melalui jalur laut. Di Indonesia, pelabuhan menjadi pusat distribusi logistik strategis, terutama untuk komoditas curah kering seperti batu bara, pupuk, dan gandum. Meningkatnya aktivitas bongkar muat menjadikan proses stevedoring sebagai kegiatan penting yang memiliki risiko kecelakaan kerja tinggi karena melibatkan alat berat, pengangkatan muatan besar, serta koordinasi kerja yang kompleks. Data BPJS Ketenagakerjaan dan Kementerian Ketenagakerjaan menunjukkan jumlah kecelakaan kerja meningkat dari 221.740 kasus pada tahun 2020 menjadi 462.241 kasus pada tahun 2024, sehingga penerapan keselamatan dan kesehatan kerja (K3) di lingkungan pelabuhan perlu terus ditingkatkan.

Berdasarkan kondisi tersebut, masih terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*), yaitu belum adanya kajian yang secara sistematis menganalisis risiko kecelakaan kerja pada proses bongkar muat stevedoring dengan mengintegrasikan aspek perilaku kerja dan keandalan peralatan menggunakan metode *Job Safety Analysis* (JSA) di PT Siam Maspion Terminal. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi risiko kecelakaan kerja serta menentukan upaya pengendalian risiko pada proses bongkar muat *stevedoring*. Kebaruan penelitian terletak pada penerapan metode JSA secara terstruktur dengan mengintegrasikan analisis risiko, keandalan peralatan, dan praktik K3 guna mendukung peningkatan manajemen keselamatan kerja di pelabuhan.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain *descriptive survey* untuk menggambarkan potensi risiko kecelakaan kerja pada proses bongkar muat *stevedoring* di PT Siam Maspion Terminal. Penelitian bersifat observasional karena peneliti hanya mengamati dan menganalisis kondisi kerja tanpa memberikan perlakuan terhadap objek penelitian. Pendekatan ini digunakan untuk mengukur dan mengkategorikan risiko berdasarkan tingkat kemungkinan dan keparahan kecelakaan kerja menggunakan analisis statistik sederhana seperti *frequency rate*, *severity rate*, dan *incident rate*. Dengan menggunakan identifikasi bahaya yang berpotensi untuk mengukur risiko menurut Williams (1993).

Pengaruh pada aktivitas lain secara sistematis, tingkat risiko dapat dinyatakan dengan rumus berikut:

$$R = L \times C$$

Dengan *severitiy indeks* (SI) dihitung dengan rumus:

$$SI = \frac{\sum_{i=0}^{4} ai.xi}{4.\sum_{i=0}^{4} xi} \times 100\ \%.$$

 ISSN 2987-677x

Populasi penelitian terdiri dari 30 responden yang mencakup pegawai PT Siam Maspion Terminal, tim operasional dermaga, dan Tenaga Kerja Bongkar Muat (TKBM) yang terlibat langsung dalam bongkar muat. Analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif menggunakan metode *Job Safety Analysis* (JSA) melalui tahapan identifikasi pekerjaan, penguraian langkah kerja, identifikasi bahaya, penilaian risiko, dan penentuan pengendalian risiko. Penilaian risiko menggunakan matriks standar AS/NZS 4360:2004 dengan menggabungkan nilai *probability* dan *consequence* sehingga menghasilkan kategori tingkat risiko. Selain itu, dilakukan perhitungan *frequency rate*, *severity rate*, *incident rate*, *average time loss rate* (ATLR), dan *Frequency Severity Indicator* (FSI), serta pengujian validitas dan reliabilitas data menggunakan SPSS.

Hasil Kerja

Penyajian Data

1. **Distribusi Frekuensi Responden Bedasarkan Usia**
   Bedasarkan distribusi frekuensi responden usia menunjukan bahwa pengisian kuesioner data yang diperoleh terdapat 30 responden, dengan terdapat 12. responden (40%) yang berusia 25 sampai 35 tahun, 12 responden (40%) yang berusia 36 sampai 50 tahun, 6 responden (20%) yang berusia 51 sampai 50 tahun.
2. **Responden Bedasarkan Pekerjaan**
   Bedasarkan distribusi frekuensi responden bedasarkan jenis pekerjaan menunjukan bahwa data yang di peroleh responden yang bekerja sebagai pegawai sebanyak 15 orang (50%), tim operasional sebanyak 11 orang (36,6%), tkbm sebanyak 4 orang (13,3%).
3. **Distribusi Frekuensi Responden Sesuai Lama Bekerja**
   Bedasarkan distribusi frekuensi responden sesuai lama bekerja menunjukan bahwa, responden yang bekerja selama 1 sampai 10 tahun sebanyak 21 orang (70%), 11 sampai 20 tahun sebanyak 9 orang (30%).
4. **Distribusi Frekuensi Responden Bedasarkan Tingkat Pendidikan**
   Bedasarkan distribusi frekuensi responden bedasarkan tingkat Pendidikan. Menunjukan terdapat 2 orang responden (6,67%) dengan tingkat Pendidikan SMP, 7 orang responden (23,3%) dengan tingkat Pendidikan SMA, 21 orang responden (70%) dengan tingkat Pendidikan S1.

Tabel 1. Analisis Tingkat Kemungkinan dan Dampak pada Kegiatan *Stevedoring*

No	Kecelakaan kerja	Bahaya	Tingkat Kemungkinan	Tingkat Keparahan	Nilai Risiko	Rank
1.	Kecelakaan kerja saat pekerja mengarahkan posisi sling pada muatan	tangan terjepit sling atau muatan bergeser saat pengaitan	3,87	3,87	14,98	1
2.	Kecelakaan kerja saat pekerja berdiri di area ayunan muatan	pekerja tertabrak ayunan muatan	3,90	3,83	14,94	2
3.	Kecelakaan kerja saat operator crane memindahkan muatan ke hopper	muatan jatuh ke area kerja atau salah posisi penuanggan	3,90	3,83	14,94	3
4.	Kecelakaan kerja saat tenaga kerja berjalan di sekitar dermaga bongkar muat	terpeleset karena lantai licin atau ceceran muatan	3,87	3,80	14,71	4
5.	Kecelakaan kerja saat pekerja membersihkan sisa material di sekitar hopper	debu material masuk ke mata pekerja, terpeleset oleh tumpahan	3,87	3,77	14,59	5
6.	Kecelakaan kerja saat pekerja naik ke atas tumpukan muatan untuk merapikan posisi barang	Terjatuh dari ketinggian atau kehilangan keseimbangan	3,87	3,77	14,59	6
7.	Kecelakaan kerja saat alat berat bermanuver di area bongkar muat	Pekerja tertabrak alat berat atau kendaraan operasional	3,87	3,77	14,59	7
8.	Kecelakaan kerja saat grab beroperasi dan menghantam pekerja	Grab berayun atau salah manuver hingga mengenai pekerja	3,67	3,87	14,20	10
9.	Kecelakaan kerja saat komunikasi antara signalman dan operator dermaga tidak jelas	Salah aba-aba menyebabkan salah gerak crane atau salah posisi muatan	3,83	3,80	14,55	8
10.	Kecelakaan kerja saat pekerja membantu pengarahan truk di bawah hopper	pekerja tertabrak kendaraan saat proses pengisian muatan.	3,70	3,87	14,32	9

Sumber: Diolah Peneliti

Pada Tabel 1 analisis tingkat kemungkinan dan dampak pada proses stevedoring terdapat potensi bahaya 1 sampai dengan 10. Menunjukan kemungkinan risiko tertinggi terdapat pada potensi kecelakaan kerja satu saat pekerja mengarahkan sling pada muatan dengan bahaya tangan terjepit sling atau muatan bergeser saat pengaitan. Sedangkan potensi kecelakaan terendah ditunjukan pada kecelakaan kerja delapan saat *grab* beroperasi dan

 ISSN 2987-677x

menghantam pekerja dengan bahaya *grab* berayun atau salah manuver hingga mengenai pekerja. Dengan adanya analisis tingkat kemungkinan dan dampak pada proses stevedoring bisa kita lihat bahaya dan dampak yang akan berpotensi pada saat bongkar muat berlangsung.

Analisis Penilaian Tingkat Risiko

Tabel 2. Analisis Penilaian Tingkat Risiko

Keparahan	Tingkat Kemungkinan					
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1	1	2	3	4	5	6
2	2	4	6	8	10	12
3	3	6	9	12	15	18
4	4	8	9	16	20	24
5	5	10	15	20	25	30
6	6	12	18	24	30	36

Sumber: Sumber AS/NZS 4360:2004

Kriteria:
Tidak dapat diterima : 18-36
Tidak diinginkan : 10-16
Dapat diterima dengan *control* : 5-9
Dapat diterima : 1-4

Pada Tabel 2, menunjukan analisis penilaian tingkat risiko yang ditunjukan dari bagaimana nilai tingkat kemungkinan dan tingkat keparahan yang dikalikan. Agar menjadi level kemungkinan dan dapat diidentifikasi. Dengan memunculkan nilai yang didapat seperti, tidak dapat diterima dengan nilai 18-36, tidak diinginkan 10-16, dapat diterima dengan *control* dengan nilai 5-9, dan dapat diterima dengan nilai 1-4.

Berdasarkan data kecelakaan kerja 1 sampai dengan 10 potensi kecelakaan kerja denga rata rata, menunjukan nilai risiko tidak diinginkan, adapun potensi kecelakaan kerja paling tinggi yaitu pada kecelakaan kerja saat mengarahkan posisi sling pada muatan Hal ini ditunjukan dengan nilai risiko 14,98 yang dapat menyebabkan tangan terjepit sling atau muatan bergeser saat pengaitan. Sedangkan potensi yang paling rendah pada kecelakaan kerja delapan saat *grab* beroperasi dan menghantam pekerja dapat menyebabkan salah manuver hingga mengenai pekerja, ditunjukan pada nilai risiko 14,20 dengan tingkat risiko dapat diterima dengan kontrol.

Pengendalian yang dilakukan pada proses *stevedoring* diurutkan menurut tingkat risiko tertinggi hingga menengah. Potensi kecelakaan kerja paling tinggi terjadi pada saat mengarahkan posisi *sling* pada muatan, dengan bahaya tangan terjepit *sling* atau muatan bergeser saat pengaitan; tingkat risikonya dikategorikan tidak diinginkan. Pengendaliannya, meliputi mengikuti SOP dan *work instruction* pengikatan muatan, menggunakan APD lengkap, memeriksa kondisi *sling*, *hook*, dan titik angkat sebelum digunakan, serta menetapkan komunikasi dan komando tunggal.

Untuk kecelakaan kerja dengan risiko menengah, pertama adalah berdiri di area ayunan muatan yang berpotensi membuat pekerja tertabrak ayunan; risikonya juga *tidak diinginkan*, dan dikendalikan dengan memasang tanda peringatan dan pembatas area kerja. Selanjutnya, kecelakaan kerja delapan terjadi saat pekerja berada di dekat *grab* yang sedang beroperasi dan berpotensi tertabrak; risikonya tidak diinginkan, dengan bahaya *grab* berayun atau salah manuver. Pengendaliannya mencakup: menjaga jarak aman pekerja dari area posisi *grab*, mematuhi prosedur pengoperasian *grab* dan *crane*, serta tidak berada di bawah lintasan ayunan muatan selama proses bongkar muat berlangsung.

Salah satu Langkah awal adalah menentukan hiearki pengendalian risiko sesuai dengan kegiatan yang mempunyai risiko kerja. Berikut ini pengendalian dalam mengatasi kecelakaan kerja yang kemungkinan terjadi dan keparahan yang ada dengan meliputi eliminasi, substitusi, rekayasa teknik, *administrative*, dan APD.

1. Pada potensi kecelakaan kerja satu saat pekerja mengarahkan posisi sling pada muatan. Dengan potensi bahaya tangan terjepit sling atau muatan bergeser saat pengaitan, memiliki tingkat Risiko tidak diinginkan pengendalian yang direkomendasikan adalah mengikuti SOP dan *work instruction* pengikatan muatan, dan menggunakan APD lengkap seperti sarung tangan, mengikuti SOP *work instruction*, melakukan pemeriksaan kondisi *sling, hook*, dan titik angkat sebelum digunakan, dan menetapkan komunikasi komando tunggal.
2. Pada potensi kecelakaan kerja dua, kecelakaan kerja saat pekerja berdiri di area ayunan muatan. Dengan potensi bahaya pekerja tetabrak ayunan. Memiliki tingkat risiko tidak diinginkan, pengendalian yang direkomendasikan melarang pekerja berada di area ayunan muatan, dan memasang tanda peringatan dan pembatas area kerja.
3. Pada potensi kecelakaan kerja ketiga, Kecelakaan kerja saat *operator crane* memindahkan muatan ke *hopper*. Dengan potensi bahaya muatan jatuh kearea kerja atau salah posisi penuanggan. memiliki tingkat risiko tidak diinginkan. Pengendalian yang direkomendasikan memastikan *crane* dan *grab* dalam kondisi laik operasi dan melakukan inspeksi rutin pada alat angkat dan alat bantu.
4. Pada potensi kecelakaan kerja empat, kecelakaan kerja saat tenaga kerja berjalan di sekitar dermaga bongkar muat. Dengan potensi bahaya terpeleset karena lantai licin atau ceceran muatan. Memiliki tingkat risiko tidak diinginkan. Pengendalian yang direkomendasikan membersihkan area kerja secara berkala dan ceceran muatan, menggunakan *safety shoes* anti slip.
5. Pada potensi kecelakaan kerja kelima, kecelakaan kerja saat pekerja membersihkan sisa material di sekitar *hopper*. Dengan potensi bahaya debu material masuk ke mata pekerja, terpeleset oleh tumpahan. Memiliki tingkat risiko tidak diinginkan, pengendalian yang direkomendasikan menggunakan APD seperti masker, kacamata pelindung, sarung tangan, dan *safety shoes*, dan menyediakan alat kebersihan khusus di sekitar *hopper*.

 ISSN 2987-677x

6. Pada potensi kecelakaan kerja keenam, kecelakaan kerja saat pekerja naik ke atas tumpukan muatan untuk merapikan posisi barang. Dengan potensi bahaya terjatuh dari ketinggian atau kehilangan atau kehilangan keseimbangan. Memiliki tingkat risiko tidak diinginkan. Pengendalian yang direkomendasikan menggunakan APD dan alat bantu kerja yang aman, dan membatasi pekerja naik ke atas tumpukan muatan tanpa izin pengawas.
7. Pada potensi kecelakaan kerja ketujuh, kecelakaan kerja saat alat berat bermanuver di area bongkar muat. Dengan potensi bahaya pekerja tetabrak alat berat atau kendaraan operasional. Memiliki tingkat risiko tidak diinginkan. Pengendalian yang direkomendasikan memisahkan jalur kendaraan dan jalur pejalan kaki, memasang rambu lalu lintas, marka jalan dan cermin tikung.
8. Pada potensi kecelakaan kerja delapan, kecelakaan kerja saat *grab* beroperasi dan menghantam pekerja. Dengan potensi bahaya *grab* berayun atau salah manuver sehingga mengenai pekerja. memiliki tingkat risiko dapat diterima dengan kontrol, Pengendalian yang direkomendasikan menjaga jarak aman pekerja dari area operasi *grab*, dan mengikuti SOP pengoperasian *grab* dan *crane*.
9. Pada potensi kecelakaan kerja sembilan, kecelakaan kerja saat komunikasi antara signalman dan operator dermaga tidak jelas. Dengan potensi bahaya salah aba-aba menyebabkan salah gerak *crane* atau salah posisi muatan. Memiliki tingkat risiko tidak diinginkan, pengendalian yang direkomendasikan menetapkan satu orang signalman sebagai pemberi aba-aba dan menggunakan isyarat tangan atau alat.
10. Pada potensi kecelakaan kerja kesepuluh, kecelakaan saat pekerja membantu pengarahan di bawah truk *hopper*. Dengan potensi bahaya pekerja tertabrak kendaraan saat proses pengisian muatan. Memiliki tingkat risiko tidak diinginkan. Pengendalian yang direkomendasikan menentukan titik aman bagi pekerja saat mengarahkan truk dan menggunakan rompi relektif dan APD lengkapan.

Kesimpulan

Kesimpulan penelitian ini menunjukkan bahwa kegiatan *stevedoring* di PT Siam Maspion Terminal memiliki tingkat risiko kecelakaan kerja yang relatif tinggi berdasarkan analisis menggunakan metode *Job Safety Analysis* (JSA). Dari sepuluh potensi bahaya yang teridentifikasi, sembilan di antaranya berada pada kategori risiko tidak diinginkan dan satu kategori dapat diterima dengan kontrol. Risiko tertinggi ditemukan pada aktivitas pengarahan posisi sling pada muatan dengan nilai risiko 14,98 yang berpotensi menyebabkan tangan pekerja terjepit sling atau muatan bergeser saat pengaitan. Sementara itu, risiko terendah terdapat pada aktivitas *grab* beroperasi dan menghantam pekerja dengan nilai risiko 14,20 pada kategori dapat diterima dengan kontrol.

Hasil penelitian menegaskan bahwa faktor penyebab utama kecelakaan kerja berasal dari ketidakpatuhan terhadap SOP, kurangnya pengawasan, komunikasi kerja yang tidak efektif, serta kondisi area kerja dan peralatan yang belum sepenuhnya aman. Oleh karena itu, penerapan pengendalian risiko melalui inspeksi rutin alat, penggunaan APD lengkap, pembatasan area kerja, penerapan komunikasi tunggal, dan peningkatan disiplin kerja menjadi langkah penting dalam menekan potensi kecelakaan kerja di lingkungan bongkar muat. Penelitian ini diharapkan dapat mendukung penerapan keselamatan kerja berkelanjutan pada kegiatan *stevedoring* guna mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya SDG 8 mengenai pekerjaan layak dan pertumbuhan ekonomi.

Referensi

Aditya, R., & Nugraha, F. (2024). Occupational safety management in Indonesian dry bulk port operations. *Jurnal Transportasi Maritim Indonesia, 12*(1), 55–67.

Azwar, S. (2019). *Reliabilitas dan validitas* (4th ed.). Pustaka Pelajar.

Bailey, K. D., Babbie, E., & Halley, F. (2021). *Methods of social research* (15th ed.). Cengage Learning.

BPJS Ketenagakerjaan. (2024). *Data kecelakaan kerja nasional tahun 2020–2024*. BPJS Ketenagakerjaan.

Chen, L., & Du, Y. (2022). Safety risk assessment in port loading and unloading operations using integrated hazard analysis. *Journal of Marine Science and Engineering, 10*(8), 1125–1138. https://doi.org/10.3390/jmse10081125

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). SAGE Publications.

Cullinane, K. (2021). Port economics and global supply chain integration. *Maritime Economics and Logistics, 23*(2), 115–130. https://doi.org/10.1057/s41278-021-00184-7

Education, E., Elisa, P. N., & Perjuangan, U. B. (2021). Penggunaan media big book untuk menumbuhkan minat baca siswa di sekolah dasar. *Jurnal Basicedu, 5*(1), 446–452.

Haque, M. A., Rahman, M., & Karim, A. (2022). Occupational accident analysis in port operations using job safety analysis approach. *Safety Science, 146*, 105551. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105551

Huang, Z., Li, Y., & Wang, H. (2021). Human error and equipment failure in port safety management. *Ocean Engineering, 235*, 109404. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109404

Jiang, P., & Lam, J. S. L. (2021). Risk assessment of stevedoring operations based on job safety analysis. *Maritime Policy and Management, 48*(6), 812–826. https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1884975

Jinca, M. Y. (2001). *Transportasi laut Indonesia: Analisis sistem dan studi kasus*. Brilian Internasional.

 ISSN 2987-677x

Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia. (2024). *Statistik kecelakaan kerja nasional tahun 2024*. Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia.

Lee, J., & Kim, S. (2023). Port operational safety and accident causation analysis in bulk cargo terminals. *International Journal of Industrial Ergonomics, 94*, 103429. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2023.103429

Liu, X., Zhao, Q., & Lin, Y. (2023). Integrated occupational risk management in port industries. *Safety Science, 161*, 106071. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.106071

Munawar, A., & Hadi, S. (2023). Logistics performance and maritime transportation efficiency in Indonesia. *Jurnal Manajemen Transportasi dan Logistik, 10*(2), 89–101.

Nguyen, H. O., & Notteboom, T. (2021). Port labor safety and operational efficiency in cargo handling activities. *Research in Transportation Business and Management, 41*, 100648. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100648

Notteboom, T., & Rodrigue, J. P. (2022). *Port regionalization and global logistics chains* (2nd ed.). Routledge.

Operator, P., Muat, B., PT, D. I., & K, E. P. K. (2023). Safety training observation program for supervision oleh DuPont company tentang cause of lost workday and restricted workday injuries. *Jurnal Keselamatan Kerja Indonesia, 4*(2), 305–313.

Parinduri, L., Harahap, B., & Suryadi, W. (2020). Analisa kecelakaan kerja dengan perhitungan ISR dan IFR dan pengukuran peluang risiko menggunakan distribusi poisson pada bagian ladle furnace. *Jurnal Teknik Industri, 3814*, 59–63. pengukuran peluang risiko menggunakan distribusi poisson pada bagian ladle furnace. *Jurnal Teknik Industri, 3814*, 59–63.

Parola, F., Ferrari, C., & Tei, A. (2022). Port terminal operations and cargo handling safety performance. *Transport Policy, 117*, 210–221. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.01.011

Pemikiran, D. (2021). *Job safety analysis*. Jurnal Keselamatan dan Kesehatan Kerja, 1–12.

Praktik, L. K., Resiko, A., Kerja, K., Proses, P., Unloading, L., Metode, D., & Safety, J. O. B. (2022). Analisis risiko kecelakaan kerja pada proses loading unloading dengan metode job safety analysis. *Jurnal Rekayasa Industri*, 1–15.

Radite, P., & Fahma, F. (2013). Implementasi metode job safety analysis dan risk assessment di gudang bahan baku PT XYZ Tbk. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri, 12*(1), 30–38.

Rahmadian, A., & Susilo, D. (2023). Failure mode and effects analysis on grab equipment maintenance in stevedoring operations. *Jurnal Teknik Industri dan Sistem Manufaktur, 8*(2), 122–134.

Rahman, A., & Yusuf, M. (2023). Equipment reliability and occupational safety in Indonesian port terminals. *Journal of Maritime Engineering, 15*(3), 77–89.

Risk analysis using job safety analysis-fuzzy. (2021). *International Journal of Technology, 31*(3), 1–12. https://doi.org/10.12962/j20882033.v31i3.5655

Santoso, B., & Widodo, T. (2022). Occupational hazard identification in dry bulk cargo handling at Indonesian ports. *Jurnal Kesehatan dan Keselamatan Kerja, 6*(1), 44–58.

Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A. (2021). *Research methods for business students* (8th ed.). Pearson Education.

Siregar, H., & Prasetyo, A. (2023). Occupational health and safety implementation in Indonesian port services. *Jurnal Teknik dan Keselamatan Transportasi, 5*(2), 98–109.

Sugiyono. (2018). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.

Sugiyono. (2019). *Metode penelitian kuantitatif*. Alfabeta.

Sugarindra, M., Suryoputro, M. R., & Novitasari, A. T. (2017). Hazard identification and risk assessment of health and safety approach JSA (Job Safety Analysis) in plantation company. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 215*(1), 012029. https://doi.org/10.1088/1757-899X/215/1/012029

 ISSN 2987-677x

Integrasi Pembangkit Listrik *Solar Cell* dan Tenaga Uap pada Sistem *Vessel to Grid* (V2G)

Sonhaji[12] Frenki Imanto[12] Edi Kurniawan[12] Romanda Annas Amrullah[12] Muhammad Taufiq Hidayat[2]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2] Politeknik Pelayaran Surabaya

✉ alhajj1977@gmail.com

Sistem kelistrikan kapal memiliki peran penting dalam menunjang operasional pelayaran, sehingga diperlukan sumber energi yang stabil, efisien, dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem hybrid berbasis energi surya dan tenaga uap pada konsep *Vessel to Grid* (V2G) menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor INA219. Sistem dirancang untuk mengintegrasikan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dan pembangkit listrik tenaga uap mini guna menjaga kestabilan tegangan dan arus sebelum disimpan ke baterai. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimen melalui pengujian statis dan dinamis terhadap panel surya 50 WP, *boiler* uap mini, *buck-boost converter*, *relay* otomatis, dan sistem *monitoring* berbasis *smartphone*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan *monitoring* arus dan tegangan secara *real-time* serta melakukan *switching* otomatis antar sumber energi dengan stabil. Panel surya menghasilkan tegangan antara 15.4–19.7 Volt pada kondisi pencahayaan optimal, sedangkan sistem *boiler* uap mampu menghasilkan tegangan stabil setelah melewati *buck-boost converter*. Implementasi sistem *hybrid* berbasis ESP32 ini mampu meningkatkan efisiensi pengisian baterai dan mendukung pengembangan teknologi energi terbarukan pada sistem kelistrikan kapal.

Kata Kunci: *Hybrid System, Vessel to Grid*, ESP32, *Solar Cell, Boiler* Uap

Pendahuluan

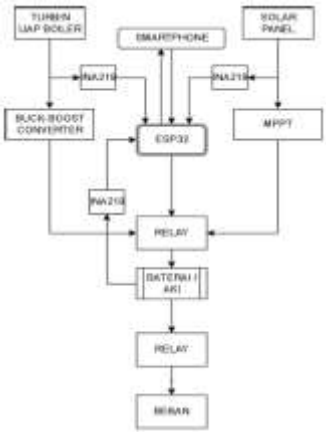
Indonesia sebagai negara maritim memiliki kebutuhan energi listrik yang tinggi pada sektor transportasi laut. Sistem kelistrikan kapal menjadi komponen utama yang mendukung berbagai aktivitas operasional, mulai dari penerangan, navigasi, komunikasi, hingga sistem propulsi. Ketergantungan kapal terhadap generator berbahan bakar fosil menyebabkan tingginya konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang yang berdampak terhadap lingkungan (Darfin & Seru, 2023).

Perkembangan teknologi energi terbarukan mendorong pemanfaatan sumber energi alternatif yang lebih efisien dan ramah lingkungan (Sukrina dkk., 2024). Salah satu teknologi yang berkembang adalah sistem *hybrid* yang menggabungkan lebih dari satu sumber energi untuk meningkatkan efisiensi dan kestabilan suplai daya listrik (Sukrina dkk., 2024). Dalam penelitian ini digunakan kombinasi energi surya dan tenaga uap sebagai sumber energi utama. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memanfaatkan energi matahari melalui panel surya untuk menghasilkan energi listrik DC, sedangkan tenaga uap diperoleh dari boiler mini yang digunakan untuk memutar turbin generator. Kedua sumber energi tersebut diintegrasikan dalam konsep *Vessel to Grid* (V2G), yaitu sistem yang memungkinkan kapal menjadi bagian dari jaringan distribusi energi listrik (Almousa & Alharbi, 2025).

Permasalahan utama dalam sistem *hybrid* adalah fluktuasi tegangan dan arus yang dihasilkan oleh masing-masing sumber energi. Oleh karena itu diperlukan sistem *monitoring* dan *controlling* yang mampu menjaga kestabilan suplai daya sebelum energi disimpan ke baterai. Penelitian ini menggunakan ESP32 sebagai pusat kendali dan sensor INA219 sebagai pembaca arus dan tegangan secara *real-time* (Muliawati dkk., 2022). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem *hybrid* berbasis solar cell dan tenaga uap dalam menjaga kestabilan tegangan dan arus listrik, serta mengevaluasi performa *switching* otomatis menggunakan ESP32 pada sistem *Vessel to Grid* (V2G).

Metode

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen dengan merancang sistem *hybrid* pembangkit listrik berbasis panel surya dan tenaga uap. Sistem terdiri atas panel surya 50 WP, *boiler* uap *mini*, sensor INA219, *buck-boost converter*, MPPT, *relay* otomatis, baterai, dan mikrokontroler ESP32, sebagaimana Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem *Hybrid* PLTS dan *Boiler* Uap Berbasis ESP32

 ISSN 2987-677x

Tahapan penelitian dimulai dari perancangan sistem, instalasi perangkat keras, pengujian sensor, pengujian sumber energi, hingga analisis performa sistem *monitoring* dan *switching* otomatis. Sensor INA219 digunakan untuk membaca parameter tegangan dan arus dari masing-masing sumber energi, kemudian data diproses oleh ESP32 dan ditampilkan melalui *smartphone*. *Buck-boost converter* digunakan untuk menstabilkan tegangan keluaran dari boiler uap, sedangkan MPPT digunakan untuk mengoptimalkan daya keluaran panel surya (Achmad & Nugraha, 2022; Yuliani & Fadlillah, 2024). *Relay* berfungsi sebagai *switching* otomatis untuk menentukan sumber energi yang digunakan dalam proses pengisian baterai. Pengujian dilakukan dalam dua tahap, yaitu:

1. Pengujian statis, meliputi:
   a. Pengujian tegangan dan arus PLTS
   b. Pengujian tegangan dan arus *boiler* uap
   c. Pengujian sensor INA219
   d. Pengujian *relay switching*
   e. Pengujian *monitoring smartphone*
2. Pengujian dinamis, meliputi:
   a. Pengaruh intensitas cahaya terhadap keluaran PLTS
   b. Fluktuasi keluaran boiler uap
   c. *Switching* otomatis antar sumber energi
   d. Efisiensi pengisian baterai

Hasil Kerja

Implementasi Sistem *Hybrid* PLTS dan *Boiler* Uap

Sistem *hybrid* berhasil dirancang dengan mengintegrasikan dua sumber energi, yaitu panel surya dan *boiler* uap mini, seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. *Prototype* Sistem *Hybrid Vessel to Grid* (V2G)

Panel surya menghasilkan listrik DC yang disalurkan melalui MPPT untuk mengoptimalkan pengisian baterai. Sementara itu, *boiler* uap menghasilkan energi listrik melalui generator DC yang distabilkan menggunakan *buck-boost converter*. ESP32 digunakan sebagai pusat kontrol sistem untuk membaca data sensor INA219 dan mengendalikan *relay* otomatis. Sistem *monitoring* berbasis *smartphone* memungkinkan pengguna memantau tegangan, arus, dan kondisi pengisian baterai secara *real-time*.

Pengujian Tegangan dan Arus PLTS

Hasil pengujian sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 1, menunjukkan bahwa panel surya 50 WP mampu menghasilkan tegangan antara 15.4–19.7 Volt pada kondisi pencahayaan optimal, yaitu kondisi berawan dan terik. Arus keluaran meningkat seiring bertambahnya intensitas cahaya matahari. Pada siang hari, daya keluaran panel surya mencapai kondisi paling stabil dan optimal untuk pengisian baterai. Hasil pengamatan juga menunjukkan bahwa arus keluaran panel surya mengalami peningkatan seiring bertambahnya intensitas cahaya matahari yang diterima permukaan panel. Pada pagi dan sore hari, arus yang dihasilkan relatif lebih kecil akibat rendahnya intensitas penyinaran, sedangkan pada kondisi cuaca cerah di siang hari arus keluaran meningkat secara signifikan. Kondisi ini membuktikan bahwa performa panel surya sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan, terutama tingkat iradiasi matahari dan suhu permukaan panel. Stabilitas daya keluaran tertinggi diperoleh pada rentang waktu tengah hari, sehingga energi yang dihasilkan menjadi lebih optimal untuk mendukung kebutuhan sistem kelistrikan dan pengisian energi baterai.

Tabel 1. *Output* Tegangan dan Arus dari Sistem *Solar Cell*

HARI	WAKTU	KONDISI	TEGANGAN (V)	ARUS (A)
1	08.00	Berawan	15.4	1.3
	10.00	Terik	19.3	2.5
	12.00	Terik	19.7	2.6
	14.00	Terik	19.5	2.4
	16.00	Mendung	12.5	1.2
2	08.00	Berawan	15.6	1.3
	10.00	Mendung	12.3	0.9
	12.00	Berawan	16.7	1.5
	14.00	Terik	19.7	2.6
	16.00	Berawan	15.5	1.2
3	08.00	Berawan	15.6	1.3
	10.00	Terik	19.3	2.5
	12.00	Terik	19.7	2.5
	14.00	Mendung	11.7	1.0
	16.00	Mendung	11.1	0.8

Pengujian Sistem *Boiler* Uap

Pengujian sistem *boiler* uap mini dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam menghasilkan energi listrik sebagai sumber daya pendukung pada sistem *hybrid propulsion*. *Boiler* uap mini yang dihubungkan dengan generator DC mampu menghasilkan tegangan listrik yang relatif stabil setelah melewati proses pengaturan tegangan menggunakan *buck-boost converter*, seperti yang terlihat pada Tabel 2. Penggunaan *converter* tersebut berperan penting dalam menyesuaikan nilai tegangan keluaran agar

 ISSN 2987-677x

tetap berada pada rentang yang dibutuhkan oleh sistem, meskipun terjadi perubahan putaran generator akibat fluktuasi tekanan uap yang dihasilkan.

Berdasarkan hasil pengujian, tegangan keluaran generator DC sebelum melewati *buck-boost converter* cenderung mengalami perubahan mengikuti kondisi tekanan dan aliran uap yang masuk ke turbin. Ketika tekanan uap meningkat, putaran turbin dan generator juga meningkat sehingga tegangan keluaran menjadi lebih tinggi. Sebaliknya, saat tekanan uap menurun, tegangan keluaran generator mengalami penurunan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem pembangkit berbasis *boiler* uap memiliki karakteristik keluaran yang dinamis dan dipengaruhi langsung oleh kestabilan suplai uap. Oleh karena itu, penerapan *buck-boost converter* sangat diperlukan untuk menjaga kestabilan tegangan agar tetap konstan dan aman digunakan sebagai sumber pengisian baterai maupun suplai daya pada sistem kontrol.

Hasil pengujian lebih lanjut menunjukkan bahwa sistem tenaga uap mampu berfungsi sebagai sumber energi cadangan ketika intensitas cahaya matahari menurun atau ketika daya keluaran panel surya tidak mencukupi kebutuhan sistem. Pada kondisi cuaca mendung maupun saat malam hari, *boiler* uap tetap dapat menghasilkan energi listrik sehingga kontinuitas suplai daya pada sistem *hybrid* dapat dipertahankan. Integrasi antara sistem PLTS dan sistem tenaga uap ini membuktikan bahwa kombinasi dua sumber energi terbarukan mampu meningkatkan keandalan, stabilitas, dan fleksibilitas sistem kelistrikan secara keseluruhan.

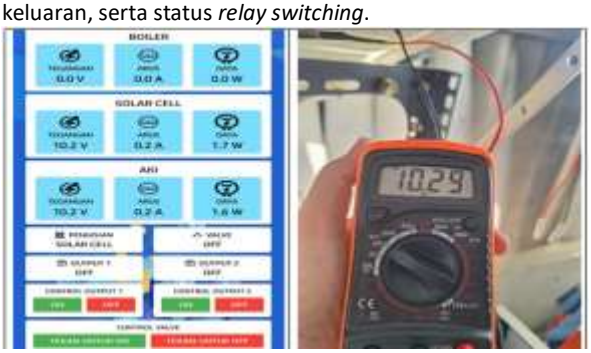
Selain meningkatkan keandalan sistem, penggunaan dua sumber energi yang saling mendukung juga memberikan keuntungan dalam aspek efisiensi energi dan kontinuitas operasional. Ketika salah satu sumber energi mengalami penurunan performa, sumber energi lainnya dapat mengambil alih sebagian beban daya sehingga sistem tetap dapat beroperasi secara optimal. Dengan demikian, penerapan sistem *hybrid* berbasis panel surya dan boiler uap mini memiliki potensi yang baik untuk diaplikasikan pada sistem kelistrikan kapal skala kecil maupun sistem energi mandiri yang membutuhkan suplai daya berkelanjutan dan stabil.

Tabel 2. Pengujian Boiler Uap

NO	TEKANAN UAP	OUTPUT STABIL	TEGANGAN (V)	ARUS (A)
1	10	Tidak	11.6	1.0
2	20	Ya	23.3	2.5
3	30	Ya	24.1	2.5
4	40	Ya	24.4	2.4
5	50	Ya	24.5	2.2

Monitoring Sistem

Sensor INA219 mampu membaca parameter arus dan tegangan dengan baik dan menampilkan data secara *real-time* melalui ESP32. Hasil pengukuran sensor menunjukkan selisih pembacaan yang kecil dibandingkan multimeter digital sehingga sensor dinilai cukup akurat untuk kebutuhan *monitoring*. *Monitoring* berbasis *smartphone* mempermudah pengguna dalam memantau kondisi sistem tanpa harus melakukan pengukuran langsung. Data *monitoring* yang tampil sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 3, meliputi tegangan input, arus pengisian, daya keluaran, serta status *relay switching*.



Gambar 3. Pengujian Sistem *Monitoring* Via Smartphone

Pengujian *Switching* Otomatis

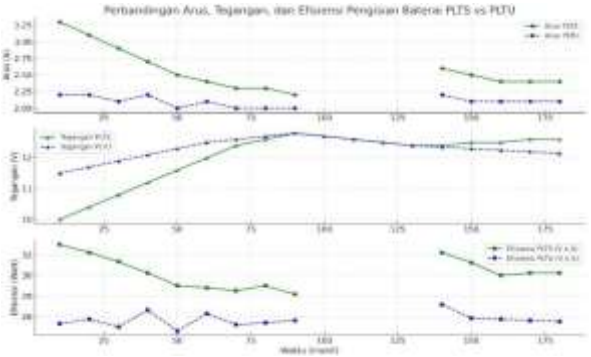
Relay otomatis berhasil melakukan *switching* sumber energi berdasarkan kondisi tegangan dan arus *input*. Ketika daya dari panel surya menurun, sistem secara otomatis mengalihkan sumber energi ke *boiler* uap. Sebaliknya, ketika panel surya kembali menghasilkan daya optimal, sistem kembali menggunakan energi surya sebagai sumber utama. Kinerja *switching* otomatis ini sebagaimana Tabel 3, menunjukkan bahwa ESP32 mampu menjalankan fungsi kontrol secara efektif dan menjaga kontinuitas suplai daya pada sistem *hybrid*.

Tabel 3. Proses *Switching* Otomatis

No	Sumber Aktif Awal	Tegangan (V)	Tegangan *Drop* (V)	Waktu *Switch* (S)	Sumber Aktif Akhir
1	PLTS	17.6	8.2	0.2	PLTU
2	PLTU	24.0	6.3	0.2	PLTS
3	PLTS	19.0	7.9	0.2	PLTU
4	PLTU	24.1	6.8	0.2	PLTS
5	PLTS	17.5	8.5	0.2	PLTU

Analisis Efisiensi Pengisian Baterai

Pengujian pengisian baterai sebagaimana Gambar 4, menunjukkan bahwa kombinasi sumber energi PLTS dan *boiler* uap menghasilkan proses pengisian yang lebih stabil dibandingkan menggunakan satu sumber energi saja. Sistem *hybrid* mampu mengurangi fluktuasi tegangan sehingga proses charging baterai berlangsung lebih aman dan efisien (Hilal dkk., 2023).



Gambar 4. Grafik Pengisian Baterai PLTS dan PLTU

 ISSN 2987-677x

Selain itu, sistem *monitoring* memberikan kemudahan dalam mengontrol kondisi baterai dan mencegah *overcharging*. Implementasi sistem ini berpotensi dikembangkan lebih lanjut untuk mendukung teknologi energi terbarukan pada sektor maritime (Almousa & Alharbi, 2025).

Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian yang telah dilakukan, sistem *hybrid* berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan *boiler* uap mini berhasil diimplementasikan dan mampu bekerja sesuai dengan fungsi yang direncanakan. Panel surya 50 WP mampu menghasilkan tegangan keluaran berkisar antara 15.4–19.7 Volt pada kondisi pencahayaan optimal, sedangkan sistem *boiler* uap mini yang terhubung dengan generator DC dapat berfungsi sebagai sumber energi cadangan ketika daya keluaran PLTS menurun. Penggunaan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dan *buck-boost converter* terbukti mampu menjaga kestabilan tegangan keluaran sehingga proses pengisian baterai menjadi lebih optimal dan efisien.

Sistem *monitoring* berbasis ESP32 dan sensor INA219 juga berhasil menampilkan parameter kelistrikan secara *real-time* melalui *smartphone* dengan tingkat akurasi yang cukup baik dibandingkan alat ukur referensi. Selain itu, sistem *relay* otomatis mampu melakukan *switching* sumber energi secara efektif berdasarkan kondisi tegangan dan arus *input*, sehingga kontinuitas suplai daya pada sistem *hybrid* tetap terjaga. Hasil pengujian pengisian baterai menunjukkan bahwa kombinasi sumber energi PLTS dan *boiler* uap menghasilkan proses *charging* yang lebih stabil dibandingkan penggunaan satu sumber energi saja karena mampu mengurangi fluktuasi tegangan selama proses pengisian berlangsung.

Secara keseluruhan, integrasi PLTS, *boiler* uap mini, sistem kontrol ESP32, dan *monitoring real-time* mampu meningkatkan keandalan, stabilitas, dan efisiensi sistem kelistrikan *hybrid*. Sistem yang dikembangkan memiliki potensi untuk diterapkan pada sistem energi mandiri maupun kapal skala kecil yang membutuhkan suplai daya berkelanjutan dari sumber energi alternatif dan terbarukan.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Pelayaran Surabaya, dosen pembimbing dan Pengelola Program Studi Profesi Insinyur (PSPI) Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya (UKWMS), keluarga, dan seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam proses penelitian dan penyusunan artikel ini.

Referensi

Achmad, I., & Nugraha, A. T. (2022). Implementasi *buck-boost converter* pada hybrid turbin angin Savonius dan panel surya. *COMPLETE: Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication, 3*(2). https://doi.org/10.52435/complete.v3i2.192

Almousa, M., & Alharbi, T. (2025). Optimizing grid integration of power-generating ships. *Sustainability, 17*(10), 4621. https://doi.org/10.3390/su17104621

Bhuana, J. C., & Maulana, I. M. A. (2021). Analisis efektivitas kondensor di PLTU PT. Semen Tonasa BTG Unit I 2×25 MW. *PoliGrid, 2*(1), 20. https://doi.org/10.46964/poligrid.v2i1.720

Darfin, G. S. (2023). *Analisis terjadinya blackout pada generator di kapal MV. Meratus Larantuka* [Diploma thesis, Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar].

Hilal, Y. N., Muliandhi, P., & Ardina, E. N. (2023). Analisa balancing BMS (battery management system) pada pengisian baterai lithium-ion tipe INR 18650 dengan metode cut off. *Simetris: Jurnal Teknik Mesin, Elektro dan Ilmu Komputer, 14*(2), 367–374. https://doi.org/10.24176/simet.v14i2.9852

Maulana, M. Y. (2023). *Analisa efisiensi pemakaian panel surya monocrystalline 50 WP dan polycrystalline 50 WP menggunakan pembebanan 25 W* [Undergraduate thesis, Universitas Islam Sultan Agung Semarang].

Muliawati, F., Riyadi, S., Annisa, S. C., Afrianto, Y., & Ginting, N. B. (2022). Implementasi sistem kontrol manajemen energi hibrid berbasis mikrokontroler. *PROTEK: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro, 9*(2). https://doi.org/10.33387/protk.v9i2.4117

Permadi, A. R., & Agung, A. I. (2020). Rancang bangun hybrid energy solar cell dan pembangkit listrik tenaga bayu berbasis microcontroller. *Jurnal Teknik Elektro, 9*(1). https://doi.org/10.26740/jte.v9n1.p%25p

Sinaga, W. A. (2022). Analisa pemakaian pemanas udara terhadap peningkatan efisiensi boiler pada PLTU Unit Belawan. *Jurnal Teknologi Mesin UDA, 3*(1), 151–159.

Sukrina, N. F., Sukamta, S., Arief, U. M., Supraptono, E., Ramadhan, I., Sonhaji, & Hakim, S. M. N. (2024). Perancangan automatic transfer switch pada sistem hybrid sumber listrik rumah tinggal satu fasa berbasis Zelio. *Edu Elektrika Journal, 12*(2), 1–5. https://doi.org/10.15294/3xs32j18

Yuliani, S. (2024). *Rancang bangun pembangkit listrik tenaga hybrid panel surya dan mikrohidro tipe crossflow berbasis IoT* [Skripsi, Universitas Muhammadiyah Surakarta].

 ISSN 2987-677x

COLMAP Align: Penyelarasan *Frame* Koordinat Otomatis pada *Pipeline Real-to-Sim-to-Real* Berbasis 3D *Gaussian Splatting*

Lungky Endinyoto[1,2] Bo-Ying Wu[1]

[1] Computer Graphics and Animation Laboratory, National Taiwan University of Science and Technology

[2] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ lungkye@gmail.com

***Pipeline Real-to-Sim-to-Real* (R2S2R) berbasis 3D *Gaussian Splatting* (3DGS) merupakan paradigma kunci untuk menutup *sim-to-real gap* pada riset robotika modern. Studi kasus ini mendokumentasikan diagnosis dan penyelesaian kegagalan simulasi pada integrasi *mesh* hasil rekonstruksi PGSR ke NVIDIA Isaac Sim 5.1.0. Melalui metodologi eliminasi lima langkah, akar penyebab teridentifikasi sebagai *frame* koordinat arbitrer hasil COLMAP yang menyebabkan *Axis-Aligned Bounding Box* tidak sejajar dan menghasilkan gaya kontak palsu pada simulator fisika. Dua solusi dirancang dan divalidasi: (1) rotasi *mesh* manual di CloudCompare, dan (2) toolkit COLMAP *Align in-house* yang menggunakan deteksi penanda ArUco serta Kabsch-Umeyama via *Singular Value Decomposition* untuk menyelaraskan rekonstruksi sebelum *training*. Toolkit mencapai residual rata-rata ~1mm dan menghilangkan kebutuhan *postprocessing* manual. Kontribusi ini sejalan dengan SDG 9 melalui rilis *open-source* dan menerapkan profesionalisme keinsinyuran pada manajemen risiko teknis dan K3L laboratorium komputasi.**

Kata kunci: *Real-to-Sim-to-Real*, 3D *Gaussian Splatting*, *COLMAP Align*, profesionalisme keinsinyuran, SDG 9 (Industri dan Inovasi)

Pendahuluan

Paradigma *Real-to-Sim-to-Real* (R2S2R) telah menjadi pendekatan strategis dalam riset robotika modern. Pendekatan ini memungkinkan generasi data *training* berskala besar dan beranotasi lengkap di lingkungan simulasi fisika sebelum *policy* yang di-*training* diterapkan pada perangkat keras nyata (Re3Sim, 2025; GaussGym, 2025). Tantangan utama dalam *pipeline* ini adalah *sim-to-real gap*, yaitu kesenjangan visual dan fisika antara simulasi dan dunia nyata yang menurunkan kinerja *policy*.

Untuk menutup kesenjangan tersebut, teknik *neural rendering* fotorealistis seperti 3D *Gaussian Splatting* (3DGS) telah diintegrasikan ke *pipeline* R2S2R (Kerbl dkk., 2023). Diperkenalkan oleh Kerbl dkk. pada SIGGRAPH 2023, 3DGS merepresentasikan suatu *scene* sebagai himpunan *Gaussian* 3D anisotropik di mana setiap *Gaussian-i* memiliki parameter posisi μ_i, matriks kovarians Σ_i, opasitas α_i, dan koefisien *spherical harmonics* untuk warna yang bergantung pada arah pandang. *Rendering* dilakukan melalui rasterisasi diferensiabel berbasis ubin (*tile-based rasterization*), yang memungkinkan optimasi *end-to-end* terhadap gambar pengamatan dan menghasilkan sintesis pandangan baru (*novel view synthesis*) pada laju di atas 100 FPS pada resolusi 1080p tanpa jaringan neural dalam yang umum digunakan pada *Neural Radiance Fields* (Mildenhall dkk., 2020). Karakteristik *real-time* dan kualitas fotorealistik inilah yang menjadikan 3DGS pilihan utama untuk *pipeline* R2S2R, jauh melampaui aset USD sintetis konvensional (Robo-GSSim, 2024). Implementasi spesifik berbasis *Planar-based Gaussian Splatting* (PGSR) memperluas 3DGS dengan regularisasi planar yang memungkinkan ekstraksi *mesh* 3D realistis dari hasil rekonstruksi (Chen dkk., 2024).

Sejumlah kerangka kerja R2S2R kontemporer seperti RE3SIM (Re3Sim, 2025), GaussGym (GaussGym, 2025), dan RoboGSim (Robo-GSSim, 2024) telah mengidentifikasi penyelarasan *frame* koordinat antara dunia nyata dan simulasi sebagai tantangan rekayasa kelas pertama. Namun, sebagian besar literatur memperlakukan tantangan ini secara implisit, tanpa metodologi sistematis untuk diagnosis kegagalan integrasi maupun perangkat lunak terbuka yang dapat diintegrasikan ke *pipeline* rekonstruksi standar berbasis COLMAP. Kekosongan inilah yang menjadi celah penelitian yang diisi oleh studi kasus ini.

Studi kasus ini mendokumentasikan investigasi sistematis terhadap kegagalan simulasi yang ditemui saat mengintegrasikan *mesh* hasil rekonstruksi PGSR ke dalam NVIDIA Isaac Sim 5.1.0 untuk generasi data sintetis robotika. Setup fisik mencakup lengan robot 6-DoF UFACTORY xArm6 (UFACTORY, 2023), tangan *dexterous* Inspire Robots RH56DFTP, dan *platform* kayu. Selama pengujian awal muncul anomali: jari robot bergerak abnormal, lengan robot membeku berkala, serta kegagalan generasi data sintetis.

Tujuan studi adalah mendiagnosis akar penyebab kegagalan secara sistematis, merancang dua strategi solusi korektif, dan memvalidasi efektivitasnya pada konteks *pipeline* produksi. Investigasi dilakukan dalam kerangka praktik keinsinyuran yang menjunjung profesionalisme, kepatuhan regulasi K3L laboratorium komputasi (UU 11/2014; PII, 2018), dan kontribusi *open-source* yang sejalan dengan SDG 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur) (UN, 2015). Artikel ini menyajikan: (1) metodologi diagnosis eliminasi lima

 ISSN 2987-677x

langkah; (2) rancangan *toolkit* COLMAP Align berbasis penanda ArUco dengan formulasi Kabsch-Umeyama; (3) validasi kuantitatif dengan akurasi residual ∼1 mm; dan (4) refleksi profesi terhadap manajemen risiko teknis dan keberlanjutan operasi laboratorium komputasi.

Kontribusi yang dipresentasikan tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga merefleksikan kompetensi keinsinyuran yang dilatih selama Praktik Keinsinyuran (PK), meliputi manajemen pekerjaan, komunikasi efektif, pengelolaan informasi, dan pengambilan keputusan desain mandiri. Studi ini juga menggambarkan bagaimana isu rekayasa modern seperti ketidakkonsistenan *frame* koordinat antarsubsistem dapat diatasi melalui penerapan prinsip diagnosis sistematis yang merupakan inti dari budaya rekayasa profesional.

Metode

Studi ini menggunakan pendekatan diagnosis dan rekayasa sistem melalui metodologi *systematic elimination*, yaitu cara terstruktur untuk mempersempit ruang hipotesis dari observasi tingkat sistem hingga penjelasan geometris yang tepat. Metodologi terdiri atas tiga tahap: karakterisasi kegagalan, proses diagnosis lima langkah, dan perancangan serta validasi solusi.

Pipeline R2S2R *end-to-end* mengikuti tiga tahapan makro: (i) *Real-to-Sim*, yaitu gambar *multi-view* dari *scene* fisik diproses oleh COLMAP (Schönberger & Frahm, 2016) dan PGSR untuk menghasilkan model 3DGS dan *mesh*; (ii) integrasi Isaac Sim, yaitu aset USD dan *mesh* dirakit menjadi *scene* simulasi (NVIDIA, 2024); serta (iii) *Sim-to-Real*, yaitu simulasi menghasilkan data sintetis untuk *training policy* persepsi dan manipulasi. Diagnosis dilakukan melalui lima uji eliminasi berurutan: (1) penonaktifan *collision* pada *mesh* untuk mengisolasi sumber tabrakan *ghost*; (2) inspeksi *collision proxy* untuk memverifikasi konsistensi visual–fisik; (3) visualisasi *Axis-Aligned Bounding Box* (AABB) pada *debug viewport*; (4) analisis *floater* di *CloudCompare*; dan (5) observasi AABB dinamis selama simulasi berjalan.

Toolkit COLMAP Align yang dirancang sebagai solusi sistematis menjalankan urutan: (a) deteksi penanda ArUco menggunakan OpenCV (Garrido-Jurado dkk., 2014); (b) triangulasi *multi-view* sudut penanda di *frame* COLMAP; (c) komputasi transformasi similaritas optimal melalui metode Kabsch-Umeyama dengan *Singular Value Decomposition* (Umeyama, 1991); (d) penerapan transformasi pada *cameras.bin*, *images.bin*, dan *points3D.bin* sebelum *training* PGSR. Pengujian dilakukan pada *workstation* GPU laboratorium dengan kepatuhan terhadap protokol K3L laboratorium komputasi yang telah diverifikasi.

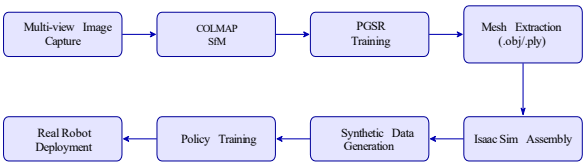
Validasi kuantitatif dilakukan melalui dua metrik: (i) deviasi rotasi antara *frame* hasil *alignment* dan *ground truth* ArUco, diukur dalam derajat; dan (ii) residual jarak *Euclidean* antara titik sudut penanda yang ditransformasi dengan koordinat dunia analitisnya, diukur dalam milimeter. Keseluruhan eksperimen direplikasi pada tiga *dataset* dengan jumlah gambar *training* bervariasi (80, 150, 220 gambar) untuk mengevaluasi sensitivitas terhadap ukuran sampel.

Hasil Kerja

Diagnosis Akar Penyebab

Lima uji diagnostik menghasilkan eliminasi hipotesis bertahap. Uji 1 (penonaktifan *collision*) memverifikasi bahwa anomali memang berasal dari *mesh*; tanpa *collision* objek jatuh bebas tanpa interferensi. Uji 2 (inspeksi *collision proxy*) tidak membuahkan temuan berarti: *convex hull proxy* tampak konsisten dengan *mesh* visual, sehingga *proxy* dieliminasi sebagai akar penyebab.

Uji 3 (visualisasi AABB) menjadi temuan utama: AABB *mesh* pada Isaac Sim ternyata jauh lebih besar daripada geometri visualnya dan tidak sejajar dengan permukaan platform fisik. Uji 4 (analisis *floater*) hanya menemukan *floater* minor yang tidak menjelaskan ukuran AABB raksasa, sehingga hipotesis *floater* dieliminasi. Uji 5 (observasi AABB dinamis) mengonfirmasi bahwa AABB berputar mengikuti orientasi arbiter *mesh*, yang berarti *mesh* dirotasi pada sumbu *non-aligned* terhadap dunia nyata.



Gambar 8. *Pipeline* R2S2R *End-To-End* dengan Propagasi *Frame Arbitrer* COLMAP Sebagai Akar Masalah yang Teridentifikasi

Akar penyebab teridentifikasi: COLMAP *Structure-from-Motion* menghasilkan *frame* koordinat arbitrer yang tidak sejajar dengan gravitasi atau permukaan kerja. *Frame* ini terpropagasi ke dalam *mesh* PGSR, sehingga ketika diimpor ke Isaac Sim sebagai *static collider*, menghasilkan AABB yang membungkus *mesh* secara tidak proporsional pada *world frame* simulator. Konsekuensinya adalah gaya kontak palsu pada *solver* fisika yang termanifestasi sebagai gerak *joint* robot abnormal dan instabilitas *constraint solver*.

Temuan ini berlaku umum: setiap *pipeline* yang menggabungkan SfM untuk pemulihan pose, menghasilkan *mesh* atau *point cloud*, dan mengimpor geometri ke simulator fisika berbasis AABB akan rentan terhadap kelas kegagalan ini, termasuk *mesh* turunan NeRF dan rekonstruksi MVS. Refleksi proses diagnosis: prinsip integritas ilmiah ditegakkan melalui dokumentasi seluruh hipotesis yang diuji, termasuk yang terbukti keliru (*floater*) sebagai wujud kepatuhan terhadap UU 11/2014 Pasal 19. Pendekatan eliminasi sistematis ini juga mempraktikkan prinsip K3L preventif: alih-alih membiarkan robot beroperasi pada kondisi yang berpotensi merusak perangkat keras bernilai

 ISSN 2987-677x

tinggi, pengujian dilakukan pada mode visualisasi simulasi sebelum aktivasi fisika diaktifkan.

Toolkit COLMAP Align

Solusi B berupa *toolkit* COLMAP Align dirancang sebagai koreksi praproses sistematis. Diberikan pasangan titik $\{(\mathrm{p}_j^{COLMAP}, \mathrm{q}_j^{world})\}$ dari hasil triangulasi sudut ArUco dan koordinat dunia analitik dari geometri papan, dicari skala s, rotasi R, dan translasi t yang meminimalkan jumlah kuadrat residual:

$$\min_{\mathrm{R},s,\mathrm{t}} \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} \left\| q_j - \left(s\mathrm{R}\mathrm{p}_{j_}\mathrm{t}\right)\right\|^2.$$

Kabsch-Umeyama menyelesaikan persoalan ini secara *closed-form* melalui SVD pada *cross-covariance matrix* dari himpunan terpusat. Diberikan sentroid $\mu_p = \frac{1}{N}\sum_j \mathrm{p}_j$ dan $\mu_q = \frac{1}{N}\sum_j \mathrm{q}_j$, titik dipusatkan menjadi $\tilde{\mathrm{p}}_j = \mathrm{p}_j - \mu_p$ dan $\tilde{\mathrm{q}}_j = \mathrm{q}_j - \mu_q$. Varians referensi dihitung sebagai $\sigma_p^2 = \frac{1}{N}\sum_j \left\|\tilde{\mathrm{p}}_j\right\|^2$, dan *cross-covariance matrix* 3×3:

$$\mathrm{H} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} \tilde{\mathrm{q}}_j\, \tilde{\mathrm{p}}_j{}^{\top}.$$

Dengan dekomposisi $\mathrm{H} = \mathrm{U}\sum \mathrm{V}^{\top}$ dan koreksi refleksi $\mathrm{S} = \mathrm{diag}\left(1,1,\mathrm{sgn}(\det \mathrm{U}\det \mathrm{V}^{\top})\right)$ untuk menjamin rotasi *proper* $(\det \mathrm{R}^* = +1)$, solusi optimal adalah:

$$\mathrm{R}^* = \mathrm{USV}^{\top},\ s^* = \sigma_p^{-2}\,\mathrm{tr}(\textstyle\sum \mathrm{S}),$$

$$\mathrm{t}^* = \mu_q - s^*\mathrm{R}^*\mu_p.$$

Transformasi 4×4 kemudian diterapkan secara konsisten pada seluruh berkas COLMAP: *cameras.bin* disalin tanpa perubahan; *images.bin* ditulis ulang dengan ekstrinsik baru $\mathrm{R}_{new} = \mathrm{R}_{cam}\mathrm{R}^{*\top}$ dan $\mathrm{C}_{new} = s^*\mathrm{R}^*\mathrm{C}_{old} + \mathrm{t}^*$; serta *points3D.bin* ditransformasi titik demi titik. Konsistensi proyeksi piksel terjaga sempurna sehingga *training* PGSR pada output COLMAP yang sudah ter-*align* menghasilkan *mesh* otomatis sejajar dunia.

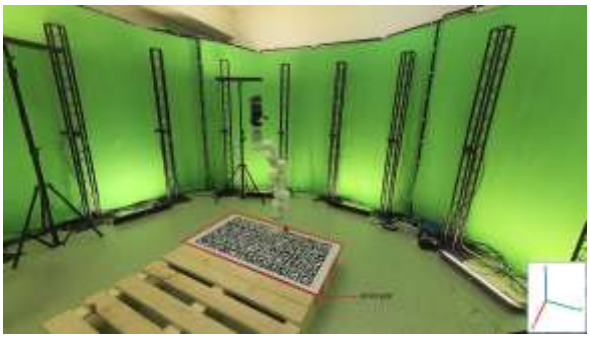
Sebagai pembanding, Solusi A dilakukan dengan rotasi *mesh* manual di CloudCompare. Solusi A bekerja sebagai *quick fix* tetapi tidak skalabel: setiap *scene* memerlukan operator manusia, sudut rotasi diestimasi visual sehingga tidak deterministik, dan model 3DGS sendiri tetap tidak ter-*align* (hanya *mesh* yang dikoreksi).

Implementasi *toolkit* menggunakan Python dengan dependensi minimal: NumPy untuk operasi aljabar linear, Open-CV (*opencv-contrib-python*) untuk deteksi ArUco, dan modul I/O biner COLMAP yang dikembangkan secara mandiri tanpa ketergantungan pada PyTorch. Hal ini memungkinkan eksekusi pada *node headless* tanpa GPU, mempermudah integrasi pada *continuous integration pipeline* laboratorium.

Tabel 1. Perbandingan Solusi A (*Post-Processing Cloud Compare*) dan Solusi B (COLMAP *Align Pre-Processing*)

Kriteria	Solusi A	Solusi B
Otomatisasi	Manual	Otomatis
Reprodusibilitas	Rendah	Tinggi
Tahap	*Post-process*	Praproses
Konsistensi GS	Tidak konsisten	Konsisten
Skalabilitas	Rendah	Tinggi
Akurasi	Visual	~1 mm

Validasi pada tiga *dataset* uji menghasilkan: AABB Isaac Sim menjadi kompak dan sejajar *mesh* visual; model 3DGS dan *mesh* berbagi *frame* dunia yang sama sehingga *overlay* konsisten; generasi data sintetis berhasil pada seluruh pengujian; serta reproduksi *alignment* dengan deviasi sudut <0,5° dan residual rata-rata ~1 mm pada 200+ gambar *training*. Sensitivitas terhadap ukuran sampel tergolong rendah: pada 80 gambar *training* pun residual tetap bertahan di bawah 2 mm, mengindikasikan keandalan pendekatan triangulasi *Multiview* terhadap kondisi data terbatas.



Gambar 9. *Setup* Papan Penanda Aruco yang Mendefinisikan *Frame* Dunia Melalui *Mount Markers* 17 dan 18

Refleksi Profesionalisme dan Keberlanjutan

Integrasi Isaac Sim dengan *toolkit* COLMAP Align menghasilkan *pipeline* R2S2R *fully-automated* setelah penempatan papan ArUco awal. Generasi data sintetis (200 episode *dropand-pickup*) tersimpan tanpa anomali *bounding box*, gaya kontak palsu, maupun pembekuan robot.



Gambar 10. Integrasi Isaac Sim Pasca-Penerapan Solusi B: AABB Sejajar *Mesh*

Studi ini menerapkan prinsip-prinsip yang termuat dalam UU 11/2014 tentang Keinsinyuran (Pasal 19) dan Kode Etik PII—*Catur Karsa Sapta Dharma* (PII, 2018). Dokumentasi transparan terhadap seluruh hipotesis (termasuk yang terbukti keliru, mis. *floater*) dan keterbukaan mengenai keterbatasan *toolkit* (ketergantungan pada visibilitas papan ArUco dalam gambar *training*) merupakan implementasi prinsip integritas ilmiah. Kompetensi keinsinyuran yang dilatih meliputi manajemen pekerjaan keinsinyuran, komunikasi efektif, pengelolaan informasi, dan kepemimpinan dalam pengambilan keputusan desain.

 ISSN 2987-677x

K3L laboratorium komputasi yang relevan: pengoperasian xArm6 dilakukan sesuai protokol keselamatan dengan tombol *emergency stop* selalu siap; eksperimen sintesis dijalankan pada mode visualisasi sebelum aktivasi fisika; dan *workstation* GPU dilindungi melalui *surge protector industrial grade* dan *grounding system* sesuai IEEE Std 142 (IEEE, 2007) dan CNS Taiwan untuk instalasi pembumian bangunan.

Kontribusi keberlanjutan dapat diuraikan pada tiga dimensi yang saling memperkuat. Pertama, rilis *toolkit open-source* di repositori *GitHub* publik dengan dokumentasi *README* lengkap mendukung target SDG 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur) (UN, 2015) melalui perancangan alat bantu rekayasa berbasis *neural rendering* bagi komunitas akademik dan industri. Kedua, penggantian eksperimen fisik berulang dengan generasi data sintetis Isaac Sim mengurangi konsumsi energi perangkat keras dan emisi karbon dari iterasi *asset* robot, sejalan dengan prinsip *green computing* dan SDG 12 (Konsumsi dan Produksi Bertanggung Jawab) (UN, 2015). Ketiga, perpanjangan masa pakai aset penelitian melalui simulasi merepresentasikan penerapan prinsip *circular economy* dalam riset robotika, di mana satu aset fisik dimanfaatkan untuk menghasilkan banyak skenario simulatif tanpa keausan tambahan.

Diskusi dan Generalisasi

Masalah ketidaksejajaran *frame* koordinat yang didokumentasikan tidak spesifik untuk PGSR maupun *setup* robotika tertentu. Setiap *pipeline* yang (a) menggunakan COLMAP atau alat SfM lain untuk pemulihan pose kamera, (b) menghasilkan *mesh* 3D atau *point cloud* berdasarkan pose tersebut, dan (c) mengimpor geometri ke simulator fisika berbasis AABB akan rentan terhadap kelas kegagalan yang sama. Hal ini mencakup *mesh* turunan NeRF (Mildenhall dkk., 2020), rekonstruksi MVS, dan berbagai *pipeline neural rendering*.

Berbagai kerangka kerja R2S2R kontemporer (Re3Sim, 2025; Robo-GSSim, 2024; GaussGym, 2025) telah mengidentifikasi penyelarasan *frame* sebagai tantangan rekayasa, tetapi sebagian besar memperlakukan tantangan ini secara implisit. *Toolkit* COLMAP *Align* mengisi kekosongan ini dengan menyediakan pendekatan berbasis penanda terstruktur yang dapat diintegrasikan ke dalam kerangka kerja apa pun di antara sistem-sistem tersebut. Pelajaran utama dari studi kasus ini bagi praktik keinsinyuran modern adalah pentingnya manajemen *frame* koordinat sebagai perhatian rekayasa kelas pertama dalam *pipeline* simulasi berbasis *neural rendering*, bukan sebagai pertimbangan sekunder.

Dari perspektif metodologi rekayasa, pendekatan eliminasi sistematis lima langkah yang dipraktikkan pada studi ini juga dapat ditransfer ke domain lain di mana kegagalan integrasi antarsubsistem sulit dilokalisasi. Pola umum, seperti memisahkan komponen secara bertahap, memvalidasi setiap subsistem secara independen, dan menyatukan temuan menjadi hipotesis akar penyebab merupakan keterampilan inti praktik keinsinyuran profesional yang dilatih dan didokumentasikan selama Praktik Keinsinyuran ini. Keterampilan ini sejalan dengan kompetensi yang ditetapkan dalam Kurikulum Profesi Insinyur, khususnya pada aspek kemampuan diagnosis sistem, pengelolaan informasi keinsinyuran, dan integritas dokumentasi teknis (UU 11/2014).

Implikasi etika dan tanggung jawab profesional juga signifikan. *Toolkit* yang dirilis sebagai *open-source* di bawah lisensi permisif menjamin bahwa kontribusi rekayasa ini dapat diaudit secara independen, dimodifikasi sesuai kebutuhan komunitas, dan dipertanggungjawabkan kepada siapa pun yang mempraktikkannya. Hal ini selaras dengan prinsip-prinsip transparansi yang termaktub dalam IEEE *Code of Ethics* dan ACM *Code of Ethics and Professional Conduct*, serta menegaskan komitmen terhadap reprodusibilitas riset sebagai pilar integritas ilmiah modern.

Kesimpulan

Studi kasus ini berhasil mendiagnosis dan menyelesaikan kegagalan sistemis pada *pipeline* R2S2R berbasis 3DGS yang muncul akibat *frame* koordinat arbiter COLMAP. Melalui metodologi eliminasi lima langkah, akar penyebab teridentifikasi sebagai ketidaksejajaran AABB *mesh* terhadap *world frame* Isaac Sim. Dua solusi divalidasi: rotasi manual di CloudCompare sebagai *quick fix* (solusi korektif), dan *toolkit* COLMAP Align praproses (solusi preventif) sebagai solusi sistematis dengan akurasi ~1 mm dan otomatisasi penuh.

Toolkit COLMAP Align direkomendasikan untuk *pipeline* produksi yang membutuhkan rekonstruksi *scene* otomatis bervolume tinggi, sementara CloudCompare dapat diterima sebagai perbaikan darurat untuk *scene* satu kali. Temuan ini berlaku umum pada setiap *pipeline* yang menggabungkan SfM dengan simulator fisika berbasis AABB. Kontribusi sejalan dengan SDG 9 melalui rilis *open-source* dan SDG 12 melalui pengurangan kebutuhan eksperimen fisik berulang.

Arah pengembangan ke depan mencakup ekstensi ke *Oriented Bounding Box* (OBB) untuk *mesh non-axis-aligned*, validasi skala metrik untuk simulasi *reinforcement learning* berbasis gaya/torsi, dan integrasi dengan kalibrasi *multi-board* untuk *scene* berskala besar.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Computer Graphics and Animation Laboratory (CGAL) National Taiwan University of Science and Technology atas akses fasilitas riset, National Tsing Hua University Computer Graphics and Vision Lab atas kolaborasi

 ISSN 2987-677x

diskusi mingguan, serta dosen pembimbing dan pembimbing lapangan atas arahan teknis selama pelaksanaan Praktik Keinsinyuran. Apresiasi disampaikan kepada Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas dukungan administratif dan akademis selama pelaksanaan studi kasus ini.

Referensi

Chen, D., Tang, F., Dong, W., Yao, H., & Xu, C. (2024). PGSR: Planar-based Gaussian Splatting Reconstruction. *arXiv preprint arXiv:2406.06521*.

Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., & Marín- Jiménez, M. J. (2014). Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*, 47(6), 2280–2292.

GaussGym Project (2025). *GaussGym: Gaussian Splatting Environments for Robot Reinforcement Learning*. Diunduh dari https://gaussgym.github.io/.

Institute of Electrical and Electronics Engineers (2007). *IEEE Std 142: Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*. New York: IEEE.

Kerbl, B., Kopanas, G., Leimkühler, T., & Drettakis, G. (2023). 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering. *ACM Transactions on Graphics*, 42(4), 139:1–139:14.

Mildenhall, B., Srinivasan, P. P., Tancik, M., Barron, J. T., Ramamoorthi, R., & Ng, R. (2020). NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 405–421.

NVIDIA Corporation (2024). *NVIDIA Isaac Sim 5.1 Documentation*. Diunduh dari https://docs.isaacsim.omniverse.nvidia.com/.

Persatuan Insinyur Indonesia (2018). *Kode Etik Insinyur Indonesia: Catur Karsa Sapta Dharma*. Jakarta: PII.

Re3Sim Consortium (2025). RE3SIM: Real-to-Sim-to-Real for Robotic Manipulation. *arXiv preprint arXiv:2502.08645*.

Robo-GSSim Project (2024). RoboGSim: A Real-to-Sim-to-Real Framework with Gaussian Splatting. *arXiv preprint arXiv:2411.11839*.

Schönberger, J. L., & Frahm, J.-M. (2016). Structure-from-Motion Revisited. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 4104–4113.

UFACTORY (2023). *xArm 6 User Manual* (rev. 2.4). Shenzhen: UFACTORY Technology Co., Ltd.

Umeyama, S. (1991). Least-Squares Estimation of Transformation Parameters Between Two Point Patterns. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(4), 376–380.

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2014 tentang Keinsinyuran (2014). Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2014 Nomor 49. Jakarta: Sekretariat Negara RI.

United Nations (2015). *Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. UN General Assembly Resolution A/RES/70/1, 25 September 2015.

 ISSN 2987-677x

Analisis Prediksi Sisa Umur Perkerasan Menggunakan Metode Mekanistik Empirik

Emil Padila

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas katolik Widya mandala Surabaya

[2] Program Studi Transportasi, Sekolah Tinggi Maritim Yogyakarta, Jl. Magelang, K.M 4,4, Sleman

✉ emilpadila@gmail.com

Analisis sisa umur perkerasan lentur sangat penting dalam manajemen aset jalan, karena berhubungan langsung dengan efektivitas pemeliharaan dan efisiensi biaya siklus hidup infrastruktur. Ruas Jalan Pejagan–Prupuk, bagian dari jaringan jalan nasional, mengalami beban lalu lintas tinggi, terutama kendaraan berat, yang mempercepat degradasi perkerasan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis prediksi sisa umur perkerasan menggunakan pendekatan mekanistik-empirik berbasis kondisi aktual. Metode yang digunakan mencakup *backcalculation* dengan ELMOD 6.0 terhadap data lendutan FWD untuk memperoleh modulus elastisitas tiap lapisan perkerasan. Modulus elastisitas tersebut digunakan dalam KENPAVE untuk menghitung respons tegangan dan regangan kritis. Prediksi kerusakan dilakukan dengan model *Asphalt Institute*, mencakup *fatigue cracking*, *rutting*, dan *permanent* deformation. Estimasi sisa umur dihitung menggunakan pendekatan AASHTO (1993) berdasarkan perbandingan kapasitas struktur dan beban lalu lintas kumulatif (CESA). Hasil analisis menunjukkan bahwa modulus elastisitas yang diperoleh dari *backcalculation* memberikan estimasi sisa umur yang lebih akurat. Variasi kinerja struktural antara ruas utara dan selatan juga ditemukan akibat perbedaan distribusi beban lalu lintas dan kondisi perkerasan. Pendekatan ini dapat digunakan sebagai dasar dalam penentuan strategi pemeliharaan yang lebih tepat sasaran.

Kata kunci: sisa umur perkerasan, mekanistik–empirik, KENPAVE, ELMOD, *backcalculation*, SDGs

Pendahuluan

Infrastruktur jalan adalah elemen krusial dalam sistem transportasi yang mendukung mobilitas manusia, distribusi barang, dan pertumbuhan ekonomi. Kondisi perkerasan jalan yang baik tidak hanya mempengaruhi kelancaran arus transportasi dan keselamatan pengguna, tetapi juga efisiensi biaya operasional kendaraan. Oleh karena itu, evaluasi kinerja perkerasan jalan sangat penting dalam manajemen infrastruktur transportasi untuk memastikan fungsi dan kapasitas struktural jalan tetap terjaga sepanjang umur rencananya (Tamagusko et al., 2024).

Seiring waktu, perkerasan jalan mengalami penurunan kinerja akibat beban lalu lintas yang kumulatif dan faktor lingkungan. Beban kendaraan yang berulang dapat menyebabkan kerusakan pada lapisan perkerasan, termasuk retak lelah, deformasi permanen, dan penurunan kekakuan material. Faktor lingkungan seperti temperatur dan kelembaban juga mempercepat degradasi perkerasan (Luo et al., 2023; Wang et al., 2024). Evaluasi kondisi perkerasan tradisional, yang mengandalkan pengamatan visual, memiliki keterbatasan dalam menggambarkan kondisi struktural secara menyeluruh. Oleh karena itu, metode mekanistik-empirik yang menggabungkan analisis mekanika struktur dan data empiris lapangan semakin penting (Qian et al., 2020).

Pendekatan mekanistik–empirik digunakan dalam analisis perkerasan karena menggabungkan mekanika material dengan model kerusakan empiris, yang memungkinkan perhitungan respons struktural seperti tegangan, regangan, dan lendutan akibat beban lalu lintas. Hal ini berguna untuk memprediksi kerusakan seperti retak lelah dan deformasi permanen serta memperkirakan umur layanan perkerasan secara lebih akurat (Wang et al., 2024; Shirzad et al., 2018; Zhao et al., 2018).

Analisis mekanistik-empirik ini memerlukan parameter modulus elastisitas yang diperoleh dari data lendutan menggunakan *Falling Weight Deflectometer* (FWD), sebuah metode non-destruktif yang mengukur respons lendutan perkerasan akibat beban dinamis. Data tersebut kemudian diproses dengan perangkat lunak ELMOD untuk menghitung modulus elastisitas dan digunakan dalam analisis struktural dengan KENPAVE, untuk memperkirakan kapasitas perkerasan dalam menahan beban lalu lintas selama masa pelayanan (Jiang et al., 2022; Tutka et al., 2024; Ngwira et al., 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sisa umur layanan perkerasan lentur pada Ruas Jalan Pejagan–Prupuk menggunakan metode mekanistik-empirik, dengan harapan dapat memberikan informasi penting dalam pengambilan keputusan terkait pemeliharaan dan rehabilitasi jalan. Dengan demikian,

 ISSN 2987-677x

penelitian ini mendukung Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya SDG 9 (*Industries, Innovation, and Infrastructure*), dengan berfokus pada pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan dan efisien, serta SDG 11 *(Sustainable Cities and Communities),* yang bertujuan untuk membuat kota dan pemukiman yang inklusif, aman, tahan bencana, dan berkelanjutan.

Metode

Lokasi dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian dilakukan pada ruas Jalan Pejagan–Prupuk, Kabupaten Brebes, sepanjang 1,80 km, bagian dari jalan nasional fungsi kolektor primer, dengan pengumpulan dan pengolahan data dari Mei–Juli 2024. Data lendutan diperoleh melalui pengujian FWD dari BBPJN Jawa Tengah–DIY, digunakan untuk menggambarkan respons struktural perkerasan dan sebagai *input backcalculation* modulus elastisitas. Pengumpulan data dilakukan secara terstruktur melalui studi dokumen, observasi lapangan, dan validasi dengan BBPJN, kemudian disusun sebagai input untuk analisis menggunakan ELMOD 6.0 dan KENPAVE guna memastikan akurasi dan keandalan hasil evaluasi. (Bina Marga, 2017; FHWA, 2017; AASHTO, 2008).

Metode Analisis

Metode analisis sisa umur perkerasan (RSL) dilakukan dengan dua pendekatan: *backcalculation* menggunakan ELMOD 6.0 dan metode mekanistik–empirik dengan KENPAVE. Modulus awal lapisan aspal ditentukan dari literatur dan disesuaikan dengan kondisi lingkungan. Proses *backcalculation* iteratif dilakukan hingga lendutan model mendekati hasil FWD. Data lalu lintas digunakan untuk menghitung ESAL, dan modulus hasil *backcalculation* digunakan untuk menghitung regangan tarik dan tekan yang dibandingkan dengan batas izin. RSL dihitung dengan membandingkan kapasitas repetisi beban perkerasan dengan beban lalu lintas kumulatif; jika beban aktual lebih kecil, perkerasan masih memiliki umur sisa.

Hasil Kerja

Analisis Lalu Lintas

Data volume lalu lintas pada ruas Jalan Pejagan–Prupuk, Kabupaten Brebes, Jawa Tengah, diperoleh dari BBPJN Jawa Tengah–D.I. Yogyakarta sebagai data sekunder. Rekapitulasi proyeksi jumlah kendaraan tahunan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Rencana Jumlah Kendaraan Setiap Tahun

Tahun Ke-	CESA 5 (ESAL)	Tahun Ke-	CESA 5 (ESAL)
1	1.850.754	11	28.150.267
2	3.818.106	12	31.774.488
3	5.909.401	13	35.627.036
4	8.132.448	14	39.722.293
5	10.495.547	15	44.075.552
6	13.007.521	16	48.703.066
7	15.677.749	17	53.622.114
8	18.516.201	18	58.851.061
9	21.533.476	19	64.409.433
10	24.740.840	20	70.317.981

Analisis Backcalculation Menggunakan ELMOD 6.0

Evaluasi kondisi struktural perkerasan dilakukan melalui analisis *backcalculation* menggunakan ELMOD 6.0 untuk memperoleh modulus elastisitas tiap lapisan berdasarkan data lendutan FWD. Nilai ini digunakan sebagai parameter utama dalam analisis mekanistik selanjutnya.

1. Kriteria Evaluasi

Hasil *backcalculation* dievaluasi menggunakan nilai RMS dan *reasonable moduli*. RMS menunjukkan tingkat kesesuaian antara lendutan model dan lapangan, dengan batas yang direkomendasikan sebesar 2–3% (FHWA, 2017). Sementara itu, *reasonable moduli* terpenuhi jika nilai modulus berada pada rentang 0,25–5 kali *seed moduli*, sehingga tetap realistis sesuai karakteristik material. Batas kriteria ini disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. *Reasonable Moduli*

Lapis	*Seed moduli* (MPa)	0,25 × Seed (MPa)	5 × Seed (MPa)
HMA	1550	387,5	7750
Base	500	125	2500
Subbase	200	50	1000
Subgrade	62	15,5	310

2. Hasil Analisis *Backcalculation*

Analisis *backcalculation* dilakukan dengan analisis *backcalculation* dilakukan dengan metode *deflection basin fit* pada ELMOD 6.0 menggunakan data lendutan FWD beban jatuh kedua. Hasilnya berupa *backcalculated moduli*, nilai RMS, dan evaluasi reasonable moduli pada tiap titik uji. Validasi dilakukan berdasarkan nilai RMS dan *reasonable moduli*, dengan ringkasan hasil pada Tabel 3 (utara) dan Tabel 4 (selatan).

 ISSN 2987-677x

Tabel 3. Analisis Error *Backcalculated Moduli* Ruas Utara

No	STA	HMA (MPa)	*Base (MPa)*	*Subbase (MPa)*	*Subgrade (MPa)*	RMS	RMS*	*Reasonable Moduli*
1	0	2441,76	2583,82	8,95	247,77	75,4	TM	TM
2	225	896,81	707,35	118,38	70,22	3,2	M	M
3	450	902,62	718,76	167,49	87,00	3,4	M	M
4	675	1148,86	582,84	137,86	69,81	3,1	M	M
5	900	797,16	425,15	116,92	68,97	3,4	M	M
6	1125	907,88	657,56	180,83	69,60	3,1	M	M
7	1350	874,39	466,34	129,54	70,30	3,1	M	M
8	1575	1232,92	486,17	137,78	71,15	3,3	M	M
9	1800	984,15	524,88	160,38	70,89	3,2	M	M

Tabel 4. Analisis Error *Backcalculated Moduli* Ruas Selatan

No	STA	HMA (MPa)	*Base (MPa)*	*Subbase (MPa)*	*Subgrade (MPa)*	RMS	RMS*	*Reasonable Moduli*
1	0	3191,64	97,26	24,32	59,36	164,6	TM	TM
2	228	843,80	368,94	173,32	65,58	2,1	M	M
3	453	1359,95	600,29	259,91	66,22	3	M	M
4	677	1101,70	694,98	282,64	74,38	2,3	M	M
5	904	823,73	382,64	116,92	68,87	3,1	M	M
6	1123	1115,83	774,28	239,58	73,70	3	M	M
7	1352	1049,46	948,52	317,13	84,36	3,1	M	M
8	1580	811,40	435,62	106,32	70,96	3,4	M	M
9	1798	912,97	380,73	156,48	67,00	2,2	M	M

Keterangan:
M = Memenuhi, TM = Tidak Memenuhi

Analisis Sisa Umur Perkerasan Menggunakan Metode Mekanistik–Empirik dengan Program KENPAVE

Program KENPAVE menghasilkan respons mekanistik berupa tegangan dan regangan pada berbagai kedalaman lapisan perkerasan. Hasil analisis untuk ruas utara disajikan pada Tabel 5.

Parameter untuk Kontrol Prediksi Sisa Umur Jalan

1. Prediksi kerusakan *fatigue cracking*

Kerusakan *fatigue* dipengaruhi oleh *horizontal tensile strain* atau regangan tarik kritis yang berada di bawah lapisan permukaan HMA. Perhitungan untuk *single axle dual tire* diperoleh menggunakan persamaan:

Nf = 0,0796 (Ɛt) − 3,921|E| − 0,854
Nf = 0,0796 (1,340 x 10-4) − 3,921|912500| − 0,854
Nf = 991.964.842 ESAL

2. Prediksi kerusakan *rutting*

Kerusakan *rutting* dapat diprediksi menggunakan *output* dari program KENPAVE dengan memperhatikan *vertical compresive strain* di bawah lapisan HMA. Perhitungan untuk *single axle dual tire* adalah sebagai berikut.

Nr = 1,365 x 10-9 (Ɛc) − 4,477
Nr = 1,365 x 10-9 (1,939 x 10-4) − 4,477
Nr = 56.970.076 ESAL

3. Prediksi kerusakan deformasi permanen

Kerusakan berupa *permanent deformation* dipengaruhi oleh *vertical compresive strain* yang berada di atas lapisan *subgrade*. Perhitungan nilai kerusakan *permanent deformation* menggunakan persamaan Prediksi nilai *permanent* dengan jenis kendaraan *single axle dual tire* adalah sebagai berikut.

Nd = 1,365 x 10-9 (Ɛc) − 4,477
Nd = 1,365 x 10-9 (2,101 x 10-4) − 4,477
Nd = 39.776.925 ESAL

Analisis Remaining Service Life

Analisis *remaining service life* (RL) dilakukan berdasarkan prediksi kerusakan *fatigue, rutting*, dan *permanent deformation* rincian proses dan hasil analisis disajikan pada Tabel 6.

Tabel 5. Hasil Analisis Tegangan dan Regangan Ruas Utara

Beban	*Horizontal Tensile Strain* (εt) pada kedalaman 22,498 cm	*Vertical Compressive Strain* (εc) pada kedalaman 22,498 cm	*Vertical Compressive Strain* (εc) pada kedalaman 52,502 cm
Nilai maksimum	$-1{,}277 \times 10^{-4}$	$1{,}871 \times 10^{-4}$	$2{,}041 \times 10^{-4}$
Nilai maksimum	$-1{,}340 \times 10^{-4}$	$1{,}939 \times 10^{-4}$	$2{,}101 \times 10^{-4}$

Tabel 6. Rekapitulasi Perhitungan Sisa Umur

Road Name	*Segment*	*Fatigue Cracking*		*Rutting*		*Permanent deformation*	
		Failure	*RSL*	*Failure*	*RSL*	*Failure*	*RSL*
Pejagan-Prupuk	*Northern*	57	56	18	17	15	14
	Southern	60	59	20	19	16	15

 ISSN 2987-677x

Kajian Etika

Penelitian ini mencerminkan kejujuran dan integritas melalui penggunaan data resmi BBPJN Jawa Tengah–DIY, validitas FWD dengan RMS <3%, serta analisis transparan dan objektif yang dapat dipertanggungjawabkan. Dalam tanggung jawab lingkungan, penelitian mendukung keberlanjutan infrastruktur jalan dengan evaluasi sisa umur perkerasan secara mekanistik–empirik, memanfaatkan metode non-destruktif (FWD) dan pemodelan numerik (ELMOD, KENPAVE) untuk meminimalkan dampak lingkungan. Untuk kepatuhan terhadap hukum, peraturan, dan standar, penelitian mengikuti pedoman nasional dan internasional, termasuk Bina Marga (2017), AASHTO (1993), FHWA (2017), dan teori elastis berlapis Huang (2004), sehingga analisis sistematis, transparan, dan dapat diverifikasi untuk mendukung praktik profesional rekayasa perkerasan jalan.

Kajian Keselamatan, Kesehatan Kerja, dan Lingkungan

Penelitian ini berlandaskan hukum dan kebijakan, termasuk UU No. 1 Tahun 1970, PP No. 50 Tahun 2012, serta standar ISO 45001:2018 dan ISO 14001:2015, dengan prosedur pengumpulan data yang sah dan terdokumentasi. Risiko utama seperti kesalahan interpretasi data FWD, parameter *input* tidak tepat, inkonsistensi satuan, dan kehilangan data dikendalikan melalui verifikasi silang, pengecekan satuan, dokumentasi, dan sistem *backup*. Risiko kesehatan kerja akibat beban kognitif selama analisis ELMOD dan KENPAVE dikendalikan melalui pengaturan waktu, jeda, dan verifikasi ulang hasil. Dari sisi lingkungan, penelitian menggunakan metode non-destruktif dan analisis komputasional tanpa menghasilkan limbah atau gangguan, mendukung prinsip keberlanjutan. Evaluasi menunjukkan tidak ada insiden K3L atau dampak lingkungan, dengan rekomendasi ke depan fokus pada penguatan kontrol kualitas, dokumentasi teknis, dan sistem manajemen data serta audit internal untuk meningkatkan akuntabilitas.

Kajian Profesionalisme

Kajian profesionalisme pada penelitian ini menekankan integrasi antara pedoman nasional dan internasional dengan kompetensi teknis. Analisis kinerja perkerasan jalan dilakukan menggunakan Manual Desain Perkerasan Jalan 2017 (CESA), data LHR, dan faktor pertumbuhan, serta dievaluasi secara struktural melalui *backcalculation* FWD dengan ELMOD 6.0 dan pemodelan mekanistik KENPAVE. Respons regangan digunakan untuk memprediksi kerusakan *fatigue*, *rutting*, dan sisa umur perkerasan berdasarkan *Asphalt Institute* dan AASHTO. Pemetaan relevansi kompetensi menunjukkan bahwa pengetahuan, seperti teori elastisitas berlapis, model fatik, kerangka desain struktural, backcalculation FWD, dan parameter struktur perkerasan, mendukung pemahaman konsep dasar dan evaluasi kapasitas struktural. Keahlian, termasuk iterasi *seed* modulus, pemodelan regangan kritis, verifikasi silang, kontrol mutu, serta dokumentasi teknis dan akuntabilitas, memastikan konsistensi hasil, kepatuhan terhadap standar profesi, dan kemampuan menerapkan teori ke praktik lapangan secara transparan dan profesional.

Aspek Keberlanjutan

Analisis prediksi sisa umur perkerasan mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs 9, 11, dan 13) dengan meningkatkan efisiensi ekonomi, keselamatan sosial, dan keberlanjutan lingkungan. Secara ekonomi, pemeliharaan berbasis kondisi aktual menurunkan biaya pemeliharaan dan operasi kendaraan. Secara sosial, kualitas jalan yang baik meningkatkan keselamatan, kenyamanan, dan kelancaran mobilitas. Secara lingkungan, perkerasan yang terawat mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi akibat berkendara tidak teratur. Integrasi metode ELMOD dan KENPAVE meningkatkan akurasi prediksi teknis sekaligus mendukung pengelolaan infrastruktur jalan yang efisien, aman, dan berkelanjutan.

Kesimpulan

Berdasarkan analisis *backcalculation*, mekanistik-empirik, dan prediksi sisa umur perkerasan pada Jalan Pejagan–Prupuk, diperoleh hasil bahwa nilai material *properties* dari *backcalculation* menggunakan ELMOD 6.0 memenuhi kriteria moduli yang wajar dan batas RMS, sehingga dapat digunakan sebagai parameter kondisi struktural perkerasan eksisting. Analisis mekanistik-empirik dengan KENPAVE menunjukkan adanya regangan tarik pada lapisan aspal dan regangan tekan pada tanah dasar, dengan perbedaan antara ruas utara dan selatan yang mencerminkan variasi kondisi struktural akibat beban lalu lintas. Prediksi sisa umur perkerasan berdasarkan parameter kerusakan Asphalt Institute dan perhitungan AASHTO 1993 mengindikasikan bahwa ruas dengan regangan kritis lebih tinggi memiliki tingkat konsumsi umur yang lebih cepat, menghasilkan sisa umur yang lebih rendah.

Referensi

AASHTO. (1993). *AASHTO guide for design of pavement structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

Bina marga. (2017). *Manual desain perkerasan jalan No-04/SE/Db/2017*.

Dynatest. (2016). *Elmod 6 quick start manual*.

FHWA. (2017). *Using falling weight deflectometer data with mechanistic-empirical design and analysis, volume III: Guidelines for deflection*.

Fu, G., Wang, J., Zhao, Y., Cao, D., Wu, F., & Sha, D. (2024). Development of a prediction model of dynamic deflections for asphalt pavements under FWD impulse loading. *Construction and Building Materials,425*.https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135944

 ISSN 2987-677x

Hatmoko, J. U. D., & Lendra, L. (2021). Quantifying energy consumption and greenhouse gass emissions of construction projects: A case study of Semarang-Bawen road project. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1072*(1), 012070. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1072/1/012070

Huang, Y. H. (Yang H. (2004). *Pavement analysis and design*. Pearson/Prentice Hall.

Jiang, X., Gabrielson, J., Huang, B., Bai, Y., Polaczyk, P., Zhang, M., Hu, W., & Xiao, R. (2022). Evaluation of inverted pavement by structural condition indicators from falling weight deflectometer. *Construction and Building Materials, 319*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125991

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga 2017. (2017). *Manual Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017.*

Li, L., Guo, E., Lin, Y., & He, Z. (2023). A design method on durable asphalt pavement of flexible base on anti-rutting performance and its application. *Materials, 16*(22). https://doi.org/10.3390/ma16227122

Lia, N., & Mahardi, P. (2022). Evaluasi kinerja struktur perkerasan jalan lentur menggunakan aplikasi KENPAVE. *Rekayasa Teknik Sipil, 2*, 1–10.

Luo, X., Wang, H., Cao, S., Ling, J., Yang, S., & Zhang, Y. (2023). A hybrid approach for fatigue life prediction of in-service asphalt pavement. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 381*(2254). https://doi.org/10.1098/rsta.2022.0174

Maharani, A., & Budi Wasono, S. (2018). Perbandingan perkerasan kaku dan perkerasan lentur (Studi kasus ruas Jalan Raya Pantai Prigi-Popoh Kab. Tulungagung). *Ge-STRAM: Jurnal Perancangan Dan Rekayasa Sipil, 1*, 89–94.

Nabipour, N., Karballaeezadeh, N., Dineva, A., Mosavi, A., Mohammadzadeh S., D., & Shamshirband, S. (2019). Comparative Analysis of Machine Learning Models for Prediction of Remaining Service Life of Flexible Pavement. *Mathematics, 7*(12). https://doi.org/10.3390/MATH7121198

Ngwira, C., Otto, A., Chilonda, P., Chilukwa, N., & Mwale, A. (2024). Estimation of pavement layer moduli of thin-sealed roads for use in pavement management systems. *Journal of Construction Project Management and Innovation, 14*(1), 45–56. https://doi.org/10.36615/eytza981

Pambudi, M. F. K., Sunarjono, S., & Harnaeni, S. R. (2024). Evaluasi umur sisa perkerasan kaku pada ruas Jalan Tol Solo-Ngawi. *PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmedewa, 13,* 1–10. https://doi.org/10.22225/pd.12.1.8925.1-10

Purwahono, F. P., & Solichin, I. (2023). Analisa pengaruh beban kendaraan terhadap sisa umur rencana jalan dengan metode Bina Marga 2017 pada ruas Jalan Brigjend Katamso – Jalan Raya Berbek - Jalan Raya Wadung Asri (STA 0+000 – STA 5+000). *INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research*, 9919–9933.

Qian, G., Hu, C., Yu, H., & Gong, X. (2020). Case study: Ten year field performance evaluation of flexible base asphalt pavement design in heavy load condition. *Journal of Materials in Civil Engineering, 32*(7). https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003268

Rahmawati, A., & Adiyasa, M. (2021). Analysis of remaining service life for flexible pavement using mechanistic-empirical methods. *International Journal of GEOMATE, 21*(85), 145–153. https://doi.org/10.21660/2021.85.j2203

Rahmawati, R. (2022). *Prediksi kerusakan dan sisa umur perkerasan lentur dengan metode mekanistik-empirik dan backcalculation* [Undergraduate thesis, Universitas Gadjah Mada].

Sumarsono, A., & Fauziah, M. (2022). Evaluasi kondisi perkerasan, penanganan dan nilai sisa perkerasan lentur jalan dengan metode Bina Marga 2013 dan metode mekanistik empirik (Studi kasus: Jalan Jogja-Solo Km 14+800-16+800). *Jurnal Teknik, 9*, 10–27.

Tamagusko, T., Gomes Correia, M., & Ferreira, A. (2024). Machine learning applications in road pavement management: A review, challenges and future directions. *Infrastructures, 9*(12). https://doi.org/10.3390/infrastructures9120213

The Asphalt Institue. (1982). *Research and development of The Asphalt Institute's thickness design manual (MS-1)* (9th ed).

Tjan, A. (2021). Evaluasi prediksi umur sisa perkerasan lentur metode pedoman.

Tutka, P., Nagórski, R., & Złotowska, M. (2024). The impact of dynamic effects on the results of non-destructive falling weight deflectometer testing. *Materials, 17*(17). https://doi.org/10.3390/ma17174412

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2014 Tentang Keinsinyuran, Pub. L. 11, Sekretariat Negara Republik Indonesia (2014). https://peraturan.bpk.go.id/Details/38602

Utami, R. V. (2022). *Evaluation of pavement condition and remaining life based on pci and mechanical-empirical method by using*.

Varela, V. L. R., & Orozco, G. F. J. (2021). An overview of asphalt pavement design for streets and roads. *Revista Facultad de Ingenieria, 98,* 1–17. https://doi.org/10.17533/udea.redin.20200367

Wang, D., Luo, C., Li, J., & He, J. (2024). Study on dynamic modulus prediction model of in-service asphalt pavement. *Buildings, 14*(8). https://doi.org/10.3390/buildings14082550

Zhao, Y., Alae, M., & Fu, G. (2018). Investigation of mechanisms of top-down fatigue cracking of asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design, 19*(6), 1436–1447. https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1303394.

 ISSN 2987-677x

Rekayasa Hidraulika Saluran *Outlet*: Analisis Kapasitas dan *Bottleneck* pada Sistem Pembuangan Tambak Udang Intensif Berwawasan Berkelanjutan

Kasih Adi Ngumbara[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ kasih@terrastruct.id

Sistem saluran *outlet* pada tambak udang intensif merupakan komponen rekayasa hidraulika kritis yang menentukan efisiensi operasional panen sekaligus mendukung pengelolaan air limbah akuakultur secara berkelanjutan sesuai SDG 6 dan SDG 14. Studi ini mengevaluasi performa rekayasa sistem *outlet* eksisting berdiameter 12 inci di Tambak Penyampa, Kab. Polewali Mandar, Sulawesi Barat. Metodologi mencakup analisis hidraulika fluida: Perhitungan debit aliran, evaluasi kehilangan energi menggunakan persamaan *Darcy-Weisbach*, dan identifikasi bottleneck sistem. Hasil analisis menunjukkan kapasitas aktual pipa eksisting (Ø12 inci, 634 m) hanya 472 m³/jam, jauh di bawah kebutuhan debit panen 2.600 m³/jam (Rasio Beban = 5,5×). Total *head loss* 8,20 m melampaui *head* tersedia gravitasi (2,0–2,7 m) sehingga terjadi defisit energi 5,50–6,20 m. Direkomendasikan sistem *hybrid*: Saluran terbuka 1,5×0,8 m (kapasitas 2,41× kebutuhan) dikombinasikan pompa paralel 90–100 HP.

Kata kunci: rekayasa hidraulika, saluran *outlet* tambak, *bottleneck*, *head loss*, debit aliran, keberlanjutan akuakultur

Pendahuluan

Sektor budidaya udang intensif Indonesia menyumbang kontribusi signifikan terhadap devisa negara, namun keberhasilan produksi sangat bergantung pada kualitas infrastruktur rekayasa hidraulika tambak. Dalam konteks Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*/SDGs), khususnya SDG 6 (Air Bersih dan Sanitasi) dan SDG 14 (Ekosistem Lautan), pengelolaan sistem pembuangan air tambak yang efisien dan bertanggung jawab terhadap lingkungan menjadi keniscayaan. Rekayasa saluran *outlet* yang tepat secara langsung berkontribusi pada pengendalian kualitas air, pengolahan limbah budidaya, dan perlindungan ekosistem perairan sekitar.

Urgensi kajian rekayasa saluran *outlet* tambak semakin mendesak mengingat meningkatnya intensifikasi produksi udang nasional. Data Kementerian Kelautan dan Perikanan menunjukkan luas tambak udang intensif terus bertumbuh, namun infrastruktur pendukungnya acap kali tidak dirancang dengan analisis hidraulika yang memadai. Kegagalan sistem saluran outlet bukan sekadar persoalan teknis operasional ia berdampak langsung pada kematian massal biota, kerugian ekonomi jutaan rupiah per siklus panen, potensi pencemaran lingkungan, serta ketidakpatuhan terhadap regulasi K3L yang berlaku. Dengan demikian, rekayasa saluran *outlet* yang valid secara hidraulika merupakan kewajiban profesional seorang Insinyur di bidang akuakultur.

Tambak Penyampa, Kabupaten Polewali Mandar, Sulawesi Barat, merupakan representasi konkret permasalahan tersebut. Sistem *outlet* berbasis satu jalur pipa PVC Ø12 inci sepanjang ±634 m melayani 15 kolam budidaya secara simultan. Pada fase panen, kebutuhan debit pembuangan melonjak drastis melampaui kapasitas saluran eksisting, menciptakan kondisi *bottleneck* yang menghambat seluruh siklus operasional. Kondisi ini memerlukan evaluasi teknis sistematis dan solusi rekayasa yang terstruktur.

Studi ini bertujuan untuk: (1) mengevaluasi kapasitas hidraulika aktual saluran *outlet* eksisting; (2) menghitung kebutuhan debit pembuangan operasional panen berdasarkan volume kolam dan target waktu; (3) mengidentifikasi dan mengkuantifikasi faktor-faktor bottleneck sistem; (4) mengevaluasi alternatif solusi rekayasa; dan (5) merumuskan rekomendasi teknis optimal yang memenuhi standar keinsinyuran, keselamatan, dan keberlanjutan lingkungan.

Metode

Studi dilaksanakan di Tambak Penyampa, Kab. Polewali Mandar, Sulawesi Barat pada periode Januari–April 2026. Data dikumpulkan melalui: (1) observasi lapangan konfigurasi jaringan *outlet*; (2) kajian dokumen desain dan spesifikasi saluran; serta (3) pengambilan parameter teknis hidraulika (diameter, panjang, elevasi, aksesori pipa).

Analisis hidraulika dilaksanakan menggunakan persamaan kontinuitas Q = A × v untuk kapasitas debit, persamaan *Darcy-Weisbach* untuk major *head loss*, koefisien K untuk minor *head loss*, dan Persamaan *Manning* untuk kapasitas saluran terbuka. Komparasi kapasitas vs kebutuhan (gap analysis) dilakukan dengan menghitung Rasio Beban (R = Q *demand* / Q kapasitas) pada setiap skenario panen harian.

Hasil Kerja

Kondisi Eksisting dan Kapasitas Saluran

Sistem saluran *outlet* menggunakan konfigurasi jaringan terpusat (*centralized*) dengan pipa utama Ø12 inci (PVC) menampung aliran dari 15 pipa kolam Ø8 inci.

 ISSN 2987-677x

Jalur kritis terdiri dari Pipa 2 (±234 m, ~10 kolam) dan Pipa 4 (±400 m menuju IPAL), total panjang ±634 m, berbasis gravitasi murni tanpa bantuan mekanis. Tabel 1 merangkum karakteristik teknis sistem saluran outlet eksisting.

Tabel 1. Karakteristik Sistem Saluran *Outlet* Eksisting

Parameter	Nilai	Satuan
Ø Pipa Utama	12 (0,305)	inci (m)
Panjang Jalur Kritis	634	m
Elev. Permukaan Kolam	+1,30	m
Elev. IPAL Surut	-1,40	m
Elev. IPAL Pasang	-0,70	m
Jumlah Kolam	15	kolam

Kapasitas teoritis pipa dengan $A = \pi/4 \times (0{,}305)^2 = 0{,}073$ m² dan kecepatan gravitasi v = 1,8 m/s:

$$Q_{maks} = A \times v = 0{,}073 \times 1{,}8 = 0{,}131 \text{ m}^3/\text{s} = 472 \text{ m}^3/\text{jam}$$

Kebutuhan Debit dan *Gap Analysis*

Total volume air 15 kolam (tinggi air 1,3 m) = 30.165 m³. Berdasarkan skema panen 4 hari (3–4 kolam/hari), kebutuhan debit puncak terjadi pada Hari 2 dengan 4 kolam bervolume 10.400 m³. Tabel 2 menyajikan kebutuhan debit pembuangan dan Rasio Beban per hari panen:

Tabel 2. Kebutuhan Debit Pembuangan dan Rasio Beban Per Hari Panen

Hari	Volume (m³)	Q *demand* (t=4 jam)	Q *demand* (t=3 jam)	Rasio (t=4j)
1	6.565	1.641 m³/j	2.188 m³/j	3,5×
2	10.400	2.600 m³/j	3.467 m³/j	5,5×
3	9.230	2.308 m³/j	3.077 m³/j	4,9×
4	4.420	1.105 m³/j	1.473 m³/j	2,3×

Kapasitas eksisting (472 m³/jam) defisit pada semua skenario, dengan Rasio Beban minimum 2,3× dan maksimum 7,3× membuktikan kegagalan sistemik yang fundamental.

Analisis Kehilangan Energi dan Identifikasi *Bottleneck*

Dengan Re = 548.640 (aliran turbulen penuh) dan faktor gesekan Darcy f = 0,018 (pipa PVC baru), diperoleh major *head loss*:

$$h_f = f \times (L/D) \times (v^2/2g) = 0{,}018 \times (634/0{,}305) \times (1{,}8^2/19{,}62) = 6{,}17 \text{ m}$$

Inventarisasi aksesori (2 *elbow* 90°: K=1,8; 10 *elbow* 45°: K=4,0; 5 tee: K=5,0; *inlet+outlet*: K=1,5; ΣK=12,3) menghasilkan minor *head loss*:

$$h_m = \Sigma K \times (v^2/2g) = 12{,}3 \times 0{,}165 = 2{,}03 \text{ m}$$

$$h_{total} = h_f + h_m = 6{,}17 + 2{,}03 = 8{,}20 \text{ m}$$

Tabel 3 menampilkan neraca energi sistem saluran *outlet* gravitasi pada kondisi surut dan pasang:

Tabel 3. Neraca Energi Sistem Saluran *Outlet* Gravitasi

Kondisi IPAL	Hs Tersedia	htotal	Defisit Energi	Status
Surut	2,70 m	8,20 m	5,50 m	Kritis
Pasang	2,00 m	8,20 m	6,20 m	Kritis

Energi gravitasi hanya mengompensasi 24–33% dari total *head loss*. Empat faktor *bottleneck* teridentifikasi secara hierarkis: (1) keterbatasan geometrik Ø12 inci; (2) hambatan friksi tinggi akibat panjang 634 m; (3) defisit energi hidraulika fundamental; dan (4) *tailwater effect* dari fluktuasi pasang surut.

Evaluasi Alternatif dan Rekomendasi Solusi Rekayasa

Tiga alternatif solusi rekayasa dievaluasi secara komprehensif:

a. Peningkatan diameter pipa: Simulasi menunjukkan Ø18 inci hanya mampu 1.062 m³/jam masih defisit 1.538 m³/jam. *Bottleneck* utama adalah neraca energi, bukan dimensi geometrik. Tidak efektif sebagai solusi tunggal.
b. Sistem pemompaan: *Head* pompa yang diperlukan Hp = 8,20 – 2,0 = 6,20 m. Kebutuhan daya (Q = 0,722 m³/s, η = 0,70): P = (1000 × 9,81 × 0,722 × 6,2) / 0,70 ≈ 84 HP. Dengan *safety factor* → kapasitas total 90–100 HP.
c. Transformasi ke saluran terbuka: Saluran persegi panjang b=1,5 m, h=0,8 m (*Manning* n=0,015; S=0,001):

$$Q = (1/n) \times A \times R^{(2/3)} \times S^{(1/2)} = 1{,}74 \text{ m}^3/\text{s} = 6.264 \text{ m}^3/\text{jam (rasio 2,41×)}$$

Tabel 4 merangkum perbandingan ketiga alternatif solusi rekayasa tersebut:

Tabel 4. Perbandingan Alternatif Solusi Rekayasa

Alternatif	Kapasitas	Rasio vs Target	Efektivitas
Pipa Ø12" (eksisting)	472 m³/jam	0,18×	Gagal
Pipa Ø18"	1.062 m³/jam	0,41×	Tidak Cukup
Saluran Terbuka 1,5×0,8 m	6.264 m³/jam	2,41×	Memenuhi
Pompa 2×50 HP	2.600 m³/jam	1,00×	Memenuhi

Solusi terpilih adalah sistem *hybrid* yang mengintegrasikan saluran terbuka (transmisi utama) dengan pompa paralel (*booster*). Tabel 5 menyajikan spesifikasi teknis sistem *hybrid* yang direkomendasikan:

Tabel 5. Spesifikasi Teknis Sistem *Hybrid* yang Direkomendasikan

Komponen	Spesifikasi	Fungsi
Saluran Terbuka	1,5×0,8 m (beton cor)	Eliminasi bottleneck geometrik & friksi
Pompa Paralel	2×50 HP atau 3×35 HP	Jaminan debit saat tailwater tinggi
Mekanisme	Gravitasi + pompa (hybrid)	Efisiensi energi & reliabilitas operasional

Kajian Etika Keinsinyuran, K3L, dan Keberlanjutan

Etika Profesional dan Integritas

Studi ini mengimplementasikan kode etik profesional sesuai Kode Etik Insinyur Indonesia (PII,

 ISSN 2987-677x

2021) melalui tiga pilar: (1) transparansi asumsi rekayasa, yaitu seluruh parameter yang tidak tersedia secara langsung di lapangan (koefisien kekasaran pipa, koefisien kehilangan energi minor, kondisi aliran aktual) dijelaskan secara eksplisit; (2) objektivitas penyajian kegagalan sistemik, dimana temuan head loss 8,20 m yang melampaui *head* tersedia disajikan apa adanya tanpa manipulasi data; dan (3) pengakuan keterbatasan analisis sebagai bentuk akuntabilitas ilmiah sesuai prinsip NSPE (2019) dan UU No. 11/2014 tentang Keinsinyuran.

Integritas profesional ditunjukkan dengan tidak memaksakan solusi yang secara teoretis mungkin (perbesaran diameter pipa saja) namun secara praktis tidak menyelesaikan masalah. Rekomendasi sistem hybrid dipilih karena lebih realistis meskipun memerlukan perubahan mekanisme aliran yang mendasar. Kepatuhan teknis mengacu pada PP No. 25/2019 tentang Penyelenggaraan Keinsinyuran dan standar perhitungan hidraulika universal.

Identifikasi Bahaya dan Pengendalian Risiko (HIRA)

Analisis HIRA dilakukan menggunakan matriks 5x5 dengan parameter *Likelihood* (L) dan *Severity* (S). Pada kondisi eksisting, risiko *overflow* dan kegagalan aliran akibat *bottleneck* bernilai R = 16 (Tinggi). Pasca implementasi sistem *hybrid*, risiko diproyeksikan turun menjadi 4 (Rendah) karena kapasitas sistem berada 2,41x di atas target debit puncak. Tabel 6 merangkum identifikasi bahaya utama pada sistem saluran *outlet*.

Tabel 6. Rekapitulasi Risiko Utama Sistem Saluran *Outlet* (HIRA)

Bahaya Utama	Penyebab	R Awal	R Akhir	Pengendalian Rekomendasi
Overflow saat panen	Kapasitas pipa tidak mencukupi	16 (T)	4 (R)	Perbesar saluran + pompa paralel
Terpeleset area *outlet*	Permukaan basah dan licin	12 (T)	4 (R)	Sepatu anti-slip, perbaikan akses
Paparan limbah organik	Air tambak kaya bahan organik	9 (S)	4 (R)	Sarung tangan, *boots*, APD
Kegagalan aliran (*backflow*)	*Head loss* tinggi + *tailwater*	16 (T)	4 (R)	Optimasi desain hidraulik
Luapan limbah ke IPAL	Debit masuk melebihi kapasitas	15 (T)	4 (R)	Kontrol debit + *buffer system*

Hierarki pengendalian risiko diterapkan secara sistematis: eliminasi, rekayasa teknik (*engineering control*), administratif, hingga APD. Kajian K3L mengacu pada UU No. 1/1970 (Keselamatan Kerja), PP No. 50/2012 (SMK3), ISO 45001:2018, dan ISO 14001:2015.

Tanggung Jawab Lingkungan dan Keberlanjutan

Sistem *hybrid* menstabilkan aliran ke IPAL, mencegah akumulasi limbah organik melalui dekomposisi anaerobik, dan memfasilitasi aerasi alami pada saluran terbuka yang meningkatkan *dissolved oxygen* (DO) air buangan sebelum mencapai badan air penerima. Tabel 7 merangkum kontribusi solusi terhadap tiga dimensi keberlanjutan (*Triple Bottom Line*).

Tabel 7. Kontribusi Sistem *Hybrid* terhadap Dimensi Keberlanjutan

Dimensi	Dampak Positif	Relevansi SDGs
Ekonomi	Reduksi durasi panen: efisiensi *man-power* dan optimalisasi siklus produksi tambak	SDG 8: Pekerjaan Layak dan Pertumbuhan Ekonomi
Lingkungan	Kontrol laju buangan stabil ke IPAL, minimalisasi risiko pencemaran badan air penerima	SDG 6 dan SDG 14: Air Bersih dan Ekosistem Lautan
Sosial	Eliminasi *bottleneck* mengurangi durasi kerja fisik berlebih dan risiko kecelakaan di area *outlet*	SDG 3: Kesehatan dan Kesejahteraan

Matriks Kompetensi Keinsinyuran

Penyelesaian kendala *bottleneck* menuntut integrasi antara pengetahuan teoretis dan keahlian praktis rekayasa sistem. Matriks kompetensi yang diterapkan dalam studi ini disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Matriks Kompetensi Keinsinyuran yang Diterapkan

Kompetensi	Implementasi dalam Studi	Referensi / Standar
Konsep Debit Aliran	Menghitung kapasitas aktual saluran *outlet*	Munson et al. (2013); Bakuan W.2.5.1
Aliran Pipa dan *Head Loss*	Evaluasi keterbatasan pipa, *Darcy-Weisbach*	Fox dan McDonald (2015); Bakuan W.2.5.2
Sistem Saluran Terbuka	Desain saluran 1,5 x 0,8 m via *Manning*	SNI 8456:2017; SNI 8066:2015
Konsep *Bottleneck* Sistem	Identifikasi titik pembatas kapasitas	Goldratt (1990); Tang et al. (2024)
Regulasi Keinsinyuran	Kepatuhan etik dan hukum profesi	UU 11/2014; PP 25/2019; KEI 2021
Manajemen K3L	HIRA, hierarki pengendalian, APD	ISO 45001:2018; ISO 14001:2015

Kesehatan Kerja dan Kesiagaan Darurat

Analisis kesehatan kerja disusun berdasarkan kondisi aktual sistem saluran *outlet* yang mengalami keterbatasan kapasitas (*bottleneck*). Dampak kesehatan kerja yang teridentifikasi meliputi tiga aspek utama. Pertama, paparan limbah organik akibat genangan: kapasitas saluran yang tidak memadai memicu luapan air tambak yang kaya material organik, meningkatkan risiko penyakit kulit (dermatitis) dan infeksi biologis bagi pekerja. Kedua, manajemen kelelahan (*fatigue*): durasi kerja fisik meningkat melebihi estimasi perencanaan akibat sistem pengeringan yang tidak optimal, menurunkan konsentrasi pekerja sebagai pemicu utama kecelakaan. Ketiga, risiko ergonomi dan terpeleset: kondisi lingkungan kerja yang basah meningkatkan koefisien licin pada area mobilisasi pekerja.

Potensi skenario darurat yang relevan pada sistem *outlet* meliputi: (1) luapan air masif (*overflow*) yang merendam jalur pipa dan infrastruktur sekitar; (2)

 ISSN 2987-677x

kegagalan aliran akibat *backwater effect* yang meningkatkan risiko kebocoran sambungan pipa secara mendadak; dan (3) insiden di area tergenang yang menyulitkan proses evakuasi. Strategi tanggap darurat yang direkomendasikan meliputi prosedur penghentian darurat, fasilitas P3K strategis pada elevasi aman di dekat jalur *outlet*, dan penetapan jalur evakuasi terintegrasi yang bebas dari potensi genangan. Perbaikan teknis melalui sistem hybrid bukan hanya solusi untuk meningkatkan kinerja hidraulika, tetapi juga instrumen kendali risiko utama untuk menciptakan lingkungan kerja yang aman dan sehat.

Kesimpulan

Studi ini menyimpulkan beberapa temuan rekayasa yang signifikan:

- Kapasitas aktual saluran *outlet* eksisting (472 m^3/jam) defisit secara masif terhadap kebutuhan debit panen (2.600 m^3/jam), menghasilkan Rasio Beban maksimum 7,3× membuktikan kegagalan rekayasa sistemik yang fundamental.
- Total *head loss* 8,20 m melampaui *head* tersedia gravitasi (2,0–2,7 m) dengan defisit energi 5,50–6,20 m. Sistem gravitasi murni secara hidraulika tidak mampu memenuhi kebutuhan operasional dalam kondisi manapun.
- Empat faktor *bottleneck* teridentifikasi: keterbatasan geometrik, hambatan friksi tinggi, defisit energi hidraulika, dan *tailwater effect* dari pasang surut. Peningkatan diameter pipa tunggal tidak efektif karena bottleneck utama adalah neraca energi.
- Sistem *hybrid* (saluran terbuka 1,5×0,8 m + pompa paralel 90–100 HP) merupakan solusi rekayasa optimal dengan kapasitas 2,41× kebutuhan puncak, redundansi operasional, dan kepatuhan terhadap standar K3L dan keberlanjutan lingkungan.
- Sinkronisasi kapasitas desain saluran dengan dinamika kebutuhan debit operasional adalah parameter kunci rekayasa tambak yang efisien, aman, dan berkelanjutan sesuai prinsip SDGs.

Saran

Berdasarkan hasil analisis, direkomendasikan beberapa langkah strategis sebagai berikut:

- Redesain Infrastruktur: Segera melakukan pembaruan desain *outlet* dengan mengadopsi prinsip aliran permukaan bebas (saluran terbuka) pada titik-titik kritis guna mengeliminasi kendala tekanan dan *head loss* yang fundamental.
- Implementasi Teknologi Pompa: Menerapkan sistem pemompaan multi-unit (paralel) untuk memberikan fleksibilitas operasional yang lebih tinggi dan adaptif terhadap variasi kebutuhan debit panen harian.
- Audit dan Pemeliharaan Berkala: Melakukan evaluasi kinerja hidraulika secara periodik, termasuk pengerukan sedimen pada sediment trap secara rutin untuk menjaga koefisien kekasaran saluran tetap optimal.
- Integrasi Manajemen K3L: Memperketat pengawasan operasional dan pemutakhiran SOP kerja aman, terutama pada area saluran terbuka dan instalasi kelistrikan pompa, guna mencapai target *Zero Accident* dan *Zero Environmental Damage*.
- Penguatan Aspek Lingkungan: Memastikan stabilitas aliran menuju IPAL tetap terjaga agar efisiensi pengolahan limbah optimal sesuai standar baku mutu lingkungan yang berlaku.
- Pengembangan Kompetensi (CPD): Mendorong praktisi keinsinyuran di lingkungan tambak untuk terus mengikuti perkembangan teknologi mekanika fluida dan material perpipaan terkini melalui program Pengembangan Keprofesian Berkelanjutan.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Ir. Lusia Permata Sari Hartanti, S.T., M.Eng., CQAI., IPM., ASEAN Eng. selaku dosen pembimbing atas arahan dan bimbingan teknis selama penyusunan studi ini. Apresiasi juga disampaikan kepada pengelola Tambak Penyampa, Kab. Polewali Mandar, atas akses data dan dukungan lapangan, serta Program Studi Profesi Insinyur Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas fasilitasi kegiatan praktik keinsinyuran ini.

Referensi

Boyd, C. E. (2015). *Water quality: An introduction*. Cham: Springer.

Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (1998). *Pond aquaculture water quality management.* Boston: Kluwer Academic Publishers.

Chanson, H. (2004). *The hydraulics of open channel flow: An introduction* (2nd ed.). Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

Food and Agriculture Organization. (2018*). The state of world fisheries and aquaculture 2018: Meeting the sustainable development goals.* Rome: FAO.

Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J. (2015). *Introduction to fluid mechanics* (9th ed.). Hoboken: John Wiley & Sons.

Goldratt, E. M. (1990). *Theory of constraints*. Great Barrington: North River Press.

Houghtalen, R. J., Akan, A. O., & Hwang, N. H. C. (2017). *Fundamentals of hydraulic engineering systems* (5th ed.). Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall.

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14001:2015 environmental management systems Requirements with guidance for use.* Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 45001:2018 occupational health and safety management systems.* Geneva: ISO.

Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., & Huebsch, W. W. (2013). *Fundamentals of fluid mechanics* (7th ed.). Hoboken: John Wiley & Sons.

 ISSN 2987-677x

Persatuan Insinyur Indonesia. (2021). *Kode etik insinyur Indonesia (KEI 2021).* Jakarta: PII.

Republik Indonesia. (1970). *Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja*. Jakarta: Sekretariat Negara.

Republik Indonesia. (2012). *Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012 tentang Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja*. Jakarta: Sekretariat Negara.

Republik Indonesia. (2014). *Undang-Undang Nomor 11 Tahun 2014 tentang Keinsinyuran*. Jakarta: Sekretariat Negara.

Tang, J., Dai, Z., Jiang, W., Wu, X., Zhuravkov, M. A., & Xue, Z. (2024). A comprehensive review of theories, methods, and techniques for bottleneck identification and management in manufacturing systems. *Applied Sciences, 14*(17), 7712. https://doi.org/10.3390/app14177712

United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. New York: UN General Assembly.

White, F. M. (2011). *Fluid mechanics* (7th ed.). New York: McGraw-Hill.

ISSN 2987-677x

Rancang Bangun Sistem *Monitoring* Parameter Cuaca *Real-Time* Berbasis IoT untuk Digitalisasi Data Mikro-Klimat di Kota Kediri

Eko Siswanto[1], Imam Safi'i[2], Agoes Santika Hyperastuti[3], Hartono Pranjoto[4]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ pranjoto@ukwms.ac.id

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) mendorong transformasi sistem monitoring lingkungan menjadi lebih efektif dan *real-time*. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem *monitoring* parameter cuaca berbasis IoT untuk mendukung digitalisasi data mikro-klimat di Kota Kediri. Sistem dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP8266 yang terintegrasi dengan sensor DHT11 untuk pengukuran suhu dan kelembapan udara serta sensor *tipping bucket* untuk pengukuran curah hujan. Data direkam setiap 5 menit dan dikirimkan secara *real-time* menuju *server cloud* berbasis MySQL untuk divisualisasikan melalui *dashboard website*. Sistem juga dilengkapi fitur penyimpanan cadangan menggunakan Micro SD dan sistem peringatan dini hujan ekstrem pada *dashboard monitoring*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan *monitoring* parameter cuaca secara stabil dengan tingkat keberhasilan transmisi data yang tinggi serta meningkatkan aksesibilitas data lingkungan secara digital. Implementasi sistem ini mendukung pengembangan digitalisasi data mikro-klimat, mitigasi risiko hidrometeorologi, dan konsep *smart city* berbasis data *real-time* di Kota Kediri.

Kata kunci: *Internet of Things* (IoT), *monitoring* cuaca, mikro-klimat, *real-time*, ESP8266, *smart city*

Pendahuluan

Perkembangan teknologi digital dan *Internet of Things* (IoT) telah mendorong transformasi sistem pemantauan lingkungan menjadi lebih cepat, akurat, dan terintegrasi secara *real-time* (Fajrika et al, n.d.; Ulum Burhani et al, 2023; Yunus & Absar, 2023). Dalam bidang klimatologi dan hidrologi, ketersediaan data cuaca yang kontinu sangat penting untuk mendukung berbagai sektor, seperti pertanian, pengelolaan sumber daya air, mitigasi bencana hidrometeorologi, serta perencanaan wilayah perkotaan (Limantara, 2018). Namun, ketersediaan data mikro-klimat di tingkat lokal masih terbatas karena stasiun pengamatan cuaca konvensional umumnya memiliki jumlah yang sedikit, biaya instalasi tinggi, serta belum mampu menyediakan data secara *real-time* dan mudah diakses masyarakat (Jayamaha & Olsen, 2021).

Kota Kediri sebagai salah satu wilayah perkotaan yang terus berkembang menghadapi tantangan perubahan kondisi lingkungan akibat urbanisasi, peningkatan suhu permukaan, dan perubahan pola curah hujan (Siswanto et al, 2025; Susanto et al, 2024). Kondisi tersebut menyebabkan perlunya sistem *monitoring* parameter cuaca yang mampu merekam kondisi atmosfer secara detail pada skala mikro-klimat. Data mikro-klimat seperti suhu udara, kelembapan, tekanan udara, intensitas curah hujan, dan kecepatan angin menjadi informasi penting dalam mendukung pengambilan keputusan berbasis data di tingkat lokal. Pemanfaatan teknologi IoT memungkinkan pengembangan sistem *monitoring* cuaca yang lebih efisien melalui integrasi sensor, mikrokontroler, jaringan internet, dan platform penyimpanan data berbasis *cloud* (Phang et al., n.d.). Sistem ini mampu melakukan pengukuran parameter cuaca secara otomatis, mengirimkan data secara *real-time*, serta menyediakan visualisasi data digital yang dapat diakses kapan saja melalui perangkat komputer maupun *smartphone* (Lingkungan et al, n.d.). Selain meningkatkan efisiensi pengumpulan data, digitalisasi data mikro-klimat juga dapat mendukung pengembangan konsep *smart city* dan sistem informasi lingkungan berbasis teknologi (Ostrometzky & Messer, 2024).

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem monitoring cuaca berbasis IoT, namun sebagian besar masih berfokus pada pemantauan parameter dasar dan belum mengintegrasikan sistem digitalisasi data secara optimal untuk kebutuhan analisis mikro-klimat perkotaan (Fatahillah, n.d.; Purbakawaca & Fauzan, 2022; Waworundeng & Lengkong, n.d.). Selain itu, masih terdapat keterbatasan pada aspek aksesibilitas data *real-time*, integrasi basis data, serta efisiensi penggunaan energi perangkat *monitoring* di lapangan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem *monitoring* parameter cuaca *real-time* berbasis IoT guna mendukung digitalisasi data mikro-klimat di Kota Kediri. Sistem yang dikembangkan diharapkan mampu menghasilkan data cuaca secara kontinu, akurat, dan terintegrasi secara digital sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sumber informasi lingkungan, pendukung penelitian, serta dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan lingkungan perkotaan yang berkelanjutan.

Metode

Penelitian ini menerapkan metode *Research and Development* (R&D) atau rancang bangun untuk

 ISSN 2987-677x

mengembangkan sistem *monitoring* parameter cuaca berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mampu melakukan akuisisi serta visualisasi data mikro-klimat secara *real-time*. Pelaksanaan penelitian dijadwalkan berlangsung di Kota Kediri dengan durasi enam bulan, mulai dari Oktober 2025 hingga Maret 2026. Prosedur penelitian dilakukan secara sistematis melalui beberapa tahapan krusial, diawali dengan studi literatur untuk pendalaman teori dan referensi teknis, diikuti dengan perancangan perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*), integrasi sistem, hingga proses instalasi alat di lokasi penelitian. Setelah *unit* terpasang, dilakukan tahap pengujian intensif dan evaluasi kinerja sistem untuk memastikan seluruh komponen bekerja secara optimal dan sinkron.

Sistem ini dirancang dengan menggunakan mikrokontroler ESP8266 sebagai otak kendali utama yang memiliki modul komunikasi nirkabel terintegrasi. *Unit* ini dihubungkan dengan sensor DHT11 untuk mengukur fluktuasi suhu dan kelembapan udara, serta sensor *tipping bucket* yang berfungsi menghitung intensitas curah hujan secara presisi. Mekanisme kerja sistem diatur untuk melakukan perekaman data secara otomatis setiap 5 menit sekali. Data yang telah terakuisisi kemudian ditransmisikan melalui jaringan internet menuju *server cloud* berbasis database MySQL untuk penyimpanan jangka panjang. Agar informasi cuaca tersebut mudah dipahami oleh pengguna, data divisualisasikan dalam bentuk grafik dan tabel melalui *dashboard website* yang dapat diakses secara *real-time*.

Untuk menjamin kualitas dan keandalan sistem, dilakukan serangkaian pengujian yang komprehensif mencakup uji fungsi sensor, stabilitas konektivitas jaringan, integritas data dari pengiriman hingga penyimpanan, serta uji aksesibilitas antarmuka *monitoring* pada berbagai perangkat. Akurasi data diukur dengan membandingkan hasil pembacaan perangkat dengan alat ukur standar menggunakan perhitungan persentase *error* guna memastikan validitas data mikro-klimat yang dihasilkan.

Seluruh rangkaian penelitian ini dilaksanakan dengan kepatuhan penuh terhadap regulasi dan standar yang berlaku. Aspek teknis pengamatan cuaca mengacu pada pedoman teknis BMKG, sementara praktik pengembangan sistem mengikuti koridor UU No. 11 Tahun 2014 tentang Keinsinyuran. Selain itu, aspek keselamatan selama proses instalasi dan operasional alat dijamin melalui kepatuhan terhadap UU No. 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja serta standar internasional ISO 45001:2018 mengenai Manajemen Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3). Peneliti juga berkomitmen pada aspek keberlanjutan lingkungan dengan merujuk standar ISO 14001:2015 untuk memastikan bahwa implementasi teknologi ini tidak memberikan dampak negatif terhadap ekosistem sekitar di Kota Kediri.

Hasil Kerja

Perancangan dan Implementasi Sistem *Monitoring* Cuaca Berbasis IoT

Hasil utama dari penelitian ini adalah keberhasilan dalam merancang serta mengimplementasikan sebuah sistem *monitoring* parameter cuaca berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dirancang untuk bekerja secara mandiri dan berkelanjutan. Sistem ini mengintegrasikan komponen perangkat keras dan lunak untuk melakukan pemantauan tiga variabel mikroklimat krusial secara *real-time*, yaitu suhu udara, tingkat kelembapan, dan intensitas curah hujan. Sebagai otak dari sistem, mikrokontroler ESP8266 digunakan karena efisiensinya dalam konsumsi daya serta kemampuannya mengelola konektivitas Wi-Fi secara *built-in*. Unit kendali ini terhubung langsung dengan sensor DHT11 untuk akuisisi data termal dan kelembapan, serta sensor *tipping bucket* yang dikalibrasi secara presisi untuk mendeteksi volume curah hujan melalui mekanisme jungkitan mekanis.

Dalam hal manajemen data, sistem ini diatur untuk melakukan pembacaan dan perekaman data dengan interval transmisi setiap 5 menit. Data yang telah dikumpulkan oleh sensor kemudian dikirimkan secara nirkabel melalui protokol internet menuju *server cloud* yang terintegrasi dengan basis data MySQL. Proses sinkronisasi ini memastikan bahwa data dapat diakses kapan saja dan dari mana saja melalui antarmuka digital. Untuk mengantisipasi tantangan teknis seperti fluktuasi sinyal atau terputusnya jaringan internet di lokasi penelitian, sistem ini dilengkapi dengan mekanisme *fail-safe* berupa modul Micro SD. Komponen ini berfungsi sebagai media penyimpanan cadangan lokal (*data logger*) yang akan mencatat informasi secara sementara, sehingga integritas dan kontinuitas data tetap terjaga tanpa ada celah informasi (*data gap*) yang hilang selama gangguan koneksi berlangsung.

Implementasi teknologi ini membawa perubahan signifikan terhadap metodologi pengumpulan data mikroklimat di lapangan yang sebelumnya masih mengandalkan prosedur manual yang rentan terhadap *human error* dan keterlambatan informasi. Dengan adanya sistem ini, proses digitalisasi data memungkinkan pengamatan dilakukan dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dan efisiensi waktu yang lebih baik. Transformasi dari pemantauan konvensional ke sistem otomatis berbasis IoT ini tidak hanya menyederhanakan alur kerja peneliti, tetapi juga menyediakan basis data yang lebih granular dan mudah diakses untuk analisis iklim jangka panjang, yang pada akhirnya mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat berbasis data nyata.



Gambar 1. *Prototype* AWS (*Automatic Weather System*)

Arsitektur dan Aksesibillitas Sistem

Fokus utama dalam pengembangan sistem ini adalah terciptanya sebuah *dashboard monitoring* berbasis *web*

 ISSN 2987-677x

yang mengedepankan efisiensi dan kemudahan akses. Dengan mengintegrasikan sistem ke dalam *database cloud*, seluruh data cuaca yang diperoleh dari sensor dapat disinkronkan secara instan dan disimpan dengan aman. *Dashboard* ini dirancang menggunakan prinsip *responsive design*, yang menjamin tampilan tetap optimal dan fungsional saat diakses melalui berbagai perangkat, mulai dari komputer *desktop* hingga *smartphone*. Fleksibilitas ini sangat krusial agar pengguna dapat memantau kondisi lingkungan kapan saja dan di mana saja tanpa terikat pada perangkat keras tertentu.

Visualisasi Data dan Parameter Sensor

Antarmuka *dashboard* menyajikan visualisasi data yang intuitif guna memudahkan proses interpretasi informasi oleh pengguna. Data yang ditampilkan merupakan hasil pembacaan sensor secara otomatis dan *real-time*, yang mencakup parameter meteorologi esensial seperti:

- Suhu Udara: Memberikan informasi mengenai fluktuasi panas lingkungan.
- Kelembapan Udara: Memantau kadar uap air yang berpengaruh pada kenyamanan termal dan potensi hujan.
- Intensitas Curah Hujan: Menampilkan volume air hujan yang jatuh dalam satuan waktu tertentu.
- *Timestamp* (Waktu Pembacaan): Mencatat waktu presisi setiap data diterima untuk menjaga validitas dan kronologi informasi.

Fitur *Early Warning System* (EWS)

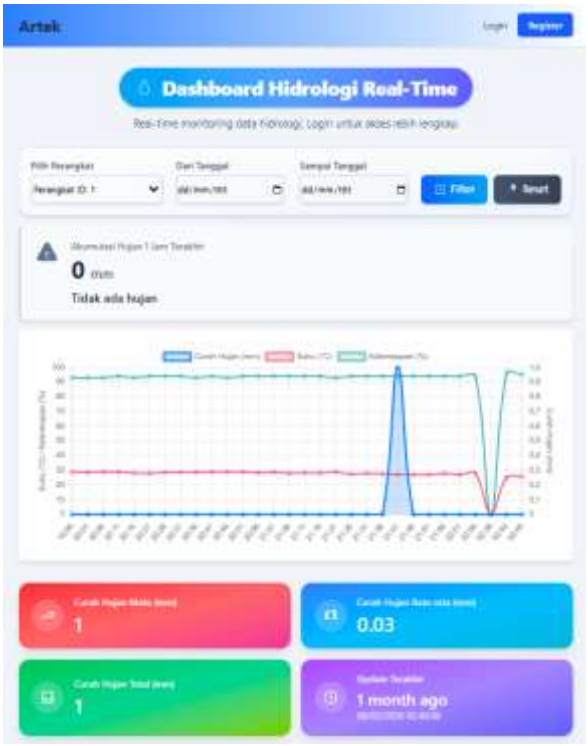
Selain berfungsi sebagai alat pemantauan, sistem ini dilengkapi dengan fitur *Early Warning System* (EWS) atau sistem peringatan dini yang cerdas. Fitur ini bekerja secara otomatis dengan membandingkan data curah hujan yang masuk terhadap ambang batas (*threshold*) yang telah ditentukan di dalam sistem. Jika intensitas hujan terdeteksi melampaui batas aman atau masuk dalam kategori ekstrem, sistem akan segera mengirimkan notifikasi peringatan. Keberadaan fitur ini sangat vital dalam mendukung upaya mitigasi risiko bencana hidrometeorologi, seperti banjir atau tanah longsor, sehingga pengguna dapat mengambil tindakan antisipatif dengan lebih cepat dan tepat sasaran.

Implementasi *Smart City* dan Keberlanjutan Data

Secara strategis, pengembangan sistem visualisasi ini merupakan langkah nyata dalam mendukung konsep digitalisasi lingkungan dan visi *Smart City*. Teknologi ini memutus ketergantungan pada pengamatan manual di lapangan yang memakan waktu dan berisiko tinggi. Penggunaan infrastruktur *cloud* tidak hanya memudahkan pengolahan data saat ini, tetapi juga memungkinkan pendokumentasian data historis secara berkelanjutan. Data tersebut nantinya dapat diolah kembali untuk analisis tren cuaca jangka panjang atau riset lingkungan lebih lanjut. Seluruh kapabilitas monitoring ini dapat diakses secara publik melalui tautan resmi: https://cuaca.eko-teknik.my.id.



Gambar 2. Contoh Notifikasi *Warning*



Gambar 3. Tampilan *Dashboard Web*

Evaluasi Kinerja Sistem dan Implementasi Keinsinyuran

Berdasarkan hasil pengujian dan proses implementasi di lapangan, sistem *monitoring* yang dikembangkan menunjukkan kinerja yang baik dalam melakukan akuisisi dan transmisi data secara *real-time*. Sistem mampu mengirimkan data sensor menuju *server monitoring* dengan tingkat kestabilan koneksi yang tinggi serta minim kehilangan data selama proses pengiriman. Pengujian dilakukan pada beberapa parameter hidrologi dan mikro-klimat, seperti curah hujan, suhu udara, kelembapan, tekanan udara, serta intensitas cahaya, dengan interval pengiriman data yang telah ditentukan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perangkat dapat bekerja secara kontinu dalam berbagai kondisi lingkungan dan tetap mampu mempertahankan performa komunikasi data secara optimal. Stabilitas sistem ini didukung oleh penggunaan modul komunikasi berbasis *Internet of Things* (IoT) yang memiliki kemampuan konektivitas baik dan efisien dalam penggunaan daya listrik.

Selain pengujian konektivitas, dilakukan pula validasi terhadap hasil pembacaan sensor dengan membandingkan data yang diperoleh dari sistem dengan data referensi

 ISSN 2987-677x

meteorologi dari perangkat ukur standar. Hasil validasi menunjukkan bahwa nilai pengukuran sensor memiliki tingkat kesesuaian yang baik dengan data acuan sehingga sistem dinilai cukup akurat dan layak digunakan sebagai media *monitoring* mikro-klimat dan parameter hidrologi skala lokal. Tingkat akurasi tersebut menunjukkan bahwa sistem tidak hanya mampu berfungsi sebagai alat pemantauan sederhana, tetapi juga berpotensi digunakan sebagai sumber data pendukung dalam pengelolaan sumber daya air, analisis lingkungan, maupun sistem peringatan dini berbasis data *real-time*. Keberadaan *dashboard monitoring* berbasis *web* juga memudahkan pengguna dalam mengakses data historis maupun kondisi terkini secara lebih cepat, efisien, dan terintegrasi.

Dari aspek praktik keinsinyuran, proses perancangan dan implementasi sistem telah memperhatikan prinsip keselamatan kerja, keberlanjutan lingkungan, dan efisiensi operasional. Seluruh tahapan pekerjaan dilakukan dengan mengacu pada ketentuan keselamatan dan kesehatan kerja sesuai dengan Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja, serta prinsip manajemen keselamatan kerja berdasarkan standar ISO 45001:2018. Selain itu, aspek pengelolaan lingkungan juga menjadi perhatian melalui penerapan konsep ramah lingkungan dan efisiensi energi yang mengacu pada ISO 14001:2015. Penggunaan perangkat elektronik berdaya rendah, optimalisasi konsumsi energi pada sistem sensor, serta pemanfaatan teknologi digital dalam proses monitoring menjadi bagian dari upaya untuk mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

Implementasi sistem *monitoring* berbasis IoT ini juga memberikan manfaat praktis dalam mendukung transformasi digital pada pengelolaan data lingkungan di Kota Kediri. Dengan adanya sistem *monitoring real-time*, proses pengumpulan dan pengolahan data menjadi lebih cepat, akurat, dan terintegrasi dibandingkan metode konvensional yang masih dilakukan secara manual. Sistem ini mendukung tersedianya informasi lingkungan yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan, mitigasi risiko hidrologi, maupun pengembangan sistem informasi lingkungan yang berkelanjutan. Selain meningkatkan efisiensi operasional, penerapan teknologi ini juga membuka peluang pengembangan lebih lanjut menuju sistem *smart environmental monitoring* yang terhubung dengan platform analisis data dan sistem peringatan dini bencana hidrometeorologi di masa mendatang.

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem *monitoring* parameter cuaca *real-time* berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk mendukung digitalisasi data mikroklimat di Kota Kediri. Sistem yang dikembangkan mampu melakukan pengukuran suhu udara, kelembapan udara, dan curah hujan secara otomatis menggunakan mikrokontroler ESP8266 yang terintegrasi dengan sensor DHT11 dan *tipping bucket*. Data hasil pengukuran berhasil dikirimkan secara *real-time* menuju *server cloud* dan divisualisasikan melalui *dashboard website* sehingga meningkatkan aksesibilitas informasi cuaca secara digital.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki kinerja yang stabil dengan tingkat keberhasilan transmisi data yang tinggi serta mampu menjaga integritas data melalui penyimpanan cadangan lokal menggunakan Micro SD. *Dashboard monitoring* juga berhasil dilengkapi dengan fitur peringatan dini hujan ekstrem yang dapat membantu proses mitigasi risiko hidrometeorologi secara lebih cepat dan efektif. Selain meningkatkan efisiensi monitoring lingkungan, implementasi sistem ini mendukung pengembangan konsep *smart city*, digitalisasi data lingkungan, serta praktik keinsinyuran berkelanjutan yang memperhatikan aspek keselamatan kerja dan pengelolaan lingkungan.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Program Studi Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada dosen pembimbing serta seluruh pihak yang telah memberikan arahan, dukungan teknis, dan bantuan selama proses perancangan, instalasi, hingga pengujian sistem *monitoring* parameter cuaca berbasis IoT ini. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada keluarga dan rekan-rekan yang telah memberikan motivasi dan dukungan selama penyusunan prosiding ini.

Referensi

Fajrika hadnis Putra, R., Muslim Lhaksmana, K., & Adytia, D. (n.d.). *Aplikasi IoT untuk Rumah Pintar dengan Fitur Prediksi Cuaca*.

Fatahillah, M. P. (n.d.). *Perancangan monitoring cuaca berbasis IoT tenaga matahari menggunakan panel surya 20 WP*.

Jayamaha, A., & Olsen, C. (2021). Performance of low-cost temperature sensors under direct solar radiation. *Measurement*, *187*. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110249

Limantara, L. M. (2018). *Rekayasa hidrologi*.

Lingkungan, P. K., Jemuran, A., Otomatis, P., Putra Laksana, R., Wahyu, S., & Hidayah, Q. H. (n.d.). *Sistem cerdas IoT untuk pemantauan cuaca real-time dan sistem cerdas IoT untuk pemantauan cuaca real-time dan prediksi kondisi lingkungan pada aplikasi jemuran pakaian otomatis*.

Ostrometzky, J., & Messer, H. (2024). Opportunistic weather sensing by smart city wireless communication networks. *Sensors*, *24*(24). https://doi.org/10.3390/s24247901

Phang, A. D., Sitanayah, L., & Sanger, J. B. (n.d.). Sistem pemantauan cuaca berbasis internet of things. *Jointer-Journal of Informatics Engineering*, *5*(02).

Purbakawaca, R., & Fauzan, S. A. (2022). Rancang bangun sistem pemantauan kualitas udara dalam ruangan

 ISSN 2987-677x

berbiaya rendah berbasis IoT. *Jurnal Talenta Sipil*, *5*(1), 118. https://doi.org/10.33087/talentasipil.v5i1.104

Siswanto, E., Susanto, S., & Rahmawati, F. (2025). Evaluation of rainfall intensity and the effectiveness of green infrastructure in urban water management: A case study of the University of Kadiri. *International Journal of Engineering Continuity*, *4*(1), 118–139. https://doi.org/10.58291/ijec.v4i1.364

Susanto, S., Pratikto, H., Winarto, S., & Siswanto, E. (2024). Pemetaan curah hujan dengan metode interpolasi Invers Distance Weighting (IDW) Kabupaten Kediri. *Jurnal Engineering*, *15*, 44–55. https://doi.org/10.24905/jureng.v15i1.7

Ulum Burhani, M., Novianto, D., & Elektro, T. (2023). Analisis komunikasi nirkabel menggunakan IoT network protocols pada stasiun cuaca mini. *JTE UNIBA*, 7(2).

Waworundeng, J., & Lengkong, O. (n.d.). Sistem monitoring dan sistem monitoring dan notifikasi kualitas udara dalam ruangan dengan platform IoT indoor air quality monitoring and notification system with IoT platform.

Yunus, M., & Absar, S. (2023). *Implementasi* IoT *pada sistem informasi waktu dan cuaca dengan JSON API*, 3(2). https://jurnal.umpar.ac.id/index.php/sylog

 ISSN 2987-677x

Pengaruh Kecepatan *Change Over Layout* terhadap Produktivitas *Line Sewing* di Perusahaan *Manufacture* Sepatu

Ardhi Kuntum Mashruro[1] Dyah Riandadari[2]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ ardhimr1980@gmail.com

✉ dyahriandadari@unesa.ac.id

Industri *fashion* terutama pada sektor sepatu yang sangat dinamis dan cepat dalam pergantian model menuntut perusahaan saling berlomba lomba untuk meningkatkan produktivitas dan menurunkan biaya produksi. Efisiensi waktu *change over layout* menjadi salah satu faktor krusial dalam menjaga dan mencapai target produktivitas perusahaan. Produktivitas merupakan salah satu parameter yang digunakan oleh perusahaan untuk mengukur kinerja dari perusahaan. Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif selama 3 bulan dengan melakukan observasi dan wawancara langsung terhadap *downtime* yang terjadi selama proses *change over layout* dan *supporting tools*. Hasil observasi menunjukkan bahwa terdapat korelasi negatif yang signifikan antara durasi *change over layout* dengan *produktivitas* harian. Data menunjukkan semakin lama waktu yang dihabiskan untuk pengaturan *layout* baru seperti persiapan mesin, pemindahan mesin, *flow* proses, dan *setting* mesin, maka semakin menurun pencapaian target produktivitas produksi akibat hilangnya jam kerja efektif. Data di lapangan mengindikasikan bahwa penerapan salah satu metode yang ada di dalam konsep *lean manufacture* yaitu metode *single minute exchange of dies* (SMED) dalam penataan *layout* mampu mereduksi waktu *change over layout* secara drastis. Kesimpulannya, optimalisasi kecepatan *change over layout* secara langsung meningkatkan efisiensi dan produktivitas *line sewing*. Saran yang dapat dilakukan oleh perusahaan adalah dengan membuat, melakukan, serta evaluasi standardisasi prosedur *change over layout* serta peningkatan kompetensi tim guna meminimalisir hambatan selama proses *change over layout*.

Kata kunci: *Lean Manfacture*, Produktivitas, Efisiensi, *Downtime*, *Change Over Layout*, *Single Minutes Exchange of Dies*

Pendahuluan

Industri *fashion* terutama pada industri sepatu yang sangat dinamis dan cepat dalam pergantian model menuntut perusahaan saling berlomba lomba untuk meningkatkan produktivitas dan menurunkan biaya produksi. Efisiensi waktu *change over layout* menjadi salah satu faktor krusial dalam menjaga dan mencapai target produktivitas perusahaan. Produktivitas merupakan salah satu parameter yang digunakan oleh perusahaan untuk mengukur tingkat *sustainability* dari sebuah perusahaan. Dalam praktiknya, proses *change over layout* sering kali menjadi kendala utama atau *bottleneck* yang menghambat peningkatan produktivitas. Durasi *change over layout* yang panjang akibat pengaturan teknis yang tidak terstandarisasi, kurangnya koordinasi antar mekanik, serta tata letak mesin yang tidak terkontrol menyebabkan hilangnya waktu produksi yang berharga. Pengaruh antara kecepatan *change over layout* dan produktivitas pada *line sewing* sangatlah linier, semakin singkat waktu *change over layout* maka akan semakin tinggi tingkat utilisasi mesin, tenaga kerja dan jam kerja. Pendekatan metode yang efektif dan lebih ramping/*lean manufacture*, seperti metode *single minute exchange of dies* (SMED) pada *line sewing* diharapkan dapat membantu perusahaan *manufacture* sepatu dapat lebih *sustainable* seperti yang tertuang pada poin SDG 12 (Konsumsi & Produksi yang Bertanggung Jawab) dalam 17 *Sustainable Development Goals* (SDG) dan mempertahankan daya saing melalui peningkatan volume produksi tanpa mengorbankan kualitas produk.

Metode

Studi kasus yang dilakukan di perusahaan *manufacture* sepatu yang berlokasi di Bergas, Jawa Tengah menggunakan beberapa metode dalam proses pengumpulan data, pengolahan data, analisa data, serta proses implementasi dari improvement yang dirancang. Metode pengumpulan data menggunakan pendekatan observasi dan wawancara dengan sumber daya yang dimiliki oleh perusahaan guna mendapatkan informasi terkait *bottleneck* yang terjadi dalam proses peningkatan produktivitas perusahaan. Kemudian dilakukan pemilihan *object* penelitian agar lebih fokus dan dapat digunakan sebagai *experiment* dalam lingkup yang terbatas sebelum diterapkan pada keseluruhan line. Data yang terkumpul menjadi data pendukung untuk diolah dan dianalisa menggunakan pendekatan salah satu tools pada *7 tools six sigma* yaitu 5 *why* dan *fishbone diagram*.

 ISSN 2987-677x

Tahapan selanjutnya ialah melakukan *experiment* lapangan berdasarkan hasil analisa yang telah didapat, metode yang digunakan dalam *experiment* lapangan menggunakan pendekatan *single minute exchange of dies* (SMED). Proses *experiment* dilakukan pada 1 *line* selama 3 bulan guna melihat apakah ada kekurangan dari *system* yang akan diterapkan, segala hal yang terjadi selama proses simulasi akan dicatat dan dievaluasi bersama dengan pihak terkait khususnya departemen *support* produksi dan tim *layout* guna menemukan celah kekurangan dari *system* yang dibuat untuk dilakukan perbaikan.

Proses implementasi hasil *experiment* dilakukan setelah tahapan evaluasi dari proses *experiment* selesai dilakukan. Pada tahapan proses ini tim *layout* yang berada di bawah naungan departemen GA akan memberikan sosialisasi SOP *change over layout* kepada seluruh departemen dan tim yang terlibat dalam proses *change over layout*.

Hasil Kerja

Situasi Permasalahan

Perusahaan *manufacture* sepatu yang berlokasi di Bergas, Jawa Tengah memiliki beberapa permasalahan. Salah satu masalah yang disorot oleh manajemen adalah inkonsistensi dan menurunnya capaian produktivitas yang dialami oleh departemen produksi. Pada awal tahun 2025 direktur operasional perusahaan memutuskan merekrut seorang *Process Improvement Specialist* dengan tujuan untuk dapat memecahkan masalah terkait inkonsistensi dan menurunnya produktivitas yang dialami oleh departemen produksi.

Berdasarkan kondisi *actual* yang ada dilapangan, tantangan yang di hadapi oleh *Process Improvement Specialist* saat begabung di perusahaan ini adalah naik turunnya tingkat produktivitas dan jika dirata-rata nilai produktivitas produksi adalah 70%. Walaupun mengalami naik dan turun, nilai tersebut tetap berada di bawah target yang telah ditetapkan oleh perusahaan, yaitu sebesar 85%. Target 85% tersebut juga menjadi tolak ukur dan capaian kinerja seorang *Process Improvement Specialist.*

Process Improvement Specialist memiliki beberapa strategi guna mencapai target yang diberikan oleh perusahaan. Berikut adalah beberapa strategi yang akan dilakukan:

1. *Process improvement specialist* akan melakukan observasi serta wawancara dengan *stakeholder* terkait untuk mencari akar permasalahan yang terjadi. Pada tahap ini ditemukan bahwa akar permasalahan yang menyebabkan naik turunya produktivitas produksi adalah proses *change over layout.* Proses *change over layout* memakan waktu 120 menit untuk 1 artikel dan 1 line.
2. *Process improvement specialist* akan melakukan pengerucutan masalah dengan menggunakan pendekatan analisa *fishbone diagram* untuk menemukan akar permasalahan pada proses *change over layout*. Pada tahap ini ditemukan bahwa ada 4 faktor yang menjadi penghambat proses *change over layout,* seperti manusia, metode, mesin dan lingkungan.
3. *Process improvement specialist* akan melakukan pembagian pekerjaan atau *parrarel improvement* dari hasil temuan pada saat tahap analisa. Pada tahap ini terdapat beberapa departemen yang terlibat dalam proses perbaikan *change over layout* yaitu Departemen REFA, Departemen GA, Departemen Produksi, dan Departemen QA. Detail perbaikan untuk masing masing departemen adalah sebagai berikut:
   - Departemen REFA: Perbaikan form *line balancing* dan perbaikan *form layout.*
   - Departemen GA: Pembuatan SOP *change over layout*, pembuatan *system inventory machine*, pembentukan tim *layout*, standarisasi nama mesin, *controlling preventive maintenance* dan modifikasi/ rekayasa *engineering* permesinan dan *conveyor*.
   - Departemen QA: Dokumentasi form, dokumentasi SOP, dokumentasi hasil rekayasa permesinan, inspeksi hasil rekayasa permesinan (*ergonomic* dan K3).
   - Departemen Produksi: Pembuatan *tagging number machine.*
4. *Process improvement specialist* akan melakukan *experiment* lapangan. Pada tahap ini akan dilakukan *experiment* lapangan dengan memilih 1 *line* dan di observasi selama 3 bulan untuk melihat dan menilai apakah perbaikan yang dilakukan masih terdapat kesalahan atau parameter yang terlewat pada tahap analisa. Pada proses *experiment change over layout Process Improvement Specialist* menggunakan pendekatan metode SMED (*Single minutes Exchange of Dies*).
5. *Process improvement specialist* akan melakukan evaluasi dari hasil *experiment* lapangan bersama departemen terkait. Pada tahap ini dilakukan evaluasi dengan menghitung waktu sebelum perbaikan dengan waktu setelah perbaikan. Terdapat *trend* positif, yaitu penurunan waktu *change over layout* dari sebelumnya 120 menit menjadi sekitar 94 menit serta peningkatan produktivitas dari 70% menjadi sekitar 79%.
6. *Process improvement specialist* akan bekerja sama dengan Departemen GA, khususnya tim *layout* untuk melakukan sosialisasi kepada seluruh anggota departemen terkait. Pada tahap ini, dilakukan sosialisasi untuk penerapan perbaikan *change over layout* ke semua *line* berdasarkan hasil evaluasi yang telah dilakukan.

Rumusan Masalah

Berdasarkan situasi permasalahan inkonsistensi dan menurunnya produktivitas *line sewing* pada saat pergantian artikel/*change over layout* yang terjadi di perusahaan *manufacture* sepatu yang berlokasi di Bergas, Jawa Tengah. Maka dapat dirumuskan masalah tersebut sebagai berikut:

1. Mengapa produktivitas *line sewing* menurun saat pergantian artikel?

 ISSN 2987-677x

2. Mengapa *change over layout* mempengaruhi produktivitas *line sewing*?
3. Mengapa *system change over layout* belum ada?
4. Bagaimana cara meningkatkan kecepatan *change over layout* pada *line sewing*?

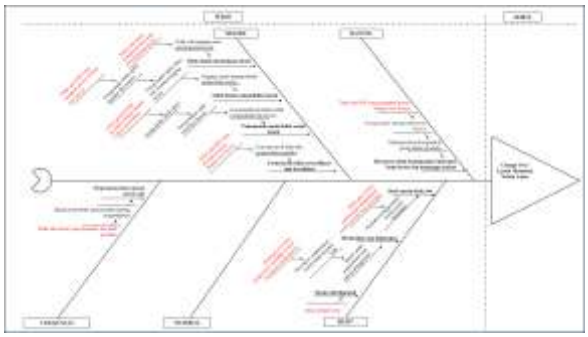
Analisis Permasalahan

Data yang dikumpulkan *process improvement specialist* merupakan data lama waktu proses *change over layout* dan *rate* produktivitas masing-masing *line*. Detail data terlampir pada tabel di bawah ini:

Tabel 1. Data Lama Waktu Proses *Change Over Layout*

Line	Artikel		*Downtime*	*Rate Productivity*
	Current	*New*		
1	12-27540	12-14499	110	71%
7	12-44587	12-24499	130	70%
2	12-29303	12-64587	125	72%
9	12-20425	12-24808	130	69%
10	12-23001	12-24432	105	73%
1	12-14499	12-23130	120	72%
7	12-24499	12-24543	115	70%
2	12-64587	12-40413	125	68%
9	12-24808	12-44499	120	72%
9	12-44499	12-44587	125	72%
2	12-40413	12-50611	115	68%
10	12-24432	12-57704	120	72%
7	12-24543	12-59114	120	72%
1	12-14499	12-50664	115	69%
9	12-44587	12-23003	120	68%
2	12-50611	12-50613	120	68%
10	12-57704	12-37808	120	69%
7	12-59114	12-24808	110	69%
1	12-50664	12-29305	135	69%
2	12-50613	12-52602	115	70%
9	12-23003	12-24808	105	69%
10	12-37808	12-23532	120	71%
1	12-29305	12-44499	130	71%
7	12-24808	12-24543	125	70%
2	12-52602	12-25611	125	73%
10	12-23532	12-29301	130	69%
9	12-24808	12-23001	120	70%
1	12-44499	12-23004	110	68%
7	12-24543	12-43001	125	68%
2	12-52602	12-22233	120	72%
Average			**120**	**70%**

Berdasarkan data di atas, dapat diperoleh rata-rata waktu *change over layout* adalah 120 menit dan rata rata produktivitas masing-masing *line* adalah 70%. Proses analisa terhadap data di atas dilakukan dengan menggunakan pendekatan salah satu *7 tools six sigma* dalam *lean manufacture,* yaitu 5 *why* dan *fishbone diagram*.



Gambar 1. *Fishbone Diagram Change Over Layout*

Kesimpulan dari seluruh kategori tersebut terdapat tiga akar masalah fundamental yang saling berkaitan:

1. Kegagalan Sistemik (*Systemic Failure*): Sebagian besar "5 *why*" bermuara pada ketiadaan SOP *Flow* Proses yang jelas. Hal ini menyebabkan proses *change over layout* bersifat reaktif, bukan proaktif.
2. Konflik Prioritas (*Conflict of Interest*): Group *Leader* Produksi dibebankan tanggung jawab ganda. Saat terjadi *change over*, mereka tetap fokus pada output produksi dan kualitas produk, sehingga pengawasan teknis *layout* menjadi terabaikan dan penuh error.
3. Kesenjangan Perencanaan (*Planning Gap*): Masalah seperti mesin rusak, stok kurang, dan area sempit menunjukkan bahwa fase persiapan (*External Setup*) tidak dilakukan sebelum proses *change over layout* dimulai.

Dampak terhadap produktivitas dari rangkaian sebab-akibat di atas secara langsung menyebabkan:

1. Meningkatnya *Downtime*: Mesin berhenti lebih lama dari yang seharusnya.
2. *Waste of Motion & Waiting*: Tim membuang energi untuk mencari mesin dan menunggu instruksi.
3. Potensi *Re-work*: Kesalahan penempatan mesin memaksa tim untuk membongkar ulang *layout*, yang semakin memperpanjang waktu proses.

Alternatif Solusi

Berdasarkan permasalahan inkonsistensi produktivitas produksi yang terjadi pada perusahaan *manufacture* sepatu akibat dari lamanya waktu *change over layout*. Beberapa hal yang dapat dilakukan sebagai alternatif solusi yang bersifat reaktif, jangka pendek, dan sementara yaitu:

1. Strategi *Buffer Stock*
   - *Build-up Inventory*: Lakukan lembur singkat atau tingkatkan target *output* beberapa hari sebelum *change over* untuk menciptakan stok (*buffer stock*).
   - Fungsi *Buffer* Stok: Pemenuhan kebutuhan pengiriman ke proses selanjutnya (misal dari *sewing* ke *assembly*) saat *line sewing* sedang dalam kondisi *shutdown* untuk perubahan *layout*.
2. Rekayasa teknis terhadap mesin yang dimiliki dengan memberi roda agar mempermudah pemindahan mesin
3. Pembagian kerja paralel dengan membuat instruksi kerja sederhana yang membagi tugas dengan jelas: Siapa yang

 ISSN 2987-677x

memutus aliran listrik, siapa yang menggeser meja, dan siapa yang melakukan *re-plugging*.

Rekomendasi Solusi

Berdasarkan hasil pengolahan data dan analisa data di lapangan yang dilakukan oleh *Process Improvement Specialist* bersama *stakeholder* terkait, maka saran atau rekomendasi perbaikan untuk meningkatkan produksivitas dan konsistensi produktivitas adalah dengan menggunakan pendekatan, implementasi dan integrasi salah satu metode *Lean Manufacture System* yang berfokus pada penghapusan *waste.* Berikut adalah detail rekomendasi solusi yang diajukan:

Tabel 2. Rekomendasi Solusi Proses *Change Over Layout*

Kategori	Inisiatif Perbaikan	Penjelasan Teknis
Sistem Informasi	*Visual Management*	Penggunaan papan informasi di area kerja yang menampilkan *form layout* terkini. Jangan biarkan informasi hanya "tersimpan di kantong" *Group Leader*
Prosedur Kerja	Integrasi Konsep SMED ke dalam SOP	Implementasi integrasi konsep memisahkan kegiatan *Change Over Layout* menjadi Internal (harus saat mesin berhenti) dan Eksternal (bisa disiapkan sebelum mesin berhenti) menjadi SOP *Change Over Layout*
Sistem Manajemen Aset	*Tagging & Color Coding*	- Pemberian *tagging* pada mesin yang sesuai dengan kebutuhan - Membuat label warna pada *conveyor* atau lantai sesuai dengan zonasi atau fungsinya. Ini menghilangkan kebingungan saat penempatan mesin
Maintenance	*Autonomous Maintenance*	Tim *layout* harus melakukan pengecekan dasar mesin sebelum dipindahkan, didukung oleh jadwal *preventive maintenance* yang sinkron dengan *order* produksi
Ergonomi	Ubah Mesin Statis Menjadi *Mobile*	Pasang roda (*caster*) pada mesin yang sering berpindah atau buat sistem "*Dolly*" (troli datar) untuk mesin berat agar bisa digeser dengan tenaga minimal

Kesimpulan

Proses *experiment* lapangan dilakukan menggunakan pendekatan dari rekomendasi solusi yang diajukan penulis kepada manajemen, proses *experiment* lapangan dilakukan selama 3 bulan dengan mengambil *sample 1 line,* yaitu *line sewing* 2. Berikut detail data hasil *experiment* lapangan:

Tabel 3. Hasil *Experiment* Lapangan dengan Pendekatan Metode *Single Minutes Exchange Of Dies (SMED)*

Line	Artikel		*Downtime*	*Rate Productivity*
	Current	*New*		
2	12-23003	12-24808	100	79%
2	12-24808	12-34587	90	82%
2	12-34587	12-22233	90	81%
2	12-22233	12-52606	95	80%
2	12-52606	12-64587	90	81%
2	12-64587	12-23130	95	80%
2	12-23130	12-24543	90	81%
2	12-24543	12-40413	90	82%
2	12-40413	12-44499	100	77%
2	12-44499	12-44587	90	79%
2	12-44587	12-50611	90	82%
2	12-50611	12-57704	95	79%
2	12-57704	12-59114	100	78%
2	12-59114	12-50664	100	79%
2	12-50664	12-23003	90	81%
2	12-23003	12-50613	90	82%
2	12-50613	12-37808	80	82%
2	12-37808	12-24808	90	80%
2	12-24808	12-29305	95	77%
2	12-29305	12-52602	100	75%
2	12-52602	12-24808	90	79%
2	12-24808	12-23532	90	80%
2	12-23532	12-44499	100	75%
2	12-44499	12-24543	105	75%
	Average		**94**	**79,4%**

Data hasil *experiment* lapangan diatas dikorelasi dengan rekomendasi solusi perbaikan pada bab 3, sehingga menghasilkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Peningkatan produktivitas dari 70% menjadi 79,4% merupakan hasil dari transformasi fundamental pada *system change over layout*.
2. Integrasi konsep SMED kedalam SOP *change over layout* yang memisahkan kegiatan internal dan eksternal menjadi kunci utama efisiensi, di mana persiapan mesin dan peralatan yang dilakukan sebelum *line* berhenti berhasil memangkas *downtime* secara drastis.
3. Efektivitas perbaikan diperkuat oleh aspek ergonomi melalui modifikasi mesin statis menjadi *mobile* serta penerapan *Visual Management* dan *Color Coding*, yang secara teknis mengeliminasi waktu terbuang akibat kebingungan penempatan mesin.

Seluruh *improvement* yang dilakukan tidak hanya mempercepat waktu *change over layout* dari 120 menit menjadi 94 menit, tetapi juga menciptakan aliran kerja yang lebih terstandarisasi, fleksibel, minim hambatan teknis, professional, serta menciptakan lingkungan kerja yang aman dan sehat (K3L).

Ucapan Terimakasih

Penulis menyadari bahwa keberhasilan studi kasus ini tidak terlepas dari dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan

 ISSN 2987-677x

penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng. Ketua Program Studi Profesi Insinyur Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya sekaligus dosen pembimbing karena telah memberikan arahan, kebijakan dan fasilitas selama proses pendidikan program profesi dan penulisan laporan studi kasus ini.
2. Kedua orang tua, istri, dan anak-anak yang telah memberikan *support* secara moral, tenaga dan waktunya selama proses pendidikan program profesi.
3. Seluruh rekan kerja di perusahaan yang telah memberikan segala informasi, data, dan kesempatan kepada penulis dalam pelaksanaan observasi dan wawancara hingga pengambilan data yang menjadi dasar penyusunan studi kasus ini.
4. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan yang telah memberikan dukungan moral maupun teknis secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis menyadari bahwa laporan studi kasus ini masih memiliki keterbatasan yang memerlukan penyempurnaan. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka dengan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kualitas laporan studi kasus ini. Semoga laporan studi kasus ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan kompetensi penulis serta memberikan kontribusi yang positif bagi praktek professional khususnya di bidang Teknik Industri .

Referensi

Drucker, P. F. (2012). *Management: tasks, responsibilities, practices*. Routledge.

Drucker, P. F. (2012). *The essential drucker: The best of sixty years of Peter Drucker's essential writings on management*. HarperBusiness.

Ishikawa, K. (1986). *Guide to quality control*. Asian Productivity Organization.

Kusuma, L.J.I., & Nurkertamanda, D. (2022). Implementasi metode single minute exchange of die (SMED) untuk mempersingkat waktu set-up mesin pada PT Bimuda Karya Teknik. *Industrial Engineering Online Journal (IEOJ*).

Liker, J. K. (2020). *The Toyota way, second edition: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*. McGraw-Hill Education.

Liker, J. K., & Convis, G. L. (2020). *The Toyota Way to lean leadership: Achieving and sustaining excellence through leadership development*. McGraw-Hill.

Liker, J. K., Ross, K., & Ballé, M. (2020). *The Toyota way: A guide to lean transformation.* McGraw-Hill.

Setiawan, L.C. (2023). Mereduksi waktu setup menggunakan metode SMED pada mesin ISS Kemas PT Pharos Tbk Semarang. *Industrial Engineering Online Journal (IEOJ).*

Shingo, S. (1985). *A revolution in manufacturing: The SMED system.* Productivity Press, Cambridge, MA.

Sumasto, F., Azzahra, S., Rangkuti, I.Y., Imdam, I.A., Lianny, I.K.M., & Solih, E.S. (2025). *Penerapan single-minute exchange of die (SMED) untuk penurunan waktu setup dan biaya produksi pada injection molding. Jurnal Optimasi Teknik Industri.*

 ISSN 2987-677x

Evaluasi Desain *Ramp Pedestrian* Kawasan Pusat Perkantoran X terhadap Aksesibilitas Universal dan Kinerja Evakuasi dalam Mendukung Prinsip *Green Building*

Dino S. Silitonga

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ dinosilitonga30@gmail.com

Perancangan fasilitas kawasan berbasis *green building* tidak hanya menekankan aspek efisiensi energi dan lingkungan, tetapi juga harus mampu menjamin aksesibilitas, keselamatan, dan kenyamanan seluruh pengguna. Salah satu elemen penting dalam mendukung aspek tersebut adalah jalur pedestrian berupa ramp yang dirancang untuk mengakomodasi pengguna normal maupun penyandang disabilitas. Studi ini bertujuan mengevaluasi desain ramp pedestrian pada Kawasan Pusat Perkantoran X terhadap prinsip aksesibilitas universal dan kinerja evakuasi. Metode yang digunakan adalah pendekatan evaluasi geometrik *ramp*, analisis karakteristik pengguna, serta identifikasi potensi hambatan pergerakan. *Ramp* dirancang dengan kemiringan ±4°, lebar 4 meter, dan panjang lintasan ±290 meter dengan bordes pada interval ±40 meter. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa parameter geometrik dasar telah memenuhi standar teknis, namun interval bordes yang terlalu panjang berpotensi menimbulkan kelelahan pengguna dan mengurangi efektivitas ramp sebagai jalur evakuasi. Oleh karena itu, dilakukan redesign dengan mengubah interval bordes menjadi ±9 meter, penambahan tempat istirahat bagi pengguna kursi roda pada interval bordes, penambahan *tactile paving*, serta integrasi jalur pesepeda. Redesain tersebut meningkatkan aspek aksesibilitas universal, kenyamanan pengguna, keselamatan pergerakan, dan mendukung prinsip *sustainable mobility* dalam konsep *green building*.

Kata kunci: *ramp pedestrian*, *universal accessibility*, *green building*, *sustainable mobility*, keselamatan dan kesehatan kerja (K3), profesionalisme keinsinyuran

Pendahuluan

Konsep *green building* menuntut terpenuhinya aspek keberlanjutan yang tidak hanya berfokus pada efisiensi energi dan lingkungan, tetapi juga pada keselamatan, kenyamanan, aksesibilitas, dan kualitas mobilitas pengguna kawasan (Green Building Council Indonesia, n.d.). Dalam konsep pembangunan berkelanjutan, sistem sirkulasi pedestrian menjadi salah satu elemen penting karena berperan dalam mendukung *walkability*, pengurangan ketergantungan kendaraan bermotor, serta peningkatan kualitas ruang publik kawasan. Oleh karena itu, pengembangan jalur pedestrian yang inklusif menjadi bagian penting dalam penerapan *sustainable mobility* pada kawasan berbasis green building. Pendekatan ini juga sejalan dengan *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya SDG 9 (*Industry, Innovation and Infrastructure*), SDG 11 (*Sustainable Cities and Communities*), serta SDG 3 (*Good Health and Well-being*) melalui penyediaan infrastruktur publik yang aman, inklusif, dan berkelanjutan. Salah satu fasilitas penting dalam mendukung mobilitas kawasan adalah jalur pedestrian berupa *ramp* yang dapat digunakan oleh seluruh kelompok pengguna, termasuk penyandang disabilitas, lansia, dan pengguna dengan keterbatasan mobilitas lainnya sesuai prinsip *universal accessibility* (Kementerian PUPR, 2017).

Selain berfungsi sebagai sarana sirkulasi harian, ramp juga memiliki peran penting sebagai bagian dari jalur evakuasi kawasan pada kondisi darurat sehingga aspek kenyamanan, keselamatan, dan kapasitas pergerakan pengguna perlu diperhatikan secara menyeluruh. Dalam konteks praktik profesi insinyur, perancangan fasilitas publik tersebut juga mencerminkan tanggung jawab profesional, etika keinsinyuran, serta penerapan prinsip keselamatan dan kesehatan kerja (K3) untuk melindungi pengguna kawasan. Pada proyek Kawasan Pusat Perkantoran X, *ramp pedestrian* dirancang untuk menghubungkan halte menuju bangunan utama dengan kemiringan ±4°, lebar 4 meter, dan panjang lintasan ±290 meter. Jalur tersebut dirancang untuk mengakomodasi pejalan kaki, pengguna kursi roda, dan pesepeda dalam satu sistem sirkulasi kawasan.

Secara umum desain existing telah memenuhi parameter geometrik dasar. Namun, dengan kapasitas pengguna kawasan mencapai ±5.851 orang pada tiga massa bangunan utama, performa ramp terhadap kenyamanan pengguna dan fungsi evakuasi menjadi sangat penting. Pada kondisi darurat, panjang lintasan dan interval bordes yang terlalu jauh berpotensi memengaruhi kelancaran pergerakan serta

 ISSN 2987-677x

meningkatkan kelelahan pengguna, khususnya bagi lansia dan penyandang disabilitas.

Selain itu, aspek aksesibilitas universal merupakan salah satu bagian penting dalam penilaian bangunan hijau dan kualitas lingkungan binaan. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi terhadap desain ramp pedestrian agar tidak hanya memenuhi standar geometrik, tetapi juga mampu mendukung keselamatan, kenyamanan, aksesibilitas universal, dan prinsip *sustainable mobility*. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi kesesuaian desain geometrik *ramp* pedestrian terhadap prinsip aksesibilitas universal dan fungsi evakuasi kawasan, serta menyusun rekomendasi redesign yang lebih inklusif dan berkelanjutan.

Metode

Untuk Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan kuantitatif-deskriptif dengan analisis evaluatif terhadap desain geometrik *ramp* dan kinerja pergerakan pengguna. Evaluasi dilakukan pada desain ramp pedestrian Kawasan Pusat Perkantoran X yang masih berada pada tahap perencanaan. Variabel yang dianalisis meliputi kemiringan *ramp*, panjang lintasan, lebar jalur, jumlah dan jarak *bordes*, karakteristik pengguna, serta potensi hambatan pergerakan pada kondisi normal maupun darurat. Analisis dilakukan dengan membandingkan desain *existing* terhadap standar aksesibilitas universal dan prinsip keselamatan jalur evakuasi.

Tahapan penelitian terdiri dari identifikasi data desain *ramp*, evaluasi geometrik, analisis kenyamanan pengguna, dan penyusunan rekomendasi redesign. Data diperoleh melalui studi gambar perencanaan, spesifikasi teknis, serta studi literatur mengenai aksesibilitas dan *green building*. Pada Tabel 1 menunjukkan parameter geometrik utama pada desain *existing ramp pedestrian* yang digunakan sebagai dasar evaluasi terhadap aksesibilitas dan kenyamanan pengguna. Secara umum desain telah memenuhi parameter geometrik dasar, namun interval bordes yang terlalu panjang berpotensi menimbulkan kelelahan pengguna serta menurunkan efektivitas *ramp* sebagai jalur evakuasi.

Tabel 1. Ringkasan Hasil Evaluasi

Aspek Evaluasi	Kondisi Existing
Kemiringan ramp	±4°
Lebar Jalur	4 meter
Panjang lintasan	±290 meter
Interval Bordes	±40 meter
Fungsi Jalur	Pejalan kaki, kursi roda, pesepeda

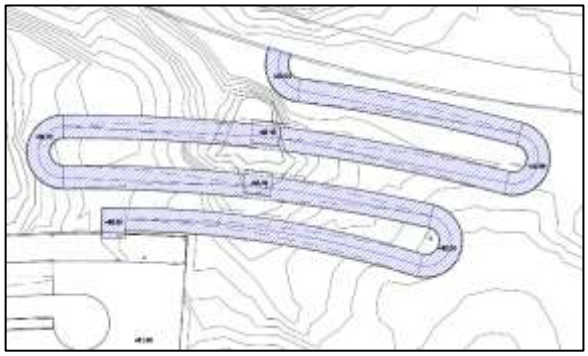
Hasil Kerja

Kondisi Eksisting *Ramp*

Ramp pedestrian pada Kawasan Pusat Perkantoran X dirancang dengan beberapa parameter geometrik utama yang meliputi kemiringan *ramp*, lebar jalur, panjang lintasan, dan *interval bordes*. Parameter tersebut digunakan sebagai dasar evaluasi terhadap aksesibilitas dan kenyamanan pengguna. Data geometrik *existing* ditunjukkan pada Tabel 1. Secara umum desain telah memenuhi parameter geometrik dasar. Namun, *interval bordes* yang terlalu panjang berpotensi menimbulkan kelelahan pengguna serta menurunkan efektivitas ramp sebagai jalur evakuasi. Selain itu, desain *existing* masih memiliki keterbatasan pada aspek aksesibilitas universal karena belum dilengkapi fasilitas pendukung seperti *tactile paving* dan area istirahat pengguna kursi roda. Kondisi tersebut menyebabkan kenyamanan dan kemudahan akses pengguna dengan keterbatasan mobilitas belum sepenuhnya terakomodasi. Dalam kondisi kepadatan tinggi maupun situasi darurat, panjang lintasan tanpa area transisi yang memadai juga berpotensi menimbulkan hambatan pergerakan dan penumpukan pengguna pada titik tertentu. Visualisasi kondisi *existing ramp pedestrian* ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 2. Data Geometrik *Existing*

Parameter	Nilai Eksisting
Kemiringan ramp	±4°
Lebar Jalur	4 meter
Panjang lintasan	±290 meter
Interval Bordes	±40 meter
Fungsi Jalur	Pejalan kaki, kursi roda



Gambar 1. *Design Existing Ramp*

Analisis Permasalahan

Hasil evaluasi menunjukkan beberapa potensi permasalahan pada desain *existing*, terutama pada aspek kenyamanan pengguna, fasilitas disabilitas, dan fungsi evakuasi. Permasalahan utama terletak pada keterbatasan area istirahat dan belum optimalnya fasilitas aksesibilitas universal. *Interval bordes* ±40 meter menyebabkan pengguna harus menempuh lintasan yang cukup panjang tanpa area transisi atau titik istirahat yang memadai, sehingga berpotensi meningkatkan kelelahan pengguna, khususnya bagi lansia, penyandang disabilitas, dan pengguna dengan keterbatasan mobilitas. Selain itu, belum tersedianya *tactile paving* dan pengaturan jalur pengguna yang terpisah juga dapat memengaruhi kenyamanan serta orientasi pergerakan pengguna tunanetra pada area *ramp*.

Pada kondisi kepadatan tinggi maupun situasi darurat, panjang lintasan *ramp* dan belum adanya pengaturan sirkulasi yang optimal berpotensi

 ISSN 2987-677x

menimbulkan hambatan pergerakan dan penumpukan pengguna pada titik tertentu. Kondisi tersebut dapat memengaruhi efektivitas *ramp* sebagai jalur evakuasi kawasan, terutama ketika jalur digunakan secara bersamaan oleh pejalan kaki, pengguna kursi roda, dan pesepeda. Selain itu, belum tersedianya integrasi jalur pesepeda juga menunjukkan bahwa desain *existing* masih belum sepenuhnya mendukung prinsip *sustainable mobility* dan *green building* pada kawasan. Ringkasan hasil evaluasi ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Ringkasan Hasil Evaluasi

Aspek Evaluasi	Kondisi Existing	Dampak
Jarak Bordes	±40 meter	Cepat lelah
Fasilitas Disabilitas	Belum optimal	Orientasi tunanetra terbatas
Jalur Pesepeda	Belum tersedia	Belum mendukung *green mobility*
Fungsi Evakuasi	Jalur panjang	Potensi *bottleneck*

Usulan *Redesign Ramp*

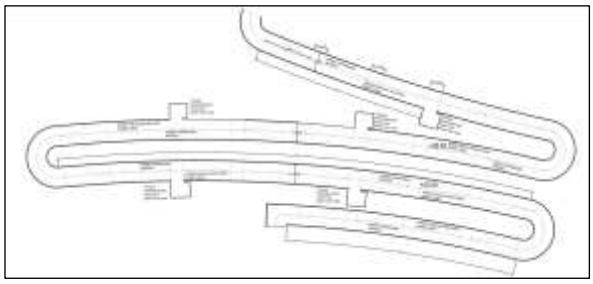
Berdasarkan hasil evaluasi terhadap desain *existing*, dilakukan beberapa penyesuaian desain untuk meningkatkan kenyamanan, aksesibilitas universal, dan fungsi evakuasi *ramp pedestrian* (Dinas Cipta Karya DKI Jakarta, n.d.). Selain aspek geometrik, *redesign* juga diarahkan untuk mendukung penerapan *sustainable mobility* dan kualitas ruang publik kawasan yang lebih inklusif. Selain aspek geometrik, hasil evaluasi menunjukkan bahwa *interval bordes* yang terlalu panjang memengaruhi tingkat kenyamanan pengguna berdasarkan karakteristik fisik dan kemampuan mobilitas. Pengguna lansia dan pengguna kursi roda membutuhkan area transisi dan titik istirahat yang lebih dekat untuk mengurangi kelelahan saat menempuh lintasan *ramp* yang panjang. Pada kondisi eksisting, keterbatasan area istirahat berpotensi menyebabkan penurunan kenyamanan serta hambatan pergerakan pada kondisi kepadatan tinggi.

Selain itu, belum tersedianya pemisahan jalur antara *pedestrian* dan pesepeda juga berpotensi menimbulkan konflik pergerakan pengguna. Kondisi tersebut dapat memengaruhi keselamatan dan efektivitas sirkulasi kawasan, terutama pada kondisi darurat ketika seluruh pengguna bergerak secara bersamaan menuju area evakuasi. Oleh karena itu, redesign dilakukan tidak hanya untuk memenuhi standar geometrik, tetapi juga untuk meningkatkan kualitas ruang sirkulasi yang lebih aman, inklusif, dan adaptif terhadap berbagai karakteristik pengguna.

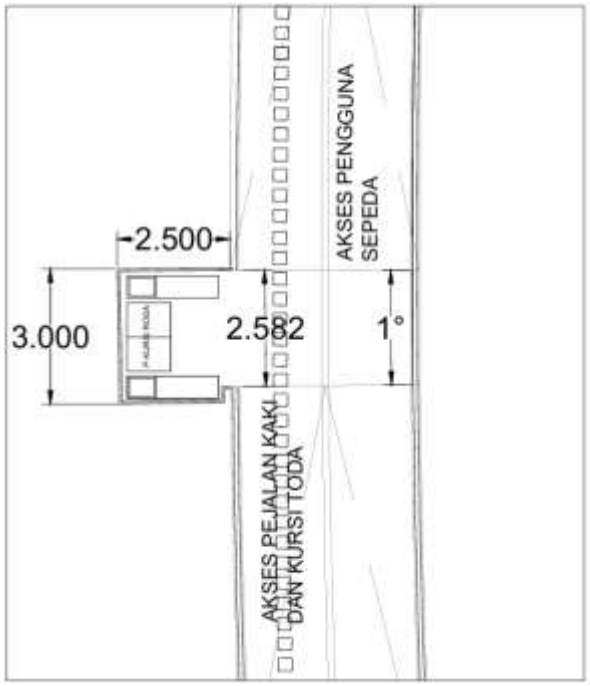
Berdasarkan hasil evaluasi, dilakukan *redesign* dengan beberapa penyesuaian utama:

1. Mengubah *interval bordes* dari ±40 meter menjadi ±9 meter.
2. Menambahkan *tactile paving* pada area transisi.
3. Mengintegrasikan jalur sepeda dengan *pedestrian*.
4. Menyediakan area berhenti pengguna kursi roda.

Penerapan beberapa penyesuaian tersebut ditunjukkan pada Gambar 2 yang memperlihatkan konsep *redesign ramp pedestrian* dengan penambahan *interval bordes* dan integrasi jalur bagi pengguna dari berbagai karakteristik. Selain itu, detail penempatan *tactile paving* pada desain usulan untuk mendukung aksesibilitas bagi penyandang tunatetra (Kementerian PUPR, 2017). Serta mendukung desain universal dan keselamatan pengguna ditunjukkan pada Gambar 3. Sebagai usulan untuk mendukung aksesibilitas universal.



Gambar 2. Konsep *Redesign Ramp Pedestrian*



Gambar 3. Konsep *Redesign Ramp Pedestrian*

Perbandingan *Existing* dan *Redesign Ramp*

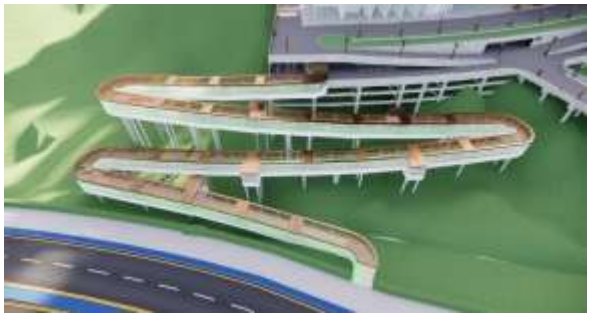
Perbandingan antara desain *existing* dan *redesign* dilakukan untuk mengevaluasi peningkatan kualitas aksesibilitas, kenyamanan pengguna, serta efektivitas fungsi *ramp* sebagai jalur sirkulasi dan evakuasi kawasan setelah dilakukan penyesuaian desain. Evaluasi dilakukan terhadap beberapa parameter utama seperti *interval bordes*, fasilitas pendukung disabilitas, integrasi jalur pengguna, serta kemampuan desain dalam mendukung prinsip *universal accessibility* dan *sustainable mobility* (The Center for Universal Design, 1997). Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3. Berdasarkan hasil perbandingan tersebut, redesign menunjukkan peningkatan terhadap kenyamanan pengguna melalui penambahan area istirahat yang lebih dekat, peningkatan aksesibilitas universal melalui penyediaan *tactile paving*, serta peningkatan fungsi evakuasi kawasan melalui pengaturan jalur sirkulasi yang lebih adaptif dan terintegrasi.

 ISSN 2987-677x

Visualisasi hasil *redesign ramp pedestrian* setelah dilakukan penyesuaian konfigurasi *bordes* dan jalur sirkulasi ditunjukkan pada Gambar 4. Visualisasi tersebut memperlihatkan perubahan desain yang lebih terstruktur dengan penambahan area transisi dan ruang pergerakan yang lebih nyaman bagi berbagai karakteristik pengguna. Selain itu, integrasi jalur pedestrian dan pesepeda sebagai bagian dari penerapan *sustainable mobility* dalam kawasan ditunjukkan pada Gambar 5. Integrasi tersebut dirancang untuk mendukung pola mobilitas rendah emisi, meningkatkan kualitas ruang publik kawasan, serta menciptakan sistem sirkulasi yang lebih inklusif dan ramah lingkungan.

Tabel 3. Perbandingan *Exisiting* dan *Redesign*

Parameter	*Exsisting*	*Redesign*
Kemiringan ramp	±4°	±6°
Lebar Jalur	4 meter	4 meter
Interval Bordes	±40 meter	±9 meter
Area Istirahat	Terbatas	Lebih sering tersedia
Tactile Paving	Tersedia	Tersedia
Jalur pesepeda	Tersedia	Terintegrasi
Universal Accessibility	Belum optimal	Lebih optimal
Fungsi Evakuasi	Kurang adaptif	Lebih aman



Gambar 4. Visualisasi *Ramp* Hasil *Redesign*



Gambar 5. Konsep *Redesign Ramp Pedestrian*

Kesimpulan

Berdasarkan hasil evaluasi yang telah dilakukan, desain *existing ramp pedestrian* pada Kawasan Pusat Perkantoran X secara umum telah memenuhi parameter geometrik dasar berupa kemiringan *ramp* dan lebar jalur sesuai kebutuhan sirkulasi kawasan. Namun demikian, konfigurasi *bordes* dengan interval ±40meter masih belum optimal dalam mendukung kenyamanan pengguna dan prinsip aksesibilitas universal, khususnya bagi lansia, penyandang disabilitas, serta pengguna dengan keterbatasan mobilitas. Selain itu, pada kondisi darurat, konfigurasi jalur *existing* berpotensi memengaruhi kelancaran pergerakan pengguna sehingga fungsi *ramp* sebagai jalur evakuasi kawasan masih perlu ditingkatkan. Hasil *redesign* menunjukkan peningkatan terhadap kenyamanan, keselamatan, aksesibilitas universal, dan fungsi evakuasi kawasan sehingga desain usulan dinilai lebih mampu mendukung prinsip *sustainable mobility* dan *green building* (Green Building Council Indonesia, n.d.). Secara lebih luas, desain usulan juga mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya SDG 3, SDG 9, dan SDG 11 melalui penyediaan infrastruktur kawasan yang aman, inklusif, tangguh, dan berkelanjutan.

Untuk mengatasi kondisi tersebut, dilakukan *redesign* melalui penambahan *bordes* dengan interval ±9 meter, penerapan *tactile paving*, integrasi jalur pesepeda, serta penyediaan area istirahat pengguna kursi roda. Hasil *redesign* menunjukkan peningkatan terhadap kenyamanan pengguna, aksesibilitas universal, keselamatan pergerakan, dan efektivitas fungsi evakuasi kawasan dibandingkan desain *existing*. Selain mendukung sistem sirkulasi yang lebih aman dan inklusif, *redesign* juga memperkuat penerapan prinsip *sustainable mobility* dan *green building* melalui pengembangan jalur *pedestrian* yang lebih adaptif dan ramah lingkungan.

Berdasarkan hasil studi ini, saran ditujukan kepada pihak perencana, konsultan desain, dan pengelola proyek agar aspek aksesibilitas universal dan keselamatan pengguna tidak hanya difokuskan pada pemenuhan parameter geometrik dasar, tetapi juga mempertimbangkan kenyamanan pengguna dan efektivitas sirkulasi kawasan secara menyeluruh. Pada pengembangan selanjutnya disarankan dilakukan simulasi pergerakan pengguna pada kondisi darurat serta evaluasi kapasitas jalur terhadap kepadatan pengguna sehingga implementasi desain dapat berjalan lebih optimal pada tahap konstruksi maupun operasional bangunan.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terimakasih kepada pihak proyek Kawasan Pusat Perkantoran X, dosen pembimbing Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya, dosen pembimbing lapangan, serta seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan studi ini.

Referensi

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2017). *Peraturan Menteri PUPR Nomor 14/PRT/M/2017 tentang Persyaratan Kemudahan Bangunan Gedung*. Jakarta: Kementerian PUPR.

 ISSN 2987-677x

The Center for Universal Design. (1997). *The Principles of Universal Design. North Carolina State University*. https://design.ncsu.edu/research/center-for-universal-design/

Green Building Council Indonesia. (n.d.). *Greenship Rating Tools*. Jakarta: Green Building Council Indonesia. https://www.gbcindonesia.org/greens/new pada 04 Mei 2026

Dinas Cipta Karya, Tata Ruang dan Pertanahan, Provinsi DKI Jakarta. *Ketentuan Teknis Prasarana dan Sarana DISABILITAS Pada bangunan Gedung Jakarta: Dinas Cipta Karya dan Pertanahan DKI.* Diunduh dari https://dcktrp.jakarta.go.id/website-admin/storage/ppid/informasi_publik/Buku%20Saku%20Disabilitas.pdf

 ISSN 2987-677x

Pembuatan *Standart* Prosedur Operasional pada Depo Container PT Duanta Adji Sejahtera dengan Menggunakan Metode JSA

Ivan Gunawan [1] Muhammad Habibi[2]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ ivangunawan@ukwms.ac.id

✉ habibiirawan971@gmail.com

Praktik keinsinyuran merupakan kegiatan yang bertujuan untuk mengaplikasikan ilmu teknik secara langsung di dunia kerja. Penelitian ini dilaksanakan di PT Duanta Adji Sejahtera yang bergerak di bidang pengelolaan depo kontainer. Tujuan dari praktik ini adalah untuk memahami sistem operasional depo kontainer serta mengidentifikasi permasalahan yang terjadi di lapangan. Metode yang digunakan meliputi observasi, wawancara, dan dokumentasi. Hasil menunjukkan bahwa operasional depo telah berjalan dengan baik, namun masih terdapat beberapa kendala seperti efisiensi penumpukan kontainer dan penerapan K3. Oleh karena itu, diperlukan peningkatan sistem manajemen dan penggunaan teknologi untuk mendukung operasional yang lebih optimal.

Kata kunci: Keinsinyuran, Depo Kontainer, Operasional, K3, Logistik

Pendahuluan

Latar belakang praktik keinsinyuran ini adalah pentingnya pemahaman terhadap sistem kerja di dunia industri, khususnya pada sektor logistik. Depo kontainer memiliki peran penting dalam rantai distribusi barang. Tujuan dari kegiatan ini adalah untuk memahami proses operasional dan penerapan prinsip keinsinyuran di lapangan.

Metode

Pembuatan *Standart* Prosedur Operasional dengan Metode JSA.

Hasil Kerja

Menemukan dan merancang cara terbaik untuk meminimalisir risiko kecelakaan kerja pada kegiatan operasional di depo container melalui penerapan metode *Job Safety Analysis* (JSA) secara sistematis, terukur, dan berkelanjutan.

Kegiatan operasional di depo kontainer, khususnya pada proses bongkar muat, merupakan aktivitas dengan tingkat risiko kecelakaan kerja yang tinggi. Aktivitas ini melibatkan penggunaan alat berat seperti *reach stacker*, forklift, dan truk trailer, serta interaksi langsung dengan pekerja di lapangan yang memiliki potensi bahaya dari berbagai aspek, baik manusia, mesin, metode kerja, maupun lingkungan. Di Depo Container PT Duanta Adji Sejahtera, kegiatan bongkar muat berlangsung secara intensif dengan tuntutan kecepatan dan ketepatan pelayanan, sehingga meningkatkan potensi terjadinya kecelakaan kerja apabila tidak dikelola dengan baik.

Setelah data diolah dengan metode JSA adapun SOP yang harus dikerjakan supaya Menjamin keselamatan dan kesehatan kerja (K3) dalam seluruh aktivitas operasional depo container, serta meminimalisir risiko kecelakaan kerja melalui penerapan prosedur kerja yang aman dan terstandarisasi. Fakta dilapangan SOP yang berlaku adalah manajemen sudah menyiapkan APD yang sesuai dengan K3 yang berlaku di dunia kerja, sedangkan para pekerja depo belum sepenuhnya memahami pentingnya APD untuk kesalamatan kerja namun setelah metode HIRADC & JSA ini terbentuk adapun SOP baru terbentuk. SOP ini berlaku untuk seluruh kegiatan: Pengaitan tali kapal ke bolder dermaga, pengangkatan (*lifting*) *container empty*, *stuffing* pupuk dari *dump truck* ke *container*, *stuffing* semen dari *container* ke *dump truck.*

Langkah Kerja	Bahaya	Risiko	Tingkat Risiko	Cara Minimalisir	Pengendalian Risiko
Pengaitan tali kapal ke bolder dermaga	Benturan	Benturan tali serta gesekan tali	*Ekstreme Risk*	Penggunaan alat APD sesuai SOP yang berlaku	Melakukan pelatihan tenaga kerja dan penjelasan tentang pentingnya menjaga K3 dalam pekerjaan
Ampra *container empety* untuk kegiatan *stuffing*	Tertabrak	Pengunaan alat berat	*Moderate Risk*	Pelatihan operator serta pengecekan SIO berkala	Melakukan pelatihan sesuai standard terbaru pada operator
Stuffing pupuk dari *dump truck* ke *container*	Terjepit dan tertimpa	Terjepit serta tertimpa *cargo*	*Low Risk*	Penggunaan alat bantu serta APD	Pengadaan alat bantu kerja serta pelatihan gestur tubuh
Stuffing semen dari *container* ke *dump truck*	Terjatuh dan tertimpa	Ketinggian serta tertimpa *cargo*	*Ekstreme Risk*	Penggunaan alat bantu serta APD	Pengadaan alat bantu kerja serta pelatihan gestur tubuh

 ISSN 2987-677x

Kesimpulan

Berdasarkan hasil praktik, dapat disimpulkan bahwa operasional depo telah berjalan dengan baik namun masih memerlukan peningkatan dalam aspek efisiensi dan keselamatan kerja. Penerapan teknologi dan manajemen yang lebih baik sangat diperlukan.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Pimpinan dan seluruh staf Depo Container Duanta Adji Sejahtera yang telah memberikan kesempatan dan fasilitas selama pelaksanaan praktek.
2. Pembimbing lapangan dengan Bapak Ir. Pius X Rooswan Hapmono, S.T., M.T., IPM. yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan pengetahuan praktis selama kegiatan berlangsung.
3. Dosen pembimbing dengan Dr. Ir. Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng. yang telah memberikan masukan dan dukungan dalam penyusunan laporan ini.
4. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu dalam penyelesaian laporan ini.

Referensi

Achmad, C., Sugeng, S., Syahrial, T., Erwin, S., & Risa, N. (2020). Penerapan metode HIRADC sebagai upaya pencegahan risiko kecelakaan kerja pada divisi operasi pembangkit listrik tenaga gas uap. *Jurnal Bisnis dan Manajemen (Journal of Business and Management)*, *20*(2), 41–64.

Afandi, R., Desrianty, A., & Yuniar, Y. (2014). Usulan penanganan identifikasi bahaya menggunakan teknik hazard identification risk assesment and determining control (HIRADC) (Studi Kasus: PT. Komatsu Undercarriage Indonesia). *Reka Integra*, *2*(3), 25–35.

Afnella, W., & Utami, T. N. (2021). Analisis risiko kecelakaan kerja metode HIRA (hazard identification and risk assessment) di PT X. *PREPOTIF: Jurnal Kesehatan Masyarakat*, *5*(2), 1104–1012.

Agung, A. M., Pangastuti, N., & Parningotan, S. (2024). analisis manajemen risiko kecelakaan kerja pada mesin automatic bar bending dengan metode HAZARD identification, risk assessment and determining control (HIRADC) pada PT Faza Jaya Pratama. *Ranah Research: Journal of Multidisciplinary Research and Development*, *6*(5), 1923–1933.

Armstrong, M. (1999). *Manajemen Sumber Daya Manusia*. Jakarta : Elex Media Komputindo.

Darmayani, S., Sa'diyah, A., Supiati, Muttaqin, M., Rachmawati, F., Widia, C., Pattiapon, M. L., Rahayu, E. P., Indiyati, D., Sunarsieh, Bachtiar, E., Rahayu, E. P., & Meditama, R. F. (2023). *Kesehatan Keselamatan Kerja (K3)*. Bandung : Widina Bhakti Persada.

Fadhilah, F., Amrina, E., & Gusvita, R. E. (2023). Hazard identification, risk assessment and determining control (HIRADC) in mining operations at PT Semen Padang. *MOTIVECTION: Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering*, *5*(3), 473–484.

Ginting, D., H.Togatorop, T., & Marbun, Y. V. (2024). Pemasukan alat bongkar muat kapal dari luar daerah pabean ke kawasan bebas batam pada PT Golden Gate Mandiri Batam. *Journal of Maritime and Education (JME)*, *6*(1), 635–638.

Handoko, J. C., & Rahardjo, J. (2017). Perancangan hazard identification, risk assessment, and determining control (HIRADC) di Schneider Electric Cikarang. *Jurnal Titra*, *5*(2), 159–164.

Hartono, H., & Hernawati, T. (2018). Evaluasi implementasi sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja dan upaya perbaikan dengan metode HIRADC (Studi kasus di perusahaan injection molding Tangerang). *Journal Industrial Manufacturing*, *3*(2), 33–42.

Harys. (2020). *Kerangka Penelitian*. JOPGlass. https://www.jopglass.com/kerangka-penelitian/

Hasiany, S., Difa, G. F., Awan, F. N., & Prasetio, B. (2024). Risk analysis using HIRADC method (hazard identification risk assessment and determining control) in the palm oil processing plant of PT Perkebunan Nusantara VII Unit Bekri Lampung Tengah. *World Chemical Engineering Journal*, *8*(1), 1–5.

Hidayat, D. F., & Hardono, J. (2021). Penerapan metode HIRADC pada bagian proses penerimaan di PT CA Application of the HIRADC method in the receiving process section at PT CA. *Journal Industrial Manufacturing*, *6*(2), 87–92.

Huda, M. N. (2018). Optimalisasi sarana dan prasarana dalam meningkatkan prestasi belajar siswa. *Ta'dibi: Jurnal Manajemen Pendidikan Islam*, *6*(2), 51–69.

Irzal. (2016). *Dasar-Dasar Kesehatan dan Keselamatan Kerja* (1st ed.). Jakarta : Kencana.

Izza, A. N. (2022). *Analisis penerapan metode HiRADC sebagai upaya pengendalian risiko bahaya pada proses produksi baterai di PT Wijaya Karya Industri Energi, Tbk. Komplek Industri Wika Bogor*. Universitas Airlangga.

Jannah, M. R., Unas, S. El, & Hasyim, M. H. (2017). Analisis risiko keselamatan dan kesehatan kerja (K3) melalui pendekatan HIRADC dan metode job safety analysis pada studi kasus proyek pembangunan menara X di Jakarta. *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya*, 1–9.

Kaplan, S., & Garrick, B. J. (1981). On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*, *1*(1), 11–27.

Laksana, V. E., Kosasih, W., & Doaly, C. O. (2018). Analisis potensi bahaya menggunakan metode HIRADC sebagai upaya pencegahan kecelakaan kerja (Studi kasus: PT Supreme Cable Manufacturing & Commerce). *Seminar Nasional Teknologi Dan Sains III 2018 Peran Perguruan Tinggi Dalam Pembangunan Berkelanjutan Untuk Kesejahteraan Masyarakat*, 251–257.

Mangkunegara, A. A. A. P. (2021). *Manajemen Sumber Daya Manusia Perusahaan*. Bandung : Remaja Rosdakarya.

Marfuah, H. H., Hapsari, Y. T., & Kurniawanti. (2024). Analisis potensi bahaya dengan metode hazard identification, risk assessment and determine control (HIRADC) studi

 ISSN 2987-677x

kasus : UMKM Logam di Yogyakarta. *Jurnal Rekayasa Industri (JRI)*, *6*(1), 62–73.

Mawardani, A., & Herbawani, C. K. (2022). Analisa penerapan HIRADC di tempat kerja sebagai upaya pengendalian risiko: A literature review. *PREPOTIF : Jurnal Kesehatan Masyarakat*, *6*(1), 316–322.

Nando, R. N., & Yuamita, F. (2021). Analisis kesehatan dan keselamatan kerja dengan metode hazard dan operability pada area kerja lantai produksi CV Lebu Berkah Jaya. *Journal of Industrial Engineering UPY*, *1*(1), 17–22.

Nurhayati, R. D., & Purnomo, Y. S. (2023). Analisis risiko K3 dengan Metode HIRADC pada industri pengolahan makanan laut di Jawa Timur. *INSOLOGI: Jurnal Sains Dan Teknologi*, *2*(3), 450–461.

Pramadi, M. I., Suprapto, H., & Yanti, R. R. (2020). Pencegahan kecelakaan kerja dengan metode HIRADCdi perusahaan fabrikasi dan machining. *JENIUS : Jurnal Terapan Teknik Industri*, *1*(2), 98–108.

Purnama, D. S. (2015). Analisa penerapan metode HIRARC dan HAZOPS dalam kegiatan identifikasi potensi bahaya dan resiko pada proses unloading unit di PT Toyota Astra Motor. *Jurnal PASTI*, *3*(3), 103–111.

Purwosutjipto, H. M. N. (2008). *Pengertian Pokok Hukum Dagang Indonesia : 3. Hukum Pengangkutan*. Jakarta : Djambatan.

Ramadhania, M., Saputra, N., Herdiansyah, D., & Dihartawan. (2021). Analisis hazard identification, risk assesment, determining control (HIRADC) pada aktivitas kerja di UD Ridho Abadi Tangerang Selatan Tahun 2020. *Environmental Occupational Health and Safety Journal*, *2*(1), 59–68.

Ramli, S. (2010). *Pedoman Praktis Manajemen Risiko Dalam Perspektif K3 OHS Risk Management*. Jakarta : Dian Rakyat.

Rizqiko, A., & Surury, I. (2022). Analisis hazard identification, risk assesment dan determining control di perusahaan konstruksi. *Jurnal Kesehatan Masyarakat Indonesia*, *17*(3), 29–39.

Saputro, T., & Lombardo, D. (2021). Metode hazard identification, risk assessment and determining control (HIRADC) dalam mengendalikan risiko di PT Zae Elang Perkasa. *Jurnal Baut dan Manufaktur: Jurnal Keilmuan Teknik Mesin Dan Teknik Industri*, *3*(1), 23–29.

Sari, R. M., Syahputri, K., Rizkya, I., & Siregar, I. (2017). Identification of potential hazard using hazard identification and risk assessment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *180*, 1–8.

Schafer, J.L. & Kang, J. (2008). Average causal effects from nonrandomized studies: A practical guide and simulated example. *Psychological Methods*, 13, 379-313.

Sendy, T., & Boni, G. (2024). Analisis keselamatan kerja pada proses produksi tepung: Penerapan keselamatan dan kesehatan kerja menggunakan metode HIRADC pada proses produksi tepung HIRARC. *JETISH: Journal of Education Technology Information Social Sciences and Health*, *3*(2), 1141–1149.

Silaen, N. R., Syamsuriansyah, Chairunnisah, R., Sari, M. R., Mahriani, E., Tanjung, R., Triwardhani, D., Haerany, A., Masyruroh, A., Satriawan, D. G., Lestari, A. S., Arifudin, O., Rialmi, Z., & Putra, S. (2021). *Kinerja Karyawan*. Bandung : Widina Bhakti Persada.

Supriyadi, S., Nalhadi, A., & Rizaal, A. (2015). Identifikasi bahaya dan penilaian risiko K3 pada tindakan perawatan & perbaikan menggunakan metode HiRARC (hazard identification and risk assesment risk control) pada PT X. *Prosiding Seminar Nasional Riset Terapan SENASSET*, 281–286.

Tambunan, E. B. M., Sjarifudin, D., Kurnia, H., & Mubarok, M. R. (2023). Analisis pengurangan tingkat risiko kecelakaan kerja pada proses pembuatan konveyor dengan metode HIRADC. *Jurnal Keselamatan Kesehatan Kerja Dan Lingkungan*, *4*(2), 136–146.

Urrohmah, D. S., & Riandadari, D. (2019). Identifikasi bahaya dengan metode hazard identification, risk assessment and risk control (HIRARC) dalam upaya memperkecil risiko kecelakaan kerja di PT PAL Indonesia. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin*, *8*(1), 34–35.

Wang, X., & Peng, W. (2019). *Innovative Production And Construction*. New Jersey : World Scientific.

Wirantika, I. N. G. A. S. (2022). *Analisis Penerapan Manajemen Risiko Keselamatan Dan Kesehatan Kerja (K3) Dengan Metode Hazard Identification Risk Assessment and Determining Control (HIRADC)*. Politeknik Negeri Bali.

Yanti, R. O. V. (2023). *Analisis Risiko K3 Dengan Metode Hazard Identification Risk Assessment & Determining Control (HIRADC) Pada Pekerja Di PT. Wijaya Karya Beton Tbk. (Wika Beton) Boyolali*. Universitas Muhammadiyah Surakarta.

 ISSN 2987-677x

Studi Kasus Pelaksanaan Persyaratan K3 Kelistrikan Instalasi Distribusi dan Pemanfaatan Tenaga Listrik (IPTL) di Gedung Manajemen PT "S" Surabaya

Hadi Setiyawan[1] Rasional Sitepu[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ hadistw1970@gmail.com
✉ Rasional@ukwms.ac.id.com

Listrik sebagai sumber energi sangat penting untuk mendukung kelancaran operasional perkantoran, dan industri manufaktur secara aman, handal dan akrab terhadap manusia dan lingkungan. Studi kasus ini bertujuan untuk menilai kelayakan teknis instalasi jaringan kelistrikan dijaringan distribusi instalasi pemanfaatan listrik di gedung perkantoran PT "S" Surabaya, dengan melakukan pemeriksaan pada peralatan listrik di Pebangkitan, Transformator distribusi, peralatan Pemanfaatan (pembebanan), sistem proteksi arus lebih, dan kualitas penyaluran dengan perhitungan keseimbangan arus antar fasa. Observasi lapangan untuk pengumpulan data teknis, melalui penilaian dengan *checklist*, serta perhitungan dan pengukuran dengan mengacu pada standar kelistrikan yaitu nasional (SNI), maupun internasional dan atau negara lain sebagaimana tercantum di Peraturan Menteri Tenaga Kerja PERMEN No. 12 Tahun 2015. Hasil studi kasus menunjukkan keseluruhan instalasi listrik meliputi kemampuan hantar arus kabel (KHA), pemilihan pemutus sirkuit (KHA proteksi), dan pendistribusian beban telah memenuhi standar. Perhitunngan ketidakseimbangan arus antar fasa dilakukan untuk penilaian standar. Penilaian proteksi terhadap bahaya petir juga didapatkan hasil yang layak. Disimpulkan bahwa Instalasi kelistrikan dari jaringan distribusi sampai dengan jaringan pemanfaatan (IPTL) dan Penyalur PETIR di gedung perkantoran PT "S" Surabaya telah memenuhi standar kelayakan.

Kata kunci: Permenaker No. 12 Tahun 2015, Distribusi Kelistrikan, Keseimbangan Arus Fasa, Persyaratan K3 Kelistrikan, Pemeriksaan dan Pengujian

Pendahuluan

Kontinuitas penyaluran daya listrik di perkantoran dan industri di PT "S" Surabaya sangat dipengaruhi kelayakan sistem instalasi mulai sistem distribusi listrik sampai dengan instalasi pemanfaatan. Kompleksitas alat dan kebutuhan energi yang besar memerlukan sistem distribusi listrik yang handal dan aman. Salah satu aspek terpenting dalam instalasi jaringan listrik adalah penerapan sistem proteksi yang handal untuk mencegah kerusakan pada alat dan mengurangi potensi risiko keselamatan bagi manusia akibat adanya bahaya arus pendek, kelebihan beban, atau faktor ketidakseimbangan antar fase. Keseimbangan arus antar fase juga merupakan indikator untuk mencegah *overheating* dan atau efisiensi dalam pemanfaatan energi listrik. Pemenuhan persyaratan Keselamatan dan Kesehatan Kerja Kelistrikan yang kemudian disingkat K3 Kelistrikan saat perencanaan, pemasangan dan pemeliharaan merupakan upaya memastikan keamanan di tempat kerja, sesuai dengan regulasi teknis berupa Standar Nasional Indonesia bidang listrik seperti PUIL yang juga merupakan SNI dan Permenaker No. 12 Tahun 2015. Studi kasus ini dilakukan pada sistem mulai dari pembangkitan distribusi dan instalasi pemanfaatan tenaga listrik IPTL serta penyalur Petirdi gedung perkantoran PT "S" Surabaya.

Metode

Metode dan Tempat Pelaksanaan

Lokasi penelitian berada di area industri PT "S" Surabaya berupa Gedung Perkantoran, adalah salah satu perusahaan milik negara yang didirikan pada 28 Februari 1974 di Surabaya guna mendukung serta mengembangkan kawasan industri di Indonesia, terutama di Jawa Timur. Sebagai salah satu kawasan industri terbaik, terbesar dan berpengalaman selama lebih dari 40 tahun, PT "S" Surabaya dikembangkan berdasarkan master plan yang dirancang dengan baik untuk memenuhi kebutuhan industri dan lingkungan yang nyata dan dikelola secara profesional untuk meningkatkan efisiensi produktivitas. Pelaksanaan studi kasus dilakukan pada semester Gasal 2025/2026, mencakup observasi lapangan pada sistem distribusi tenaga listrik, trafo distribusi, instalasi pemanfaatan dan sistem penyalur petir.

Prosedur Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data meliputi:

a. Observasi langsung: Peninjauan kondisi instalasi pembangkit listrik sebagaisumber listrik cadangan, sistem distribusi listrik tegangan menengah 20 kV, pemeriksaan (*checklist*) kemampuan hantar arus atau ukuran kabel, proteksi arus (MCCB), pengaman *grounding*, serta penilaian *wiring* diagram di dokumen *as built drowing*.

 ISSN 2987-677x

b. Wawancara terstruktur: Dilakukan kepada petugas teknisi listrik terkait dokumen prosedur kerja, pelaksanaan SOP K3, pengalaman kerja, dan peristiwa insiden serta kendala di lapangan.
c. Dokumentasi teknis: Pengumpulan data spesifikasi peralatan, gambar instalasi, hasil inspeksi sebelumnya, dan pedoman SOP perusahaan.
d. Studi pustaka: Merujuk pada standar nasional (PUIL 2020) dan peraturan menteri (Permenaker No. 12 Tahun 2015 jo 33 Tahun 2015).

Metode Analisis

Metode yang digunakan adalah deskriptisi kualitatif untuk mendeskripsikan kondisi lapangan sehinggah membutuhkan table *checklist*, dan kuantitatif untuk menghitung arus beban, kapasitas hantar arus (KHA), rating peralatan proteksi, serta analisis ketidak seimbangan arus antar fase dengan alat ukur.

Hasil dan Pembahasan

Situasi Permasalahan

Gedung Perkantoran PT "S" Surabaya merupakan pelanggan PLN kapasitas 865 KVA, sehinggah menggunakan sistem distribusi tenaga listrik yang berupa Gardu Beton dengan kapasitas trafo distribusinya S = 1000 kVA (UNINDO). Keandalan sistem sangat krusial karena gangguan dapat menghentikan operasional kantor PT "S" Surabaya, isu utama yang dikaji adalah kesesuaian sistem proteksi arus lebih dan tingkat keseimbangan beban antar fasa untuk mencegah overheating pada motor dan trafo serta penyalur PETIR.

Rumusan Masalah

1. Menentukan bagaimana kelayakan teknis sistem kelistrikan di pembangkita cadangan (*diesel*) sistem distribusi pada gardu beton yang menggunakan trafo 1000 kVA di gedung perkantoran PT "S" Surabaya?
2. Bagaimana menentukan persyaratan K3 kelistrikan di Instalasi Pemanfaatan Tenaga Listrik meliputi panel LVMDP, LVSDP, dan proteksi petir sesuai standar?

Analisis Permasalahan

A. Analisis Persyaratan Pemasangan K3 Transformator Distribusi

Kegiatan pemeriksaan yang meliputi penilaian, perhitungan dilakukan pada Transformator Minyak pada distribusi 20.000 Volt.

Spesifikasi Transformator:

Merk Trafo UNINDO	
Kapasitas Daya Nyata Total (S)	: 1000 kVA.
Tegangan Primer	: 20.000Volt
Impedansi Z%	: 5.0 %
Jenis Minyak / Pendinginan	: Diala B/ONAN
Kenaikan Suhu	: kelas B
BIL	: 125 kV

Penilaian kesesuaian Persyaratan K3 Pemasangan Transformator 1000 KVA, mengacu pada standar PLN buku 5 terkait tata letak Trafo, saluran dan jenis kabel, Kubikel dan Proteksi. Persyaratan K3 gardu beton meliputi Pencahayaan, Sirkulasi udara, jarak aman terhadap resiko SHOCK, dan kelengkapan Proteksi terhadap beban berupa detector DGPT yang dilengkapi tabung level Minyak Trafo. Dengan *Setting* Proteksi DGPT : (sesuai standar produk)
Pressure (tekanan) = 0.3 Bar
Akumulasi Gas = 170 cm^3
Setting Temp. = 85 ^oC (*buzzer*) dan, T= 95 ^oC (*trip*)

Pemeriksaan persayaratan K3 pengukuran dilakukan di 3 fasa sbb :

- Hasil Pengukuran Arus Fasa R (Ir) : 388 A
- Hasil Pengukuran Arus Fasa S (Is) : 343 A
- Hasil Pengukuran Arus Fasa T (It) : 347 A
- Pengukuran Arus Penghantar Netral (In) : 0
- Pengukuran Arus Penghantar PE (Ipe) : 0
- Perhitungan arus I rata-rata = (Ir + Is + It) / 3 = (388+3343+347) /3 = 359 A
- Arus Rerata = 359 Amper

B. Analisis Ketidakseimbangan Arus

Ia = $\frac{Ir}{Irata-rata} = \frac{388}{359} = 1.08$

Ib = $\frac{Is}{Irata-rata} = \frac{343}{359} = 0.95$

Ic = $\frac{It}{Irata-rata} = \frac{347}{359} = 0.96$

Prosentase keseimbangan beban, pada Arus

= $\frac{(Ia-1)+(Ib-1)+(Ic-1)}{3} x\ 100\%$

= $\frac{(1.08-1)+(0.95-1)+(0.96-1)}{3} x\ 100\%$

= $\frac{(0.08)+(0.05)+(0.04)}{3} x\ 100\% = 9\%$

Hasil perhitungan keseimbangan beban menunjukkan nilai keseimbangan masih di bawah batas maksimal 10% (sesuai standar dan normal), sehingga sistem dinilai cukup seimbang.

Tabel 1. Pemeriksaan Transformator

Temuan	Penilaian	Rekomendasi
1. FCO Berada tepat di atas Trafo	PUIL 20011 131.8.1. 1 MOD 2.2.1.1) Pada setiap perlengkapan listrik harus tercantum dengan jelas: a) nama pembuat dan atau merek dagang b) daya, voltase, dan/atau arus pengenal c) data teknis lain seperti disyaratkan SNI atau standar yang relevan.	FCO harus dipindahkan pada ruang terbuka
2.Trafo dalam kondisi kotor berdebu	PUIL 2011 9.12.1.2.3 Insulasi sakelar minyak, transformator dan sebagainya pada waktunya harus dibebaskan dari air, dibersihkan dari debu dan arang, serta dibebaskan dari zat asam, antara lain dengan cara penyaringan.	Harus dilakukan perawatan preventif dan penjadwalan pembersihan rutin

 ISSN 2987-677x

C. Analisis Persyaratan K3 Pemasangan Pesawat Tenaga (Genset)

Generator set atau pesawat tenaga yang digunakan PT "S" Surabaya merupakan pembangkit listrik yang digunakan untuk penyuplai daya listrik saat gangguan PLN berupa pemadaman baik singkat maupun lama. Data Pesawat Tenaga (dengan mesin diesel) di PT S Surabaya menggunakan mesin diesel man dan generator STAMFORD *Continues* 810 KVA dengan bahan bakar SOLAR.

Kapasitas Genset	: 810 KVA / 648 KW
Tegangan	: 400 Volt
Frekuensi	: 50 Hz
Rpm	: 1500 rpm
PF	: 0.80
Insulation Class	: H
Temperature Rise	: 125 °C
Enclosure	: IP23
Duty	: *Continous* (s1)

D. Analisis Persyaratan K3 Pemasangan IPTL

Hasil Pemeriksaan – Beban di Panel Utama Tegangan Rendah (LVMDP)

Gawai Pengaman Arus Lebih atau ACB Utama kapasitas 2500 AACB disetting 0.4% = 1000 A, dan pengukuran dilakukan pada jam 10.00 WIB.



Gambar 1. Pengukuran Arus LVMDP

Hasil Pengukuran Tegangan :
Tegangan Phasa Netral
Fasa R-N = 221 V, S-N = 229 V, T-N = 218 V

Tegangan antar Phasa :
Fasa R-S = 385 V, R-T = 383 V, S-T = 385 V

Hasi pengukuran tegangan sudah sesuai SPLN1-1995-Tegangan, Standar pasal 4 no.9 ketentuan variasi tegangan pelayanan (+5%,-10%)

Hasil Pengukuran besaran Arus:
Fasa R = 386 Ampere, S = 343 Ampere, T = 347 Ampere
Fasa N = 0 Ampere, dan fasa PE = 0 Ampere
Besar Arus Rata-rata = R + S + T
= (386 + 343 + 347)/3 = 358.7 A

Dengan Nilai ACB 1000 Ampere didapat daya :
S = $\sqrt{3}$ x V x I
= 1,73 x 385 V x 1000 A
= 666.050 VA

Pemeriksaan dan Pengujian – Perhitungan Keseimbangan Beben LVMDP

Berdasarkan *name plate* trafo daya 1000 KVA, maka pemakaian beban pada saat waktu pengukuran (jam 10 pagi) yaitu hanya terpakai 31 %.

$$I\ Full\ Load = \frac{S}{Vx\sqrt{3}} = \frac{1.000.000}{400x\sqrt{3}} = 1.445{,}1\ A$$

(jika *safety* faktor pemakaianya 80% maka = 1,156 Ampere)

$$I\ rata\text{-}rata = \frac{Ir+Is+It}{3} = \frac{386+353+347}{3} = 358.7\ A$$

$$I\ Pemakaian = \frac{IRata-rata}{IFullload} = \frac{357.8}{1.156} = 0.31$$

Pemeriksaan dan Pengujian

Perhitungan dan Penilaian Pengaman /GPAL jenis Air Circuit Breaker (ACB) di panel utama LVMDP sebagai berikut :



Gambar 2. *Setting Ir/Isd* dan *Rating Icu/Ics* ACB 2500 A

I beban = 1.445,1 A (100 % pembebanan)
KHA proteksi = In ACB
= 115% x 1.445,1 = 1.661,8 A

Dipilih ACB dengan *breaking kapasitas* yang besar untuk keamanan dari potensi *interrupting rating* atau ledakan (BLAST) sebesar 2500 A, 50 KA.ACB *nominal* In = 2500A, dengan mengatur *setting* Ir pada 0.4= 1000 A.

Analisis: Kapasitas GPAL terpasang 1000 Ampere dengan beban maksimal perencanaan dan sesuai kelas pelanggan PLN 865 KVA adalah 1.156 Amper, dan beban pemakaian rata-rata beban puncak di perkantoran (jam 10 pagi) sebesar I rerata 359 Ampere, maka pemilihan dan *setting* pengaman telah memenuhi standar PUIL.

Perhitungan Luas Penampang Penghantar LVMDP

KHA penghantar (Kabel) dengan *safety factor* 125 %, sesuai standar PUIL adalah (1,25 x arus nominal):
KHA = 125% x In
KHA = 1,25 x 1.445,1 A (100% kapasitas Trafo)
KHA = 1.806,4 A
KHA Kabel dari sekunder trafo ke LVMDP adalah kabel tembaga dengan isolasi PVC : NYY 8 x (1c x 185 mm2)
Sesuai dengan PUIL 2011 Tabel 7.3-5a KHA penghantar jenis isolasi PVC di udara inti tunggal adalah :

 ISSN 2987-677x

KHA Kabel inti tunggal NYY 2 x 1c x 185 mm2 = 1022 A Pemilihan jenis Isolasi PVC merupakan standar penghantar diudara terbuka dan KHA penghantar terpasang < Iz (KHA dengan SF=125 %, beban 100 %) Maka tidak sesuai (std PUIL 2011) jika pembebanan Nominal, tetapi masih aman senyampang beban rerata yg dipakai PT "S" Surabaya sebesar 31 %.

Hasil Pemeriksaan dan Pengujian – Penyalur Petir

Pemeriksaan instalasi pengaman petir meliputi pemeriksaan sistem penerima udara (*air termination*), konduktor penurunan (*down conductor*), dan pembumian (*grounding*) mulai dari jenis dan fisik material.

Tabel 2. Tabel Data Teknis Instalasi Penyalur Petir

Nama Bangunan	Gedung PT. "S" SURABAYA
Jenis Air Terminal	Elektrostatik-ESE
Nomor Serie / Merk	KURN
Jumlah	1 (satu) Unit
Tower / Mast	Pipa Galvanized 1 1/2", H : 5.2 meter
Luas / Tinggi Bangunan	L : 50 m, P : 40 m / T : 45 m
Radian Protection	Tidak ada data/ typical = 85 meter
Rod Elektroda Bumi	Batang ROD tembaga : 25 mm^2



Gambar 2. PengukuranTahanan Pembumian

Hasil Pemeriksaan Persyaratan K3 Penyalur Petir

Pengukuran tahanan pembumian dilakukan dengan menggunakan alat ukur resistensi pembumian *Earth Tester* menghasilkan nilai R = 6.52 Ohm

Alternatif Solusi

a. Melakukan pemeriksaan berkala dan pengujian minimal 5 tahun sekali sesuai amanat permenaker no 12 tahun 2015.
b. Mengganti Kabel PVC penghantar LVMDP menjadi 3 x 240 mm^2 untuk mendapatkan nilai maksimal yaitu menjadi 11x (1c x 240 mm^2) dengan demikian kemampuan hantar arus menjadi 1.836,4 Ampere.
c. Pemeliharaan prediktif untuk memeriksa suhu secara periodik menggunakan *thermal camera* pada koneksi terminal MCCB dan trafo sehinggah dapat terdeteksi secara dini adanya 'hotspot' akibat beban lebih atau, kendor sambungan atau korosi.
d. Menambahkan *ground* ROD pada pembumian Petir agar didapat standar nilai tahanan pembumian kurang dari 5 ohm sesuai Permenaker dan 3 ohm sesuai standar Produk.
e. Melengkapi dokumen pemeriksaan Radius Pengamanan pada PETIR ESE.

Rekomendasi Solusi

1. Mempertahankan jadwal pemeliharaan preventif berkala setiap mingguan, bulanan atau tahunan sesuai standar peralatan dengan melakukan kegiatan perhitungan kesesuaian *as built drawing*, penilaian,pengukuran, dan testing (riksa uji berkala) di lembaga RIKSA UJI PJK3 kementrian tenaga kerja agar peralatan listrik bekerja normal, aman dan andal.
2. Sertifikasi Ahli K3 Listrik sesuai Permenaker 12 Tahun 2015.
3. Mengganti peralatan listrik atau menata ulang penempatan yang tidak standar.
4. Melakukan pengujian minyak trafo agar di dapatkan nilai standar BDV dan pengujian proteksi pada ACB di MDP.
5. Memasang Pengaman Gawai Pengaman Surja (GPS)/ *Surge Protective Device* (*SPD*) secara Internal di Panel Utama dan SDP guna menjaga gangguan akibat tegangan surja yang diakibatkan *switching* dan atau PETIR tak langsung.

Kajian Keselamatan, Kesehatan Kerja (K3), dan Lingkungan

Landasan Hukum dan Komitmen Kebijakan

Implementasi K3 ketenagalistrikan di PT "S" Surabaya didasarkan pada UU No. 1 Tahun 1970 dan Permenaker No. 12 Tahun 2015. Perusahaan memiliki komitmen kuat terhadap budaya *'Safety First'* dan kebijakan *'Zero Tolerance'* terhadap pelanggaran prosedur keselamatan listrik.

Identifikasi Bahaya dan Pengendalian Risiko

Bahaya utama yang diidentifikasi meliputi kejut listrik (*shock)*, busur api (*arc flash*), dan panas berlebih pada koneksi kabel. Pengendalian dilakukan melalui penggunaan APD yang sesuai (sarung tangan isolasi, sepatu *safety*) dan pemeliharaan rutin pada panel distribusi.

Kesehatan Kerja dan Kesiagaan Darurat

Perusahaan menyelenggarakan program *'refreshment'* K3 secara berkala (durasi minimal 120 menit) untuk teknisi. Fasilitas P3K dan jalur evakuasi telah tersedia di area trafo dan IPTL untuk menangani kondisi darurat. fasilitas P3K, serta jalur evakuasi untuk memastikan kesiapan personel dalam kondisi darurat, selaras dengan parameter keselamatan nasional yang berlaku.

Kajian Profesionalisme

Landasan Regulasi dan Relevansi Teknis

Pelaksanaan studi kasus ini berlandaskan pada hierarki regulasi kelistrikan di Indonesia, mulai dari UU Keselamatan Kerja tahun 1970 sampai dengan standar operasional prosedur internal PT S Surabaya. Kepatuhan terhadap PUIL sebagai standar wajib Nasional menjadi acuan teknis utama

 ISSN 2987-677x

dalam mengevaluasi di instalasi pemanfaatan tenaga listrik (IPTL).

Relevansi Kompetensi dengan Studi Kasus

Studi ini membutuhkan kompetensi di bidang teknik ketenaga listrikan, khususnya analisis beban dan sistem proteksi baik di pembangkitan, pendistribusian tegangan menengan MVMDP, dan di IPTLserta penyalur petir. Keahlian dalam menggunakan alat ukur seperti amper meter dan multimeter, *earth tester*, dan pengukur suhu sangat penting untuk pengambilan data dan validasi data lapangan.

Aspek Keberlanjutan

Aspek keberlanjutan diwujudkan melalui efisiensi sistem distribusi yang mengurangi pemborosan energi. Upaya perbaikan berkelanjutan (*continuous improvement*) dilakukan melalui pemeliharaan preventif rutin untuk memperpanjang usia pakai peralatan distribusi. Berkelanjutan (*continuous improvement*), termasuk di dalamnya Pengembangan Keprofesian Berkelanjutan. Hal ini merupakan upaya sistematis untuk menjaga relevansi kompetensi personel melalui proses pembelajaran sepanjang hayat guna menghadapi dinamika perubahan teknologi serta regulasi yang berlaku serta program *training* kelistrikan dan sertifikasi keprofesian kelistrikan baik di lembaga sertifikasi BNSP, LSK ESDM dan PJK3 KEMENAKER.

Kesimpulan

Hasil pemeriksaan dan pengukuran kelistrikan di kantor manajemen PT “S” Surabaya telah ditemukan:

1. Persyaratan teknis yang ditetapkan PUIL dan Peraturan Menteri Tenaga Kerja No. 12 Tahun 2015 belum dilaksanakan terkait pengujian 5 tahun sekali dan Sertifikasi Ahli K3 listrik bagi pekerja kelistrikan diatas 200 KVA.
2. Instalasi Trafo TRAFINDO 1000 kVA menggunakan pengaman MCCB standar baik KHA proteksi dan Interupting ratingnya dan KHA kabel NYY yang sesuai dengan perhitungan beban, namun rumah TRAFO tidak sesuai standar SPLN buku %5 .
3. Dokumen *As Built Drawing* tidak lengkap dan *tidak Update* hal ini menyebabkan kesulitan dalam pemeliharaan.
4. Hasil perhitungan tingkat ketidakseimbangan beban antar fasa sebesar 9% berada dalam batas aman (di bawah 10%).
5. Pemasangan Penyalur PETIR, hanya dilakukan pengamanan langsung jenis *Early Streamer Emision* (ESE) *type* KURN yang tidak dilengkapi dengan dokumen Radius Pengamanan dan ditemukan Grounding yang nilainya di bawah standar Permenaker dan Produk.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terima kasih kepada ALLAH SWT yang telah meridhoi penulisan artikel ini sebagai piranti penyelesaian Program Studi Program Profesi Insinyur. Ucapan terima kasih kepada Ibu dan Ayah tercinta atas doa terbaiknya untuk penulis, terima kasih kepada Bapak Rasional Sitepu sebagai dosen pembimbing pada Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas arahan dan bimbingannya selama ini.

Referensi

Alifino, A. E. M., et al. (2024). Pengujian koordinasi relay arus lebih dan gangguan tanah sebagai proteksi dan keamanan dalam kubikel 20 kV. *Jurnal Ilmiah Sain dan Teknologi*.

Amiruddin, & Hasyim, M. (2020). Optimalisasi keandalan sistem proteksi feeder dengan relay penutup balik. *Jurnal INSTEK*.

Badan Standardisasi Nasional. (2011). *Persyaratan umum instalasi listrik (PUIL) 2011* (SNI 0225:2011).

Ibrahmusa, G. A., et al. (2022). Analisis koordinasi setting relay proteksi pada jaringan distribusi 20 kV penyulang Brenggolo di PT PLN UP3 Kediri Gardu Induk Pare. *Jurnal Teknik Elektro*, 28–36.

Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia. (2015). *Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 12 Tahun 2015 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Listrik di Tempat Kerja*.

Presiden Republik Indonesia. (2012). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 50 Tahun 2012 tentang Penerapan Sistem Manajemen K3.*

Risiyanto, B., & Hadi, S. (2021). *Pemeriksaan dan pengujian kelistrikan di pembangkitan, distribusi dan pemanfaatan sesuai Permenaker Nomor 12 Tahun 2015*. Laporan sertifikasi AK3 listrik.

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja. (1970).

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 10 Tahun 2021 tentang Keselamatan Kelistrikan. (2021).

 ISSN 2987-677x

Perbandingan Kinerja *Paving Block* Biasa dan *Porous* Ditinjau dari Komposisi Penyusun, Variasi Bentuk, dan Ketahanan Struktur dalam Mendukung Infrastruktur Ramah Lingkungan

Akhmad Syauqi Futaki[1] Rasional Sitepu[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ akhmad.syauqifutaki@gmail.com

✉ rasional@ukwms.ac.id

Peningkatan luas kawasan terbangun di perkotaan mengakibatkan berkurangnya area resapan air alami dan melonjaknya volume limpasan permukaan (*surface runoff*) yang membebani kapasitas sistem drainase konvensional. *Paving block* konvensional memiliki performa mekanik yang tinggi tetapi bersifat impermeabel sehingga tidak berkontribusi pada proses infiltrasi air. Praktik keinsinyuran ini bertujuan mengkaji penerapan *porous paving* sebagai solusi teknis peningkatan kemampuan resapan air menggunakan pendekatan *semi-fines pervious concrete*. Metodologi mencakup pengembangan design mix berbasis material lokal, pengujian kuat tekan laboratorium, analisis komparatif performa teknis, serta kajian implementasi pada proyek kawasan komersial di Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) Kura-Kura Bali. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *paving porous* (kode DC06porous) pada umur 37 hari menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 320,36 kg/cm². Nilai ini memenuhi persyaratan mutu kelas K300 yang disyaratkan proyek dengan batas reduksi kuat tekan sebesar 5,87% jika dibandingkan dengan versi konvensional. Konversi produksi *paving* konvensional menjadi *porous* sangat layak secara teknis untuk aplikasi kawasan komersial ramah lingkungan.

Kata kunci: *Paving Porous, Paving Block* Konvensional, *Design Mix,* Kuat Tekan, Drainase Resapan

Pendahuluan

Pertumbuhan kawasan perkotaan dan perluasan area terbangun secara konsisten mengakibatkan berkurangnya lahan resapan air secara signifikan di berbagai daerah. Fenomena ini merupakan konsekuensi langsung dari alih fungsi lahan vegetatif dan tanah terbuka menjadi permukaan kedap air seperti jalan aspal, lapangan beton, dan penutup permukaan konvensional lainnya. Ketika permukaan kedap air mendominasi suatu kawasan, curah hujan yang jatuh kehilangan jalur infiltrasinya ke dalam tanah, sehingga menghasilkan limpasan permukaan (*surface runoff*) dalam volume yang jauh lebih besar daripada kapasitas tampung sistem drainase eksisting. Dampak dari disrupsi hidrologis ini meliputi penurunan muka air tanah akibat minimnya pengisian ulang alami, serta timbulnya banjir lokal dan genangan kronis pada infrastruktur jalan perkotaan.

Salah satu elemen penutup permukaan yang paling umum diaplikasikan di Indonesia adalah bata beton atau *paving block* konvensional. Produk ini secara historis dirancang dengan memprioritaskan kekuatan mekanis dan kapasitas dukung beban yang tinggi untuk memfasilitasi lalu lintas kendaraan maupun pejalan kaki. Karakteristik campuran beton padat yang digunakan menghasilkan struktur masif bebas pori. Akibatnya, koefisien permeabilitas *paving* konvensional sangat rendah (kurang dari 10 mm/jam), sehingga fungsinya secara hidrologis setara dengan aspal atau beton cor penuh, yaitu menjadi media kontributor limpasan permukaan. Selain itu, akumulasi genangan air di atas permukaan paving konvensional mempercepat tingkat keausan agregat dan mereduksi umur layan perkerasan akibat penetrasi air pada celah nat yang terbatas.

Sebagai solusi teknis, teknologi paving porous hadir dengan memodifikasi matriks beton agar memiliki jaringan pori yang saling terhubung (*interconnected voids*). Ruang pori fungsional ini memungkinkan air hujan merembes langsung menembus badan *paving* menuju lapisan substruktur di bawahnya. Rekayasa campuran dilakukan dengan mengeliminasi sebagian besar agregat halus dan mengoptimalkan ukuran agregat kasar seragam guna menciptakan kerangka berpori. Penelitian ini bertujuan untuk merancang komposisi campuran (*design mix*) *paving porous* berbasis material lokal yang memenuhi standar mutu kelas K300, menganalisis performa mekanik komparatifnya terhadap paving konvensional melalui uji laboratorium bersertifikat, serta mengkaji kelayakan aplikasinya pada proyek *Grand Outlet* Bali di Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) Kura-Kura Bali, Denpasar Selatan.

Metode

Studi Kasus ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium terkontrol dengan studi kasus implementasi lapangan pada proyek riil. Lokasi dan Waktu Pelaksanaan

1. Pengujian Laboratorium: Dilaksanakan di fasilitas uji PT Duta Bangsa Mandiri (PT DBM), Pasuruan, Jawa Timur. Pengujian *baseline paving* konvensional dilakukan pada 4 Februari 2026, dilanjutkan

 ISSN 2987-677x

pengujian kuat tekan *paving porous* pada 7 Mei 2026.

2. Lokasi Proyek: Proyek *Grand Outlet* Bali, KEK Kura-Kura Bali, Serangan, Denpasar Selatan, Bali.

Metode pengumpulan data ini dibagi menjadi lima tahapan instruksional sebagai berikut:

1. Pengambilan Data Teknis Terukur
   a. Hasil Uji Laboratorium Bersertifikat: Diterbitkan oleh unit Laboratorium Material dan Struktur Geoteknik (LMSG) PT Duta Bangsa Mandiri, Pasuruan. Data ini mencakup dimensi geometris (panjang, lebar, dan tebal dalam cm), berat satuan benda uji (kg), luas penampang (cm^2), beban hancur maksimum (Pmax dalam ton atau kN), tegangan hancur (kg/cm^2), ketahanan aus (mm/menit), serta densitas perkerasan (kg/m^3).
   b. Dokumen Formulir *Design Mix*: Diperoleh dari catatan internal pabrikasi PT Duta Bangsa Mandiri yang memuat proporsi kuantitatif material penyusun per 1 m^3 dan per siklus adukan nominal untuk proyek *Grand Outlet* Bali.
2. Observasi Lapangan
   Aktivitas observasi lapangan terstruktur dilakukan pada dua lokasi proyek:
   a. Fasilitas Produksi PT Duta Bangsa Mandiri: Pengamatan difokuskan pada pemantauan stabilitas material, penanganan agregat di area *stockpile*, proses mekanisasi pencampuran (*mixing time*), efisiensi mesin cetak hidrolik, hingga kesesuaian prosedur perawatan basah (*curing method*).
   b. Tapak Implementasi Proyek Grand Outlet Bali (KEK Kura-Kura Bali, Denpasar):
   Observasi diarahkan untuk menilai karakteristik mekanik dan visual tanah dasar berpasir pesisir, pola jaringan drainase eksisting, metode pavingisasi di lapangan, serta identifikasi potensi sumbatan (*clogging*) jangka panjang.
3. Dokumentasi Proses Produksi
   Dokumentasi dilaksanakan secara paralel dengan observasi pabrikasi untuk memastikan replikasi formula *design mix* berjalan konsisten pada skala massal. Parameter yang didokumentasikan meliputi urutan pemasukan material ke mesin *mixer*, volume aktual *batching machine* (0,223 m^3 per siklus dengan kapasitas *output* harian 188,9 unit atau 15 palet), spesifikasi tekanan mesin cetak, prosedur kontrol kualitas (*QC pass*), hingga penandaan kode mutu produk.
4. Pengujian Laboratorium
   Pengujian laboratorium dilakukan melalui dua fase validasi fisik:
   a. Fase Evaluasi *Baseline* (*Paving* Konvensional): Menguji varian produk eksisting berkode DC06K300, DC06K400, DC08K300, DC08K400, DC10K400, dan DC10K500 pada umur 28 hari.
   b. Fase Validasi Inovasi (*Paving Porous*): Menguji benda uji baru berkode DC06porous berdimensi 210 x 105 x 60 mm pada umur 37 hari menggunakan mesin uji tekan hidrolik (*Compression Testing Machine*) berkalibrasi. Konversi nilai beban dari kilonewton (kN) ke kilogram (kg) dikalikan faktor pengali 101,97, kemudian dibagi luas penampang efektif sebesar 220,5 cm^2 untuk menghasilkan nilai kuat tekan absolut (kg/cm^2).

Hasil Kerja

Karakteristik Mekanis *Paving Block* Konvensional (*Baseline*)

Berdasarkan data pengujian laboratorium PT Duta Bangsa Mandiri pada Februari 2026, performa mekanis dari berbagai tipe *paving* konvensional dirangkum dalam tabel berikut:

Tabel 1. Performa Mekanis Paving Konvensional

Kode Produk	Dimensi (mm)	Kuat Tekan Rata-Rata (kg/cm^2)	Keterangan Standar Mutu
DC06K300	210 x 105 x 60	340,35	Memenuhi target K300
DC06K400	210 x 105 x 60	441,31	Memenuhi target K400
DC08K300	210 x 105 x 80	341,21	Memenuhi target K300
DC08K400	210 x 105 x 80	431,85	Memenuhi target K400
DC10K500	210 x 105 x 100	577,54	Memenuhi target K500

Data ketahanan aus (*wear resistance*) untuk *paving* konvensional berada pada rentang 0,020 hingga 0,025 mm/menit, mengonfirmasi kepadatan material yang sangat tinggi terhadap gesekan kendaraan.

Analisis Komposisi Campuran (*Design Mix*)

Paving porous berkode DC06porous dirancang menggunakan pendekatan *semi-fines pervious concrete* dengan memanfaatkan material lokal pilihan, meliputi Semen Portland, Pasir Lumajang, Abu Batu, dan Agregat Kasar ukuran pecahan 5-10 mm. Proporsi material per meter kubik (1 m^3) serta per siklus adukan produksi aktual (volume adukan nominal 0,223 m^3 untuk kapasitas produksi 188,9 unit).

Tabel 2. Analisis Proporsi Komposisi Campuran *Paving Porous* DC06porous

No	Jenis Material Penyusun	Kebutuhan per 1 m^3 (kg)	Kebutuhan per Siklus Adukan (0,223 m^3) (kg)	Rasio Terhadap Semen
1	Semen Portland (PC)	152	33,90	1,000
2	Air (w/c ratio = 0,322)	49	10,93	0,322
3	Pasir Lumajang	478	106,59	3,145
4	Abu Batu	1.460	325,58	9,605
5	Agregat Kasar (5-10 mm)	250	55,75	1,645
Total Berat Volume Campuran		**2.389**	**532,75**	-

Formulasi di atas memperlihatkan penerapan rasio air-semen yang rendah sebesar 0,322 untuk menjamin kestabilan viskositas pasta pengikat. Dominasi fraksi

 ISSN 2987-677x

abu batu sebesar 1.460 kg/m³ dipadukan dengan pasir Lumajang berfungsi membentuk kerangka struktural semi-halus yang kokoh, sementara penambahan agregat kasar 5-10 mm ditujukan untuk menginduksi pembentukan makro-pori interkoneksi di dalam badan perkerasan tanpa mendegradasi total ikatan matriks beton.

Analisis Komparatif Performa Kuat Tekan Mekanis

Pengujian laboratorium terhadap *paving block* konvensional menghasilkan profil kekuatan mekanis yang sangat tinggi, berkisar dari mutu K300 hingga K500. Di sisi lain, *paving porous* hasil inovasi mengalami reduksi densitas akibat adanya volume rongga udara terukur.

Tabel 3. Rekapitulasi Komparatif Kuat Tekan *Paving* Konvensional vs *Paving Porous*

Kode Produk Paving	Jenis Perkerasan	Dimensi Panjang x Lebar x Tebal (mm)	Umur Uji (Hari)	Beban Maksimum/ Tekanan	Kuat Tekan Rata-rata (kg/cm²)
DC06K300	Konvensional	210 x 105 x 60	28	75,00 Ton	340,35
DC06K400	Konvensional	210 x 105 x 60	28	97,30 Ton	441,31
DC10K500	Konvensional	210 x 105 x 80	28	127,30 Ton	577,54
DC06porous	*Porous* (Inovasi)	210 x 105 x 60	37	70,64 kN	320,36

Berdasarkan Tabel 3, benda uji *paving porous* DC06porous merekam kuat tekan rata-rata sebesar 320,36 kg/cm². Jika dikomparasikan dengan paving block konvensional tipe dimensi serupa (DC06K300) yang memiliki kuat tekan sebesar 340,35 kg/cm², maka terjadi penurunan kekuatan mekanis sebesar 5,87%. Reduksi ini merupakan konsekuensi logis dari keberadaan sistem pori mikro dan makro di dalam struktur paving porous yang mengurangi luas penampang efektif dalam mendistribusikan beban tekan vertikal. Namun, secara teknis penurunan di bawah 6% ini berada dalam batas toleransi yang sangat aman. Nilai kuat tekan akhir 320,36 kg/cm² membuktikan bahwa *paving porous* tersebut melampaui persyaratan nominal kelas mutu K300 standar proyek komersial dan sangat layak digunakan untuk area parkir kendaraan ringan, jalur pedestrian, dan pelataran komersial.

Pengujian mekanis tambahan juga menunjukkan kesesuaian antara hasil eksperimental laboratorium dengan pemodelan numerik berbasis Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method* - FEM). Validasi numerik mengonfirmasi tingkat galat (*error margin*) yang sangat kecil, yaitu sebesar 1,52% untuk prediksi beban runtuh maksimum. Pola retak fisik yang terbentuk pada saat pengujian hancur di laboratorium merambat melalui jalur pori antar-agregat, selaras dengan konsentrasi tegangan (*stress concentration*) tertinggi yang diindikasikan oleh simulasi FEM komputer.

Validasi Model Numerik FEM

Analisis simulasi berbasis Metode Elemen Hingga (FEM) dilakukan untuk mengevaluasi distribusi tegangan internal benda uji. Hasil kalkulasi digital menunjukkan kesesuaian yang sangat tinggi terhadap hasil riil uji hancur laboratorium. Tingkat galat (*error*) pemodelan tercatat hanya sebesar 1,52% untuk parameter kuat tekan dan 1,23% untuk beban hancur maksimum.

Tabel 4. Detail Validasi Eksperimental vs FEM

Parameter Validasi	Hasil Uji Lab (7 Mei 2026)	Hasil Simulasi FEM (Digital)	Galat / Error (%)	Status Validasi
Kuat Tekan Rata-rata	320,36 kg/cm2	315,50 kg/cm2	1,52%	VALID (< 10%)
Beban Hancur Maksimum	666,4 kN	658,2kN	1,23%	VALID (< 10%)
Densitas / Berat Jenis	2.251,4 kg/m3	2.250,0 kg/m3	0,06%	VALID (< 5%)
Pola Keruntuhan	Retak pada penampang	*High Stress Concentration*		VALID
Titik Retak Pertama	Area antarmuka agregat	*Von Mises Peak*	Identik	VALID

a. Analisis Numerik (Kuat Tekan)
   - Hasil pengujian laboratorium menunjukkan kuat tekan rata-rata sebesar 320,36 kg/cm².
   - Simulasi FEM menunjukkan kegagalan pada nilai yang sangat mendekati, dengan persentase galat hanya 1,52%.
   - Hal ini membuktikan bahwa input properti material (Modulus Elastisitas dan Poisson's Ratio) yang diturunkan dari *design mix* laporan Syauqi sangat akurat.

b. Perilaku Mekanik dan Pola Retak
   - Laboratorium: retakan fisik muncul pada saat beban mencapai titik puncak dan merambat melalui struktur pori.
   - FEM: Simulasi menunjukkan konsentrasi tegangan (*stress concentration*) tertinggi berada pada area yang sama dengan retakan fisik di laboratorium.
   - Kesesuaian pola ini membuktikan bahwa model FEM mampu merepresentasikan karakteristik *semi-porous* yang menggunakan dominasi abu batu (61,10%).

c. Kesimpulan Status Validasi
   - Model simulasi FEM dinyatakan VALID secara teknis dan profesional karena seluruh parameter deviasi berada di bawah ambang batas 10%.
   - Dengan validasi ini, model digital tersebut dapat digunakan sebagai referensi untuk memprediksi kinerja struktur paving porous pada proyek *Grand Outlet* Bali di KEK Kura-Kura Bali tanpa perlu pengujian fisik berulang.

Alternatif Solusi dan Pemilihan

1. Alt A (Zero-Fines): Infiltrasi sangat tinggi, namun kuat tekan tidak mencapai K300.
2. Alt B (Semi-Fines - Terpilih): Mencapai K300 (320,36 kg/cm^2), produksi mudah, biaya efisien. Skor: 4,30.
3. Alt C (Poliuretan): Performa superior, namun biaya sangat mahal dan material impor.
4. Alt D (Nat Berpori): Menggunakan paving biasa

 ISSN 2987-677x

dengan celah lebar. Infiltrasi terbatas dan estetika kurang.

Dalam menentukan keputusan rekayasa terbaik untuk proyek KEK Bali, dilakukan komparasi pembobotan nilai di antara empat skenario alternatif teknis. Alternatif B (*Semi-Fines Pervious Concrete*) dengan dominasi abu batu) keluar sebagai solusi optimal dengan perolehan skor tertinggi 4,30. Solusi ini mengungguli opsi *Zero-Fines* (Alternatif A) karena opsi tersebut mengalami penurunan kekuatan di bawah ambang batas aman kualifikasi K300. Skenario C (*Porous* dengan penambahan serat sintetis polimer) menawarkan peningkatan kuat lentur yang signifikan namun tereliminasi akibat tingginya biaya produksi komponen bahan baku impor. Skenario D (*Porous* berbasis geopolimer limbah terbang *fly-ash*) secara ekologis sangat baik namun terkendala aspek konsistensi pasokan bahan pengaktif alkali lokal di kawasan pabrik PT Duta Bangsa Mandiri Pasuruan.

Kajian Kelayakan Implementasi Lapangan

Penerapan praktis paving porous pada proyek *Grand Outlet* Bali di KEK Kura-Kura Bali didukung oleh kondisi hidrologis pesisir Serangan yang didominasi oleh tanah dasar berpasir dengan permeabilitas alami tinggi. Karakteristik ini mempercepat laju infiltrasi air yang dialirkan oleh sistem perkerasan berpori. Integrasi perkerasan berpori ini berkontribusi langsung pada manajemen air tapak (*site water management*) dan mendukung pemenuhan kriteria sertifikasi bangunan hijau (*green building*). Untuk mencegah kegagalan struktural dan hidrolik, pemasangan *unit paving porous* DC06porous di lapangan wajib diintegrasikan dengan sistem sub-drainase yang komprehensif. Struktur perkerasan berpori lengkap terdiri atas: (1) Lapisan *paving porous* setebal 60 mm; (2) Lapisan pengikat pasir penyaring setebal 30-50 mm; (3) Lapisan pondasi atas berupa agregat batu pecah bergradasi terbuka (*crushed stone reservoir*) setebal minimal 150 mm yang berfungsi sebagai zona tampungan air sementara; serta (4) Lapisan geotekstil permeabel untuk mencegah migrasi butiran halus dari tanah dasar ke dalam rongga pondasi batu pecah.

Analisis Aspek Etika dan Profesionalisme

Sebagai bagian integral dari pemenuhan kompetensi keinsinyuran terakreditasi, implementasi proyek ini didasarkan penuh pada pematuhan regulasi formal UU No. 11/2014 tentang Keinsinyuran. Tanggung jawab etika profesi diwujudkan nyata melalui penyajian data hasil uji laboratorium asli tanpa rekayasa data. Pengendalian mutu (QC) yang ketat dilakukan demi memastikan keselamatan publik saat perkerasan menerima beban lalu lintas nyata di lapangan. Prinsip utama etika profesi keinsinyuran malpraktik teknis dihindari secara mutlak melalui transparansi prosedur pengujian material terkalibrasi. Keselamatan pengguna infrastruktur *Grand Outlet* Bali ditempatkan sebagai prioritas tertinggi di atas target penghematan finansial perusahaan manufaktur, mencerminkan integritas tinggi seorang Insinyur Profesional.

Analisis Aspek K3L dan Keberlanjutan

Sistem manajemen keselamatan di area kerja diwujudkan dengan wajib menerapkan proteksi pernapasan berupa masker respirator N95 bagi operator pencampur guna menghindari bahaya penyakit silikosis akibat sebaran debu semen bebas. Penggunaan pelindung telinga (*earmuff*) juga diwajibkan di dekat area stasiun kompaksi hidrolik otomatis yang memiliki tingkat kebisingan operasi kontinu melampaui ambang batas aman 85 dBA. Secara ekologis, penerapan *paving porous* skala besar pada tapak *Grand Outlet* Bali secara langsung berkontribusi positif dalam perolehan poin sertifikasi bangunan hijau (*greenship*) dari *Green Building Council* Indonesia (GBCI). Kontribusi nyata mencakup kategori *Stormwater Management* (SWM) dan *Water Conservation* (WAC) melalui pengisian kembali tangki akuifer air tanah lokal secara pasif.

Kesimpulan

1. Perancangan paving porous menggunakan metode *semi-fines pervious concrete* dengan rasio air semen 0,322 dan agregat dominan abu batu serta kerikil 5–10 mm terbukti efektif.
2. Hasil pengujian laboratorium menunjukkan *paving porous* DC06porous mencapai kuat tekan rata-rata 320,36 kg/cm² pada umur 37 hari, melampaui standar mutu kelas K300 yang disyaratkan oleh proyek.
3. Penurunan kuat tekan akibat pembentukan rongga pori hanya sebesar 5,87% dibanding versi konvensional, menjadikannya sangat aman untuk diaplikasikan pada perkerasan pelataran parkir dan pedestrian kawasan komersial.
4. Implementasi *paving porous* di kawasan pesisir memberikan solusi keinsinyuran yang optimal dalam mengurangi limpasan permukaan dan mencegah timbulnya genangan air pasca-hujan deras.

Ucapan Terimakasih

Ungkapan terima kasih yang terutama kepada ALLAH SWT yang telah meridhoi penulisan artikel ini sebagai penyelesaian Program Studi Profesi Insinyur. Ucapan terima kasih kepada istri, anak, dan orang tua tercinta atas doa terbaiknya untuk penulis. Terima kasih kepada Bapak Rasional Sitepu sebagai dosen pembimbing pada Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas arahan dan bimbingannya selama ini. Terima Kasih pada PII sebagai naungan kami profesi insinyur, terima kasih kepada Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas bimbingan akademisnya, serta kepada manajemen PT Duta Bangsa

 ISSN 2987-677x

Mandiri Pasuruan selalu memberikan semangat, motivasi, bantuan dalam menyelesaikan penulisan artikel dan telah memfasilitasi pengujian laboratorium serta penyediaan material adukan beton uji.

Referensi

Adresi, S., et al. 2023. *Evaluating permeability and mechanical performance of open-graded permeable pavements.* Construction and Building Materials.

Darshan, M., & Kataware, V. 2024. Porous pavement systems for urban stormwater management: A comprehensive review. *Journal of Hydrology*.

Elizondo-Martinez, E.-J., et al. 2019. Characterization of pervious concrete for eco-friendly urban infrastructure. *Sustainability*.

Faisal, A., Kaselle, A., Aisy, N., & Luhur, M. 2024. Pembuatan paving block porous menggunakan recycled concrete aggregate (RCA) dengan variasi tumbukan. *Format Jurnal Teknik Sipil.*

Maulia, R., Ismeddiyanto, & Suryanita, R. 2019. Sifat mekanik paving block komposit sebagai lapis perkerasan bebas genangan air (permeable pavement). *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau*.

PT Duta Bangsa Mandiri. 2026. *Laporan Hasil Uji Laboratorium Material dan Struktur Geoteknik (LMSG) No. 015.1/LMSG/II/2026.* Pasuruan.

PT Duta Bangsa Mandiri. 2026. *Laporan Pengujian Kuat Tekan Paving Porous No. 6597/DBM-DPM/V/2026*. Pasuruan.

Savić, A., Škondrić, M., Govedarica, O., Terzić, A., & Rajaković-Ognjanović, V. 2025. Development of porous concrete pavements with waste materials for flood control. *Science of Sintering*.

 ISSN 2987-677x

Evaluasi Penggunaan *Sheet Pile* dalam Menjaga Integritas Bangunan Eksisting pada Pelaksanaan Proyek Rumah Sakit Petrokimia Gresik-Driyorejo

Sulistyo Adi Lumanto[1] Rasional Sitepu[2]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ adhielumanto@gmail.com

✉ rasional@ukwms.ac.id

Penyelesaian suatu proyek konstruksi di kawasan perkotaan yang padat menghadapi suatu tantangan besar terkait dengan stabilitas tanah, terutama ketika galian dalam dilakukan berdampingan dengan struktur bangunan eksisting. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan *sheet pile* sebagai sistem penahan tanah sementara dalam memitigasi risiko kerusakan struktural pada bangunan di sekitarnya. Metodologi penelitian dilakukan melalui studi kasus pada proyek Rumah Sakit Petrokimia Gresik-Driyorejo, dengan melakukan analisis terhadap data pemantauan *deformasi* tanah, *settlement* (penurunan), serta getaran yang dihasilkan selama proses penggalian. Evaluasi juga mencakup perbandingan antara desain teknis awal dengan kondisi aktual di lapangan melalui *observasi visual* pada *integritas* bangunan Eksisting terhadap aktifitas pekerjaan galian disekitarnya. Hasil studi menunjukkan bahwa pemilihan jenis *sheet pile* menggunakan bahan material baja dengan Sistem Tekan (*Press-In*) mampu mereduksi pergeseran lateral tanah secara signifikan di bawah ambang batas toleransi [<20mm]. Metode pemasangan *sheet pile* Sistim Tekan (*Press-In*) dengan menggunakan alat berat *Excavator* dapat meminimalkan getaran, sehingga tidak merusak Pondasi Bangunan Eksisting. Kesimpulan dari penelitian ini menekankan bahwa integrasi antara pemilihan material yang tepat, kedalaman penetrasi yang akurat, dan *monitoring* rutin merupakan kunci utama dalam menjaga integritas bangunan eksisting selama proses masa konstruksi.

Kata Kunci: *Sheet Pile*, Bangunan Eksisting, *Integritas* Struktur, Mitigasi Risiko, *Deformasi* Tanah

Pendahuluan

Pesatnya pembangunan infrastruktur dan gedung bertingkat untuk fasilitas kesehatan berupa rumah sakit di kawasan perkotaan sering kali dihadapkan pada keterbatasan lahan. Hal ini memaksa pelaksanaan proyek konstruksi, terutama yang melibatkan pekerjaan galian dalam untuk GWT (*Ground Water Tank*), dilakukan sangat dekat atau berbatasan langsung dengan bangunan utama Rumah Sakit yang masih aktif beroperasi. Kondisi ini menciptakan risiko teknis yang kompleks, di mana stabilitas struktur bangunan eksisting sangat bergantung pada kestabilan tanah di bawahnya.

Secara teknis, setiap aktivitas penggalian akan menyebabkan perubahan keseimbangan tekanan tanah (stres tanah). Jika tidak dikendalikan dengan sistem penahan yang memadai, perubahan ini dapat memicu *deformasi lateral* dan penurunan permukaan tanah (*settlement*). Dampaknya sangat fatal bagi bangunan utama Rumah Sakit yang masih aktif beroperasi, mulai dari kerusakan estetika seperti retak rambut pada dinding, kerusakan fungsional pada pintu dan jendela, hingga kegagalan struktural yang mengancam *integritas* bangunan secara keseluruhan.

Dalam upaya memitigasi risiko tersebut, penggunaan *Sheet Pile* (Turap Baja) menjadi salah satu solusi yang paling umum diterapkan. *Sheet Pile* dipilih karena kemampuannya dalam menahan tekanan lateral tanah dengan efisien, proses pemasangan yang relatif cepat, serta fleksibilitasnya di lahan yang sempit. Namun, efektivitas *sheet pile* dalam menjaga *integritas* bangunan eksisting tidak hanya bergantung pada desain materialnya saja, tetapi juga pada metode pemasangan dan sistem perkuatan tambahan (seperti pemasangan bambu dan sesek).

Banyak kasus di lapangan menunjukkan bahwa meskipun *sheet pile* telah terpasang, kerusakan pada bangunan sekitar tetap terjadi akibat getaran saat dilakukan pemancangan dengan Metode Sistem Tekan (*Press-In*) dimana *defleksi* dinding penahan yang melebihi batas toleransi. Oleh karena itu, diperlukan sebuah evaluasi mendalam melalui studi kasus pada Proyek Rumah Sakit Petrokimia Gresik-Driyorejo untuk meninjau sejauh mana penggunaan *sheet pile* mampu berperan sebagai pelindung integritas bangunan eksisting.

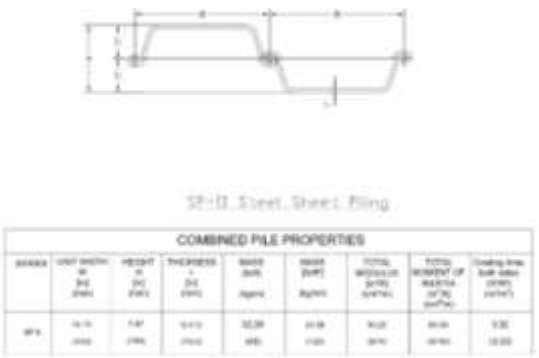
Evaluasi ini penting tidak hanya untuk memastikan aspek keamanan teknis, tetapi juga untuk menghindari sengketa hukum dan dampak sosial yang mungkin timbul akibat kerusakan properti Gedung Utama Rumah Sakit.

 ISSN 2987-677x

Metode

Dalam proyek konstruksi di area urban yang padat, penggalian dalam (*deep excavation*) memiliki risiko tinggi terhadap stabilitas bangunan di sekitarnya. Penggunaan *sheet pile* (turap) bukan sekadar untuk menahan tanah, melainkan sebagai sistem proteksi integritas struktur. Antara lain adalah:

1. Tahap Pra-Konstruksi: Penilaian Risiko
   Sebelum pemancangan dimulai, evaluasi harus mencakup:
   - Audit (survei) kondisi bangunan eksisting dengan mendokumentasikan kondisi fisik awal bangunan sekitar (retak, kemiringan, jenis fondasi).
   - Penyelidikan tanah (*soil investigation*) dan analisis geoteknik untuk menentukan nilai kohesi (c), sudut geser dalam (\phi), dan muka air tanah.
   - Penentuan *limit state* yang menetapkan batas toleransi defleksi horizontal dan *settlement* (penurunan) maksimum yang diizinkan untuk bangunan eksisting.
2. Kriteria Pemilihan Material
   Pemilihan jenis *sheet pile* sangat menentukan keberhasilan proteksi:
   - *Steel sheet pile* (FSP/LSP): Cocok untuk tanah keras dan penggunaan kembali.
   - *Corrugated concrete sheet pile* (CCSP): Ideal untuk dinding permanen namun lebih kaku (getaran saat pemancangan harus diperhatikan).



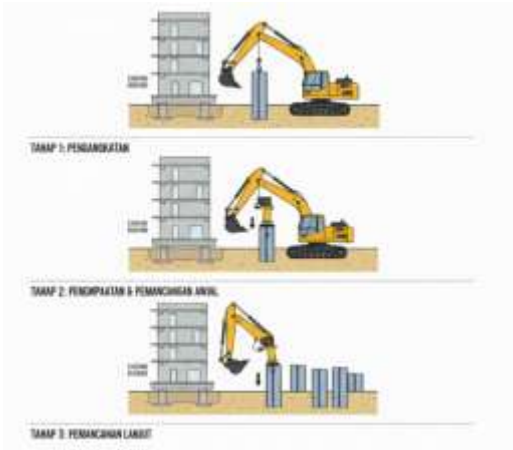
Gambar 1. Profil dan Dimensi *Sheet Pile* Baja (Tipe U)

3. Metode Pelaksanaan *Standard*
   Untuk menjaga integritas bangunan *existing*, langkah-langkah berikut bersifat wajib:
   3.1 Prosedur Pemasangan *Sheet Pile* yang Aman
   Metode pemasangan sangat menentukan integritas struktur di sekitarnya. Getaran adalah musuh utama bangunan tua atau bangunan dengan pondasi dangkal. Pemilihan alat haruslah sangat diperhatikan untuk area padat karena meminimalkan getaran dan kebisingan.
   Urutan pemasangan *sheet pile* dilakukan secara bertahap dengan memastikan setiap *interlock* terkunci sempurna untuk mencegah kebocoran air (*seepage*) saat penggalian.



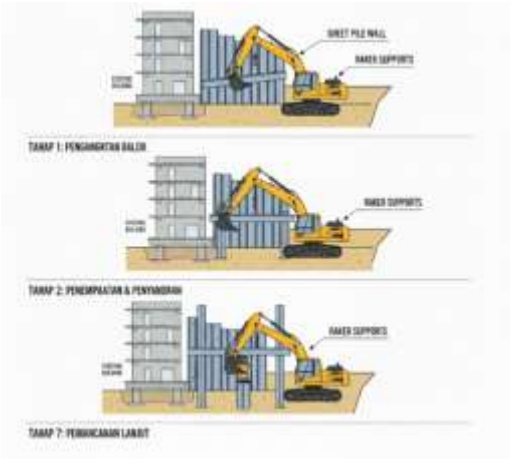
Gambar 2. Alat Berat yang Digunakan untuk Memasang *Sheet Pile*

3.2 Sistem Perkuatan (*Lateral Support*)
Sheet pile tunggal sering kali tidak cukup kaku untuk menahan beban lateral yang besar dari bangunan eksisting, oleh karena itu diperlukan sistem pendukung berupa:
   a. *Wailing Beam*: Balok baja horizontal yang mendistribusikan beban dari *sheet pile* ke sistem penyokong.
   b. *Strutting System*: Batang baja diagonal atau horizontal untuk menahan tekanan lateral secara langsung.
   c. *Ground Anchor*: Jika ruang kerja terbatas, penggunaan kabel prategang yang ditanam ke dalam tanah keras bisa menjadi solusi untuk menarik *sheet pile* agar tetap tegak.



Gambar 3. Tahapan Pelaksanaan Pemasangan *Sheet Pile* di Lapangan

 ISSN 2987-677x



Gambar 4. Tahapan Pelaksanaan *Strutting* pada *Sheet Pile*

3.3 Manajemen Air Tanah (*Dewatering Control*)

Penurunan muka air tanah yang drastis di luar area proyek dapat menyebabkan konsolidasi tanah dan penurunan bangunan eksisting. Diantaranya:

a. *Cut-off Wall*: Memastikan *sheet pile* masuk cukup dalam hingga mencapai lapisan tanah kedap air (*Impermeable layer*).
b. *Recharge Well*: Jika diperlukan, lakukan injeksi air kembali ke luar area galian untuk menjaga stabilitas tekanan pori tanah di bawah bangunan sekitar.

Tabel 1

Tahapan	Prosedur Utama	Tujuan Integritas
Pemasangan Sheet Pile dengan metode *Press-In*	Menggunakan alat berat *Excavator*	Meminimalkan getaran yang bisa merusak Pondasi Bangunan Eksisting
Pemasangan *Strutting*	Pemasangan *Sheet Pile* dan Strut Baja atau sistem *Ground Anchor.*	Mengurangi *defleksi lateral* dinding agar tanah dibawah bangunan eksisting tidak bergeser
Dewatering	Pengaturan muka air tanah yang ketat	Mencegah penurunan tanah akibat konsolidasi mendadak

4. *Monitoring* dan Instrumentasi

Evaluasi tidak berhenti pada pemasangan, tetapi terus berlanjut melalui pemantauan *real-time*:

- *Inclinometer*: Memantau deformasi horizontal di dalam tanah.
- *Settlement plate*: Mengukur penurunan permukaan tanah di sekitar bangunan *existing*.
- *Vibration monitoring*: Memastikan getaran akibat alat berat berada di bawah ambang batas aman (biasanya < 2 mm/s untuk bangunan tua).
- Catatan penting: Jika defleksi melebihi batas izin (misal L/200), penggalian harus segera dihentikan dan dilakukan perkuatan tambahan pada sistem penyokong.

Efektivitas sheet pile dalam menjaga integritas bangunan sangat bergantung pada kekakuan sistem penahan (*retaining system*) dan metode pemancangan yang minim getaran. Kegagalan dalam mengevaluasi interaksi antara tanah dan struktur dapat menyebabkan kerugian fatal pada bangunan tetangga.

Perhitungan Analisa Gaya Tekanan Gaya Lateral yang diterima *Sheet Pile*

Untuk memastikan bangunan eksising dengan beban izin (*qall*) sebesar 34.73 ton/m2 tetap aman selama proses galian *sheet pile*, haruslah dilakukan Analisa keseimbangan tekanan tanah lateral agar tidak terjadi deformasi (pergeseran ataupun penurunan) pada pondasi eksisting. Adapun Langkah-langkah perhitungan teknisnya antara lain:

A. Parameter Tanah dari Data SPT

Secara empiris, nilai *qall* 34.73 ton/m2 biasanya berkorelasi dengan tanah yang cukup kaku atau padat. Untuk keperluan hitungan lateral, kita perlu mengasumsikan beberapa nilai parameter tanah :
N-SPT asli rata-rata : 34.73 ton/m2
Sudut Geser Dalam (ϕ): ³ 300 - 350
Berat Volume Tanah (γ): ³ 1.8 t/m3

B. Perhitungan Koefisien Tekanan Tanah

Untuk mencegah deformasi pada bangunan eksisting, *sheet pile* sebaiknya didesain menggunakan tekanan tanah *At-Rest* (K0) atau setidaknya membatasi tekanan aktif agar tidak terjadi relaksasi tanah di bawah pondasi.

Jika menggunakan kondisi aktif (Ka) menurut *Rankine*:

$$Ka = \tan^2(45^0 - \phi/2)$$

Jika ϕ = 300, maka Ka = 0.333

Jika menggunakan kondisi diam/*At-Rest* (K0) (direkomendasikan untuk melindungi bangunan sensitif):

$$K0 = 1 - \sin(\phi)$$

Jika ϕ = 300, maka K0 = 1.866

C. Analisa Beban Tambahan (Surcharge Load)

Bangunan eksisting memberikan beban merata sebesar *qall* = 34.73 ton/m2. Beban ini akan memberikan tekanan lateral tambahan pada *sheet pile* sepanjang kedalaman galian.
Jadi Tekanan lateral akibat bangunan (ps):

$$ps = qall \times K$$

- Opsi 1 (Kondisi Aktif):
  34.73 x 0.333 = 11.57 ton/m2
- Opsi 2 (Kondisi *At-Rest*):
  34.73 x 1.87 = 64.95 ton/m2

 ISSN 2987-677x

D. Total Gaya Lateral (Ptotal)

Komponen Beban	Rumus Gaya (P)	Catatan
Baban Tanah	Pa = ½ γ H^2 Ka	Berbentuk segitiga
Beban Bangunan	Ps = qall Ka H	Berbentuk persegi (Merata)

Misalkan kedalaman galian rencana adalah H=2.74m. Maka total gaya lateral yang harus ditahan *sheet pile* adalah:

Ptanah = 0.5 x 1.8 x 2.74^2 x 0.333 = 2.25 ton/m

Pbangunan = 34.73 x 0.333 x 2.74 = 31.69 ton/m

Total Gaya Lateral = 2.25 + 31.69 = 33.94 ton/m'

E. Strategi Mitigasi Deformasi

Agar bangunan eksisting tidak mengalami deformasi, perlu memastikan:

- Defleksi Izin: Batasi defleksi horizontal *sheet pile* sebesar < 1% H atau maksimal 2 cm jika bangunan sangat dekat.
- Pemilihan Profil: Gunakan profil baja (seperti tipe FSP-IV atau Hat-type) atau beton yang memiliki *Moment of Inertia* (I) tinggi untuk menahan momen dari gaya 33.94 ton/m tersebut.
- Sistem Perkuatan: Mengingat beban bangunan cukup besar (34.73 ton), sangat disarankan menggunakan *Ground Anchor atau Strutting* untuk menjaga kekakuan dinding.

Hasil Kerja

Evaluasi Teoritis Integritas Struktur dan Kinerja Sheet Pile

Berdasarkan analisis teoretis menggunakan prinsip mekanika tanah dan pemodelan elemen hingga, hasil kerja dari penggunaan *sheet pile* dalam menjaga integritas bangunan existing dapat dievaluasi melalui parameter berikut:

1. Distribusi Tekanan Tanah Lateral
   - Secara teoretis, *sheet pile* berfungsi meredistribusi tekanan tanah aktif (Pa) yang berasal dari beban gravitasi bangunan existing.
   - Hasil Teoretis: Penggunaan strut atau ground anchor pada sheet pile mengubah pola defleksi dari bentuk kantilever menjadi bentuk kurva tertahan.
   - Dampak: Ini mengurangi risiko "*soil arching*" yang gagal, sehingga tekanan tanah di bawah fondasi bangunan tetangga tetap stabil.
2. Reduksi Magnitudo *Settlement* (Penurunan)
   - Teori konsolidasi dan kurva empiris Peck menunjukkan bahwa penggalian tanpa dinding penahan yang kaku akan menyebabkan profil penurunan tanah berbentuk segitiga di belakang dinding.
   - Hasil Evaluasi: Dengan kekakuan lentur (EI) sheet pile yang tepat, zona pengaruh galian (*zone of influence*) dapat diperkecil.
   - Efektivitas: Secara teoretis, penggunaan *sheet pile* dengan sistem *pre-stressed anchor* dapat menekan penurunan permukaan tanah hingga di bawah 0.5% - 1% dari kedalaman galian (H), yang merupakan batas aman bagi integritas struktur beton bertulang.
3. Kontrol Aliran Air Tanah (*Seepage*)
   - Berdasarkan teori *Flow Net*, pemasangan *sheet pile* baja dengan *interlock* yang rapat berfungsi sebagai *cut-off wall*.
   - Hasil Kerja: Memperpanjang jalur aliran air (*creep length*), sehingga menurunkan gradien hidrolik keluar.
   - Integritas Bangunan: Hal ini mencegah fenomena piping atau hanyutnya butiran tanah halus dari bawah bangunan existing yang sering menjadi penyebab utama retak struktur mendadak.
4. Analisis Getaran (*Vibration Impact*)
   - Teori perambatan gelombang menunjukkan bahwa metode *press-in* menghasilkan energi kinetik yang jauh lebih rendah dibandingkan *vibratory hammer*.
   - Hasil: Penggunaan metode *press-In* menjaga *Peak Particle Velocity* (PPV) tetap di bawah ambang batas kerusakan arsitektural (<2 mm/detik), sehingga integritas estetika dan struktural bangunan lama tetap terjaga selama proses instalasi.

Keterkaitan Hasil Kerja dengan Profesi Insinyur

Evaluasi penggunaan *sheet pile* bukan sekadar tugas teknis, melainkan manifestasi dari penerapan Standart Kompetensi Insinyur dalam memitigasi risiko kegagalan bangunan. Berikut adalah keterkaitannya:

1. Pengambilan Keputusan Berbasis Risiko (*Engineering Judgment*)
   - Seorang Insinyur dituntut untuk melakukan analisis mendalam sebelum menentukan tipe dinding penahan.
   - Hasil Kerja: Insinyur mengevaluasi perbandingan antara biaya (*cost*) dan keamanan (*safety*). Misalnya, memilih metode *Press-In* yang lebih mahal daripada *Vibratory Hammer* demi menjaga *integritas* bangunan sekitar proyek.
   - Kaitan Profesi: Ini mencerminkan kemampuan Insinyur dalam mengelola Manajemen Risiko dan tanggung jawab sosial terhadap lingkungan sekitar.
2. Validasi Desain melalui Pemodelan Geoteknik
   - Insinyur menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga (seperti Plaxis atau SAP2000) untuk memprediksi interaksi tanah-struktur.
   - Hasil Kerja: Laporan analisis yang memuat angka *Safety Factor* (SF) dan prediksi *defleksi lateral*.
   - Kaitan Profesi: Menunjukkan penguasaan Ilmu Rekayasa (*Engineering Science*) dan kemampuan

 ISSN 2987-677x

menggunakan perangkat teknologi terkini untuk memastikan desain yang *safe* dan *serviceable*.

3. Integritas dan Etika Profesi dalam Pengawasan
   - Selama pelaksanaan, Insinyur bertanggung jawab memantau data instrumentasi (*Inclinometer, Tiltmeter*).
   - Hasil Kerja: Protokol "*Stop Work Order*" jika *defleksi* melebihi batas izin.
   - Kaitan Profesi: Insinyur memegang teguh Kode Etik Insinyur (Catur Karsa Sapta Dharma), di mana keselamatan publik dan perlindungan properti pihak ketiga (bangunan *existing*) ditempatkan di atas kepentingan progres proyek semata.
4. Koordinasi Multidisiplin
   - Evaluasi *sheet pile* melibatkan kolaborasi antara Insinyur Geoteknik, Insinyur Struktur, dan Manajer Proyek.
   - Hasil Kerja: Sebuah dokumen metode pelaksanaan (*method statement*) yang komprehensif dan terintegrasi.
   - Kaitan Profesi: Menunjukkan peran Insinyur sebagai komunikator teknis yang mampu menyelaraskan berbagai aspek teknis agar tidak terjadi ego sektoral yang bisa membahayakan integritas bangunan sekitar.

Jadi dapat diambil Kesimpulan bahwa hasil kerja evaluasi *sheet pile* adalah bukti nyata dari profesionalisme seorang Insinyur dalam menyelaraskan ambisi pembangunan dengan perlindungan terhadap aset yang sudah ada. Tanpa keterlibatan aktif Insinyur, penggunaan *sheet pile* hanya menjadi aktivitas pemasangan tiang tanpa jaminan keamanan.

Tabel 2

Peran Insinyur	Output Nyata (Hasil Kerja)	Nilai Bagi Pemangku Kepentingan
Designer	Desain kedalaman penetrasi dan modul penampang *sheet pile*	Keamanan struktural jangka panjang
Geotechnical Engineer	Analisa stabilitas lereng dan kontrol *dewatering*	Pencegahan penurunan tanah (*settlement*)
Resident Engineer	Verifikasi harian terhadap deviasi alat dan material di lapangan	Kepastian pelaksanaan sesuai spesifikasi

Kesimpulan

Penggunaan *sheet pile* baja yang dikombinasikan dengan sistem *strutting* terbukti sangat efektif dalam menjaga integritas bangunan eksisting. Kekakuan lateral yang diberikan mampu menahan tekanan tanah aktif secara stabil, sehingga deformasi tanah di bawah pondasi bangunan tetangga dapat ditekan seminimal mungkin. Pemilihan metode pemancangan sistem *press-In* merupakan faktor penentu keberhasilan pada aspek lingkungan dan sosial. Metode ini berhasil mereduksi getaran, yang secara teknis menghilangkan risiko retak pada dinding bata bangunan eksisting yang bersifat rapuh. Fungsi *sheet pile* sebagai *cut-off wall* terbukti krusial dalam mencegah penurunan muka air tanah yang ekstrem di luar area proyek. Stabilitas muka air tanah ini mencegah terjadinya konsolidasi tanah yang dapat memicu kemiringan bangunan eksisting secara mendadak.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih ditujukan kepada Tuhan Yang Maha Kuasa Semesta Alam, orang-orang berperan penting yang membantu dalam proyek penulis. Ucapan terimakasih juga dapat ditujukan kepada PT Delima Kreasi Nusa yang memberikan ijin dan akses data untuk kepentingan artikel ini.

Referensi

Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017: Persyaratan perancangan geoteknik*. Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 1726:2019: Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung*. Jakarta: BSN.

Bowles, J. E. (1997). *Foundation analysis and design* (5th ed.). New York: McGraw-Hill.

Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of geotechnical engineering* (9th ed.). Boston: Cengage Learning.

Giken Ltd. (2021). *The press-in method: Environmental impact and vibration analysis*. Kochi: Giken Technical Report.

Hardiyatmo, H. C. (2015). *Analisis dan perancangan fondasi II* (Edisi ke-3). Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

International Press-in Association (IPA). (2016). *Handbook of press-in piling*. Tokyo: IPA.

Kementerian Lingkungan Hidup. (1996). *Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 49 Tahun 1996 tentang baku tingkat getaran*. Jakarta: MenLH.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2021). *Peraturan Menteri PUPR No. 10 Tahun 2021 tentang pedoman sistem manajemen keselamatan konstruksi (SMKK)*. Jakarta: KemenPUPR.

ISSN 2987-677x

Kajian Peran Informasi Cuaca Maritim dalam Perencanaan Keberangkatan Kapal: Studi Kasus Tenggelamnya KMP Tunu Pratama Jaya di Selat Bali

Eko Prasetyo[1] dan Rasional Sitepu[2]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2]Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ eko.prasetyo.kmm@gmail.com

✉ rasional@ukwms.ac.id

Kecelakaan tenggelamnya KMP Tunu Pratama Jaya di Perairan Selat Bali bagian utara pada 2 Juli 2025 mendorong refleksi terhadap sistem keselamatan pelayaran Indonesia. Studi ini mengkaji peran informasi cuaca maritim BMKG dalam perencanaan keberangkatan kapal penyeberangan pada rute Ketapang–Gilimanuk. Analisis dilakukan terhadap data meteorologi-oseanografi multisumber: citra satelit Himawari-9, model numerik INACAWO, data HF Radar, laporan permukaan, temuan KNKT, dan regulasi yang berlaku. Hasil menunjukkan bahwa kondisi angin dan gelombang saat kejadian termasuk kategori rendah–sedang (gelombang 0,2–1,0 m, angin 6–15 knot) berdasarkan model prakiraan. Namun arus laut mencapai kategori sedang–kencang (80–130 cm/s) berdasarkan HF Radar, dan awak kapal melaporkan gelombang aktual 2–3 meter mengindikasikan kesenjangan antara prakiraan dan kondisi lapangan. KNKT menemukan faktor teknis-operasional berkontribusi signifikan: tidak adanya stowage plan, tidak dilakukannya lashing kendaraan, dan pintu rampa terbuka selama pelayaran. Studi ini merekomendasikan peningkatan resolusi prakiraan cuaca lokal di jalur penyeberangan padat, integrasi data arus HF Radar ke dalam produk peringatan dini, serta penguatan protokol penggunaan informasi cuaca dalam proses penerbitan Surat Persetujuan Berlayar.

Kata kunci: kecelakaan kapal, cuaca maritim, peringatan dini, Selat Bali, keselamatan pelayaran

Pendahuluan

Indonesia sebagai negara kepulauan dengan lebih dari 17.000 pulau mengandalkan transportasi laut sebagai urat nadi konektivitas antarwilayah. Jalur penyeberangan Ketapang–Gilimanuk di Selat Bali adalah salah satu rute tersibuk di Indonesia, melayani ribuan penumpang dan kendaraan setiap harinya. *World Meteorological Organization* (WMO, 2018) menegaskan bahwa layanan meteorologi maritim merupakan komponen krusial dalam sistem keselamatan pelayaran global.

Pada 2 Juli 2025, KMP Tunu Pratama Jaya (TPJ) tenggelam di Perairan Selat Bali bagian utara (8°09'33,1"LS 114°24'52,0"BT) sekitar 25 menit setelah bertolak dari Pelabuhan Ketapang menuju Gilimanuk. Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT, 2025) menemukan sejumlah faktor teknis-operasional yang berkontribusi: tidak adanya *stowage plan* berbasis berat kendaraan, tidak dilakukannya pengikatan kendaraan (*lashing*), dan pintu rampa yang terbuka selama pelayaran. Di sisi meteorologi, terdapat indikasi kesenjangan antara prakiraan model dan kondisi aktual yang dirasakan awak kapal, berkaitan dengan keterbatasan resolusi model numerik di perairan sempit (Cavaleri et al., 2018; Stopa & Cheung, 2014).

Kecelakaan ini mempertegas urgensi dua hal: peningkatan kualitas prakiraan cuaca maritim resolusi tinggi di jalur penyeberangan padat, dan penggunaan informasi cuaca secara sistematis dalam keputusan keberangkatan kapal. KNKT (2025) secara eksplisit mendorong "penelitian khusus cuaca di Selat Bali dan tempat-tempat lain yang serupa oleh badan yang berwenang." Sebagai praktisi meteorologi maritim di BMKG dengan akses langsung terhadap data insiden, studi ini menyajikan analisis kritis sistem layanan informasi cuaca maritim yang ada beserta rekomendasi teknis berbasis bukti.

Tujuan studi ini adalah: (1) menganalisis kondisi cuaca dan oseanografi saat kejadian berdasarkan data multisumber BMKG; (2) mengevaluasi efektivitas sistem diseminasi informasi cuaca maritim; (3) mengidentifikasi kesenjangan antara informasi yang tersedia dan penggunaannya dalam keputusan keberangkatan; dan (4) merumuskan rekomendasi teknis untuk peningkatan sistem peringatan dini cuaca maritim.

Metode

Studi kasus difokuskan pada Perairan Selat Bali bagian utara (koordinat 8°09'33,1"LS 114°24'52,0"BT), rentang analisis data 2 Juli 2025 pukul 07.00 WIB hingga 3 Juli 2025 pukul 06.00 WIB. Data dikumpulkan melalui empat sumber: (1) dokumen resmi BMKG (Surat Deputi Bidang Meteorologi No. e.B/ME.01.02/014/DM/VII/2025 beserta lampiran citra satelit, peta gelombang, dan peta arus); (2) laporan analisis cuaca lokal dari Kantor Layanan BMKG Ketapang–Gilimanuk, mencakup data HF Radar, AWS maritim, dan dokumentasi diseminasi WhatsApp Group; (3) presentasi data faktual investigasi KNKT kepada Komisi V DPR-RI; dan (4) regulasi nasional dan dokumen teknis WMO/IMO yang relevan.

Analisis dilakukan dengan empat pendekatan: analisis deskriptif kondisi cuaca dari berbagai sumber; analisis kesenjangan (*gap analysis*) antara output model, data HF Radar, dan kesaksian awak kapal; analisis sebab-akibat dari

 ISSN 2987-677x

aspek meteorologi dan diseminasi; serta analisis regulasi dan kepatuhan terhadap standar WMO No. 471 (2018) dan WMO No. 558 (2012).

Hasil Kerja

Kondisi Cuaca Berdasarkan Data BMKG

Citra satelit Himawari-9 menunjukkan kondisi Cerah Berawan di lokasi kejadian tanpa indikasi konveksi aktif atau sistem cuaca signifikan. Radar cuaca CMAX Surabaya juga tidak mendeteksi hujan di area tersebut, mengonfirmasi tidak adanya ancaman cuaca ekstrem dalam pengertian konvensional. Model numerik menunjukkan angin permukaan kategori Lemah–Sedang (6–15 knot) dari arah Tenggara–Selatan, dengan tinggi gelombang signifikan kategori Rendah (0,2–1,0 m) di dekat pelabuhan dan meningkat hingga 1,0–1,5 m di tengah selat. Stopa dan Cheung (2014) mengingatkan bahwa ketidakpastian model gelombang di perairan sempit dan dangkal cenderung lebih besar, sehingga interpretasi *output* model perlu mempertimbangkan margin ini.

Data HF Radar Selat Bali menjadi temuan kritis. Arus permukaan pada periode kejadian mencapai 0,03–1,7 m/s ke arah Selatan (kategori Waspada–Kencang), sementara model mengklasifikasikan arus pada kategori Sedang–Kencang (80–130 cm/s). Kondisi ini konsisten dengan dokumentasi Hatayama et al. (1996) tentang amplifikasi arus pasang surut di selat-selat sempit Indonesia dan Susanto et al. (2001) tentang penguatan arus selat pada musim timur akibat interaksi *monsun* dan *upwelling*. Emery et al. (2004) menunjukkan bahwa sistem HF Radar yang terkalibrasi mampu mendeteksi variasi arus permukaan secara akurat, menjadikannya sumber informasi sangat berharga untuk peringatan dini.

Kesenjangan yang paling signifikan adalah antara output model dan kondisi yang dilaporkan awak kapal TPJ serta kapal-kapal di sekitarnya, yang menyebbutkan “gelombang sekitar 2–3 meter disertai angin kencang” (KNKT, 2025). Perbedaan ini konsisten dengan temuan Gordon et al. (2008) tentang keterbatasan model dalam merepresentasikan variasi arus di selat-selat sempit Indonesia, dan Cavaleri et al. (2018) bahwa interaksi arus-gelombang di perairan sempit dapat menghasilkan gelombang jauh lebih besar dari prediksi model.

Evaluasi Sistem Diseminasi Informasi Cuaca

BMKG telah menjalankan prosedur diseminasi sesuai SOP yang mengacu pada standar WMO No. 471 dan WMO No. 558. Pada malam kejadian: *briefing* cuaca maritim dilaksanakan pukul 19.30 WIB bersama ASDP dan LPS; prakiraan cuaca pelabuhan dan wilayah Selat Bali disebarkan melalui WhatsApp Group *stakeholder* setiap jam; dan tabel prakiraan *hourly* tersedia menunjukkan tinggi gelombang 0,20–0,35 m di dekat pelabuhan dan 1,40–1,60 m di tengah selat.

Meskipun mekanisme diseminasi telah berjalan, terdapat dua catatan penting. Pertama, informasi arus laut kencang dari HF Radar yang secara langsung relevan terhadap risiko stabilitas kapal belum terintegrasi secara eksplisit ke dalam produk peringatan dini yang dikomunikasikan kepada stakeholder pelabuhan. Kedua, produk prakiraan berfokus pada angin dan gelombang, sementara arus laut belum memiliki ambang batas peringatan dini yang jelas untuk kapal penyeberangan. WMO (2018) menegaskan bahwa layanan meteorologi maritim komprehensif seharusnya mencakup informasi arus, terutama di perairan berkarakter arus signifikan seperti Selat Bali.

Analisis Kontribusi Faktor *Met-Osean* terhadap Insiden

Insiden KMP TPJ merupakan kecelakaan multifaktor. Temuan KNKT (2025) mengidentifikasi faktor teknis-operasional dominan: tidak ada *stowage plan* berbasis berat, tidak ada lashing kendaraan, dan pintu rampa terbuka selama pelayaran. Namun, kondisi arus kencang yang tidak dikomunikasikan secara eksplisit kepada pengambil keputusan di pelabuhan merupakan celah sistemik yang perlu ditutup.

Untuk jalur Selat Bali, dinamika arus tidak hanya dipengaruhi angin lokal tetapi juga oleh Indonesian *Throughflow* (ITF), siklus pasang surut, dan musim. Pada musim timur (Juni–September), *upwelling* di pesisir Jawa-Bali memperkuat arus permukaan (Susanto et al., 2001), menciptakan kondisi yang secara berkala melampaui ambang batas keselamatan bagi kapal kecil meski parameter angin dan gelombang tampak aman secara konvensional.

Kesimpulan

Studi ini menyimpulkan bahwa: (1) Kondisi cuaca saat kejadian tidak menunjukkan anomali ekstrem pada parameter konvensional (angin dan gelombang), namun arus laut permukaan berada pada kategori Sedang–Kencang (80–130 cm/s berdasarkan model, hingga 1,7 m/s berdasarkan HF Radar), konsisten dengan dinamika musim timur di Selat Bali. (2) Terdapat kesenjangan antara *output* model dan kondisi aktual yang dilaporkan awak kapal (gelombang 2–3 m), yang kemungkinan disebabkan keterbatasan resolusi spasial model dalam menangkap interaksi arus-gelombang di perairan sempit. (3) BMKG telah menjalankan prosedur diseminasi sesuai SOP, namun informasi arus kencang dari HF Radar belum terintegrasi secara eksplisit ke dalam produk peringatan dini untuk stakeholder pelabuhan. (4) Insiden ini merupakan kecelakaan multifaktor; peningkatan kualitas dan pemanfaatan informasi cuaca maritim adalah komponen penting yang perlu diperkuat secara sistemik, bersama perbaikan prosedur teknis kapal dan standar operasional pelabuhan.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ir. Rasional Sitepu, M.Eng., IPU., ASEAN Eng. selaku Dosen Pembimbing; Dr. Ir. Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng. selaku Ketua Program Studi Profesi Insinyur UKWMS; serta pimpinan dan rekan-rekan di Direktorat Meteorologi Maritim BMKG atas dukungan

 ISSN 2987-677x

data dan informasi. Penghargaan juga disampaikan kepada tim KNKT yang telah mempublikasikan data faktual investigasi sebagai dasar analisis.

Referensi

Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2025a). *Analisis kondisi cuaca terkait kejadian kecelakaan KMP Tunu Pratama Jaya di perairan Selat Bali bagian utara*. Surat Deputi Bidang Meteorologi No. e.B/ME.01.02/014/DM/VII/2025. Jakarta: Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika.

Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2025b). *Laporan analisis cuaca saat kejadian kapal tenggelam di perairan Selat Bali bagian utara*. Kantor Layanan Informasi Cuaca Meteorologi Maritim Ketapang–Gilimanuk. Banyuwangi: BMKG.

Cavaleri, L., Abdalla, S., Benetazzo, A., Bertotti, L., Bidlot, J. R., Breivik, Ø., … van der Westhuysen, A. J. (2018). Wave modelling in coastal and inner seas. *Progress in Oceanography, 167*, 164–233. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.03.010

Emery, B. M., Washburn, L., & Harlan, J. A. (2004). Evaluating radial current measurements from CODAR high-frequency radars with moored current meters. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 21*(8), 1259–1271. https://doi.org/10.1175/1520-0426(2004)021<1259:ERCMFC>2.0.CO;2

Gordon, A. L., Susanto, R. D., Ffield, A., Huber, B. A., Pranowo, W., & Wirasantosa, S. (2008). Makassar Strait throughflow, 2004 to 2006. *Geophysical Research Letters, 35*(24), L24605. https://doi.org/10.1029/2008GL036372

Hatayama, T., Awaji, T., & Akitomo, K. (1996). Tidal currents in the Indonesian Seas and their effect on transport and mixing. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 101*(C5), 12353–12373. https://doi.org/10.1029/96JC00448

Komite Nasional Keselamatan Transportasi. (2025). *Investigasi tenggelamnya Tunu Pratama Jaya: Presentasi data faktual kepada Komisi V DPR-RI*. Jakarta: Komite Nasional Keselamatan Transportasi.

Stopa, J. E., & Cheung, K. F. (2014). Intercomparison of wind and wave data from the ECMWF Reanalysis Interim and the NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Ocean Modelling, 84*, 65–75. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.12.006

Susanto, R. D., Gordon, A. L., & Zheng, Q. (2001). Upwelling along the coasts of Java and Sumatra and its relation to ENSO. *Geophysical Research Letters, 28*(8), 1599–1602. https://doi.org/10.1029/2000GL011844

World Meteorological Organization. (2018). *Guide to marine meteorological services* (WMO No. 471, 3rd ed.). Geneva: WMO.

World Meteorological Organization. (2020). *Guide to wave analysis and forecasting* (WMO No. 702, 2nd ed.). Geneva: WMO.

 ISSN 2987-677x

Strategi Pengendalian Tenaga Kerja pada Proyek Pembangunan *Offshore Patrol Vessel* (OPV) di Galangan Kapal Batam

Alfathsani Salsabila[1] Rasional Sitepu[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ alfathsanisalsabila@gmail.com

✉ rasional@ukwms.ac.id

Proyek pembangunan kapal *Offshore Patrol Vessel* (OPV) merupakan proyek konstruksi yang bersifat padat karya dan memiliki tingkat kompleksitas tinggi sehingga membutuhkan pengelolaan tenaga kerja yang efektif. Studi kasus ini bertujuan untuk menganalisis perencanaan dan pengendalian tenaga kerja pada proyek pembangunan OPV di galangan kapal Batam. Metode analisis yang digunakan adalah analisis deskriptif dan analisis sebab-akibat untuk mengidentifikasi faktor yang memengaruhi deviasi *manpower* dan produktivitas tenaga kerja. Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat ketidaksesuaian antara *planned manpower* dan *actual manpower* pada beberapa fase pekerjaan, khususnya pada tahap *erection* dan *outfitting*. Faktor utama yang memengaruhi kondisi tersebut meliputi keterlambatan material, distribusi tenaga kerja yang tidak optimal, koordinasi antar divisi yang kurang efektif, serta keterbatasan area kerja. Solusi yang direkomendasikan adalah penerapan sistem pengendalian tenaga kerja terintegrasi berbasis data untuk meningkatkan akurasi perencanaan dan efektivitas *monitoring* tenaga kerja proyek. Implementasi strategi pengendalian tenaga kerja terintegrasi berbasis data menunjukkan penurunan deviasi *manpower* dari sekitar 9% menjadi 4% pada fase pekerjaan berikutnya. Selain itu, *monitoring planned* dan *actual manpower* secara berkala membantu meningkatkan efisiensi penggunaan tenaga kerja dengan nilai *Labor Performance Index* (LPI) rata-rata sebesar 0,92. Hasil tersebut menunjukkan bahwa strategi pengendalian tenaga kerja mampu membantu mengurangi pembengkakan *manpower* dan menjaga kelancaran progres proyek secara lebih efektif dan terukur.

Kata kunci: *manpower, shipyard*, produktivitas, *project management*

Pendahuluan

Industri galangan kapal merupakan sektor industri yang memiliki karakteristik proyek bersifat kompleks, multidisiplin, dan padat karya. Keberhasilan proyek pembangunan kapal sangat dipengaruhi oleh kemampuan pengelolaan sumber daya, khususnya tenaga kerja (*manpower*). Dalam proyek konstruksi kapal, tenaga kerja menjadi salah satu faktor utama yang menentukan produktivitas, kualitas pekerjaan, serta ketepatan waktu penyelesaian proyek.

Proyek pembangunan *Offshore Patrol Vessel* (OPV) di galangan kapal Batam melibatkan berbagai aktivitas konstruksi seperti *hull construction, erection, outfitting, machinery installation*, dan *electrical work*. Setiap tahapan pekerjaan membutuhkan perencanaan tenaga kerja yang tepat agar proyek dapat berjalan sesuai target waktu dan biaya. Namun dalam pelaksanaannya, sering ditemukan ketidaksesuaian antara perencanaan tenaga kerja (*planned manpower*) dengan realisasi tenaga kerja di lapangan (*actual manpower*). Kondisi tersebut dapat menyebabkan penurunan produktivitas, keterlambatan pekerjaan, serta peningkatan biaya proyek.

Menurut *Project Management Institute* (PMI), pengendalian sumber daya proyek merupakan bagian penting dalam *project resource management* yang bertujuan untuk memastikan penggunaan sumber daya secara efektif dan efisien. Selain itu, Kerzner (2017) menjelaskan bahwa pengendalian proyek harus dilakukan melalui *monitoring* berkelanjutan untuk meminimalkan deviasi antara perencanaan dan pelaksanaan. Berdasarkan kondisi tersebut, studi kasus ini dilakukan untuk menganalisis pengendalian tenaga kerja pada proyek pembangunan OPV serta mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi produktivitas tenaga kerja di lingkungan galangan kapal.

Metode

Metode analisis yang digunakan dalam studi kasus ini adalah analisis deskriptif, analisis perencanaan dan realisasi tenaga kerja, analisis deviasi *man-hours* dan produktivitas tenaga kerja, dan analisis sebab-akibat (*cause-effect analysis*). Analisis deskriptif digunakan untuk menggambarkan kondisi aktual penggunaan tenaga kerja pada proyek pembangunan kapal OPV berdasarkan data *manpower, man-hour*, dan progres pekerjaan proyek. Data diperoleh melalui observasi lapangan, wawancara dengan *project manager* dan *manpower planner*, serta studi dokumen proyek seperti *manpower* histogram, *time schedule,* dan laporan progres pekerjaan.

 ISSN 2987-677x

Analisis perencanaan dan realisasi tenaga kerja dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian antara kebutuhan tenaga kerja yang direncanakan dengan kondisi aktual di lapangan selama proyek pembangunan kapal OPV berlangsung. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi deviasi *manpower*, mengevaluasi efektivitas penggunaan tenaga kerja, serta mengetahui faktor-faktor yang memengaruhi produktivitas proyek. Hasil analisis digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan terkait pengendalian tenaga kerja, distribusi *manpower*, dan *monitoring* progres proyek agar pelaksanaan pekerjaan tetap sesuai target waktu dan biaya.

Analisis deviasi *man-hours* dan produktivitas tenaga kerja dilakukan untuk mengevaluasi tingkat efisiensi penggunaan tenaga kerja selama proyek pembangunan kapal OPV berlangsung. Analisis ini bertujuan untuk membandingkan antara *planned man-hours* dan *actual man-hours* pada setiap departemen pekerjaan guna mengidentifikasi deviasi penggunaan jam kerja serta faktor-faktor yang memengaruhi produktivitas proyek.

Selain itu, analisis ini digunakan untuk menilai efektivitas pengendalian tenaga kerja melalui parameter produktivitas seperti *Labor Performance Index* (LPI). Hasil analisis menjadi dasar dalam evaluasi kinerja proyek, pengendalian biaya tenaga kerja, serta pengambilan keputusan terkait distribusi *manpower* dan strategi pengendalian proyek. Analisis sebab-akibat digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi deviasi tenaga kerja dan produktivitas proyek. Faktor yang dianalisis meliputi ketersediaan material, distribusi tenaga kerja, koordinasi antar divisi, kompetensi tenaga kerja, dan kondisi operasional di area galangan kapal. Penilaian risiko juga dilakukan menggunakan pendekatan Identifikasi Bahaya dan Penilaian Risiko (IBPR/HIRA) dengan mengacu pada hierarki pengendalian risiko dan prinsip *As Low As Reasonably Practicable* (ALARP).

Hasil Kerja

Gambaran Umum Proyek

Proyek pembangunan *Offshore Patrol Vessel* (OPV) merupakan proyek konstruksi kapal yang memiliki tingkat kompleksitas tinggi karena melibatkan berbagai disiplin pekerjaan dan sistem terintegrasi. Kapal OPV umumnya digunakan untuk patroli maritim, pengawasan wilayah laut, operasi keamanan, dan dukungan pertahanan. Oleh karena itu, pembangunan kapal harus memenuhi standar kualitas, keselamatan, dan ketepatan waktu yang tinggi.

Pada studi kasus ini, proyek pembangunan OPV dilaksanakan di salah satu galangan kapal di Batam dengan durasi proyek sekitar 12 bulan. Tahapan pekerjaan utama meliputi:

1. *Hull Fabrication*
2. *Assembly & Erection*
3. *Outfitting*
4. *Machinary Installation*
5. *Electrical Installation*
6. *Commisioning*

Dari seluruh tahapan tersebut, fase *erection* dan *outfitting* merupakan fase dengan kebutuhan tenaga kerja tertinggi karena melibatkan pekerjaan simultan dari berbagai divisi. Selain itu, proyek pembangunan kapal memiliki karakteristik pekerjaan yang sangat bergantung pada ketersediaan material dan koordinasi antar divisi. Keterlambatan pada satu aktivitas dapat memengaruhi aktivitas lain secara berantai sehingga pengendalian tenaga kerja menjadi sangat penting untuk menjaga kelancaran proyek.

Analisis Perencanaan dan Realisasi Tenaga Kerja

Perencanaan tenaga kerja pada proyek pembangunan OPV dilakukan berdasarkan estimasi *man-hour* yang kemudian dikonversikan menjadi kebutuhan *manpower* sesuai dengan jadwal proyek. Distribusi tenaga kerja difokuskan pada beberapa divisi utama, yaitu *hull construction, outfitting, machinery*, dan *electrical*. Hasil analisis menunjukkan adanya deviasi antara *planned manpower* dan *actual manpower* pada beberapa fase proyek. Deviasi terbesar terjadi pada fase *erection* dan *outfitting* akibat peningkatan kebutuhan tenaga kerja untuk mengejar progres pekerjaan. Tabel 1 menunjukkan contoh perbandingan *planned manpower* dan *actual manpower* pada beberapa periode pekerjaan.

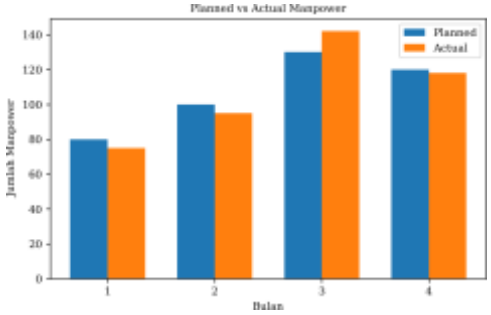
Tabel 1. Perbandingan *Planned* dan *Actual Manpower*

Bulan	*Planned Manpower*	*Actual Manpower*
1	80	75
2	100	95
3	130	142
4	120	118

Berdasarkan data tersebut, terlihat bahwa jumlah tenaga kerja aktual pada bulan ketiga melebihi rencana awal. Kondisi ini menunjukkan adanya penyesuaian tenaga kerja akibat dinamika pekerjaan di lapangan.

Tabel 2. Evaluasi Pengendalian Tenaga Kerja

Parameter	Sebelum Pengendalian	Setelah Pengendalian
Deviasi *Manpower*	9%	4%
LPI Rata-rata	0,88	0,92
Idle Time	Tinggi	Menurun
Keterlambatan Aktivitas	Sering Terjadi	Berkurang



Gambar 1. *Planned vs Actual Manpower*

 ISSN 2987-677x

Berdasarkan hasil evaluasi, penerapan strategi pengendalian tenaga kerja berbasis *monitoring manpower* dan koordinasi antar divisi menunjukkan penurunan deviasi *manpower* dari 9% menjadi 4%. Selain itu, nilai rata-rata *Labor Performance Index* (LPI) meningkat dari 0,88 menjadi 0,92, yang menunjukkan peningkatan efisiensi penggunaan tenaga kerja selama proyek berlangsung.

Analisis Deviasi *Man-Hours* dan Produktivitas Tenaga Kerja

Untuk mengevaluasi efektivitas pengendalian tenaga kerja pada proyek pembangunan kapal OPV, dilakukan analisis perbandingan antara *Planned Man-hours* dan *Actual Man-hours* pada beberapa departemen pekerjaan utama.

Tabel 3. Evaluasi Pengendalian Tenaga Kerja

Departemen	*Planned MH*	*Actual MH*	Deviasi (%)
Welding	120.000	132.500	+10,4%
Block Assembly	95.000	101.200	+6,5%
Outfitting	85.000	93.400	+9,9%
Painting	40.000	38.500	-3,8%

Berdasarkan hasil analisis, sebagian besar departemen mengalami peningkatan *actual man-hours* dibandingkan dengan perencanaan awal proyek. Deviasi terbesar terjadi pada pekerjaan *welding* akibat tingginya kebutuhan *rework* dan keterlambatan material yang memengaruhi produktivitas pekerjaan. Selain itu, dilakukan evaluasi produktivitas tenaga kerja menggunakan parameter *Labor Performance Index* (LPI) dengan persamaan:

$$LPI = \frac{Planned\ Man\ Hours}{Actual\ Man\ Hours}$$

Tabel 4. Nilai *Labor Performance Index* (LPI)

Departemen	*Planned MH*	*Actual MH*	LPI	Keterangan
Welding	120.000	132.500	0,91	Tidak Efisien
Block Assembly	95.000	101.200	0,94	Tidak Efisien
Outfitting	85.000	93.400	0,91	Tidak Efisien
Painting	40.000	38.500	1,03	Efisien

Nilai LPI yang berada di bawah 1 menunjukkan bahwa penggunaan tenaga kerja pada beberapa departemen belum efisien dibandingkan dengan target perencanaan proyek. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh keterlambatan material, keterbatasan *workfront*, koordinasi antar divisi, dan distribusi tenaga kerja yang belum optimal. Namun demikian, penerapan strategi pengendalian tenaga kerja berbasis *monitoring manpower* dan evaluasi produktivitas secara berkala mampu membantu menurunkan deviasi *manpower* serta meningkatkan efektivitas pengendalian proyek.

Analisis Produktivitas Tenaga Kerja

Produktivitas tenaga kerja dianalisis berdasarkan hubungan antara *output* pekerjaan dan jumlah *man-hour* yang digunakan. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa peningkatan jumlah tenaga kerja tidak selalu menghasilkan peningkatan *output* secara proporsional. Kondisi tersebut menunjukkan adanya fenomena di*minishing return*, yaitu ketika penambahan tenaga kerja justru menurunkan efisiensi akibat keterbatasan ruang kerja (*workfront*), overlap pekerjaan, dan koordinasi yang kurang optimal. Selain itu, keterlambatan material juga menyebabkan *idle time* pada beberapa aktivitas pekerjaan sehingga produktivitas tenaga kerja menurun.

Analisis Sebab-Akibat

Berdasarkan hasil analisis sebab-akibat, terdapat beberapa faktor utama yang memengaruhi deviasi tenaga kerja dan produktivitas proyek, yaitu:

1. Keterlambatan material yang menyebabkan pekerjaan tidak berjalan sesuai rencana.
2. Distribusi tenaga kerja yang tidak merata antar divisi
3. Koordinasi yang kurang optimal antara *engineering*, produksi, dan HR.
4. Keterbatasan *workfront* di area galangan kapal.
5. Perbedaan tingkat kompetensi tenaga kerja.

Analisis ini menunjukkan bahwa permasalahan tenaga kerja pada proyek kapal tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah *manpower*, tetapi juga oleh sistem pengendalian dan koordinasi proyek secara keseluruhan.

Kajian K3L dan Risiko Kerja

Aktivitas konstruksi kapal memiliki tingkat risiko kerja yang tinggi, khususnya pada pekerjaan we*lding, lifting, grinding*, dan *electrical work*. Oleh karena itu, dilakukan identifikasi bahaya dan penilaian risiko menggunakan pendekatan HIRA. Beberapa potensi bahaya yang teridentifikasi meliputi:

- Percikan api pada pekerjaan
- Beban jatuh pada aktivitas *lifting*
- Gangguan pernapasan akibat debu *grinding*
- Resiko sengatan listrik pada *electrical work*

Pengendalian risiko dilakukan berdasarkan hierarki pengendalian, mulai dari rekayasa teknik, pengendalian administratif, hingga penggunaan alat pelindung diri (APD). Penerapan K3L pada proyek ini mengacu pada UU No. 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja, PP No. 50 Tahun 2012 tentang SMK3, ISO 45001:2018, ISO 14001:2015. Melalui penerapan pengendalian risiko tersebut, tingkat risiko kerja dapat ditekan hingga mencapai level ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*).

Rekomendasi Solusi

Berdasarkan hasil analisis, solusi yang direkomendasikan adalah penerapan sistem pengendalian tenaga kerja terintegrasi berbasis data (*integrated manpower control system*). Sistem ini

 ISSN 2987-677x

mengintegrasikan fungsi HR, *manpower planner*, dan *project control* dalam satu sistem *monitoring* tenaga kerja yang terstruktur. Sistem tersebut didukung oleh penggunaan *database* produktivitas historis serta *monitoring planned* dan *actual manpower* secara berkala. Penerapan solusi ini diharapkan mampu:

- Mengurangi deviasi *manpower*
- Meningkatkan produktivitas tenaga kerja
- Mempercepat pengambilan keputusan proyek
- Mendukung efisiensi biaya dan waktu proyek

Kesimpulan

Pengendalian tenaga kerja merupakan faktor penting dalam keberhasilan proyek pembangunan kapal OPV di galangan kapal Batam. Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat deviasi antara *planned manpower* dan *actual manpower* yang dipengaruhi oleh keterlambatan material, distribusi tenaga kerja yang kurang optimal, koordinasi antar divisi, dan keterbatasan area kerja.

Peningkatan jumlah tenaga kerja tidak selalu meningkatkan produktivitas secara proporsional. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengendalian tenaga kerja yang lebih terintegrasi dan berbasis data.

Berdasarkan hasil analisis performa tenaga kerja, penerapan *integrated manpower control system* mampu membantu menurunkan deviasi antara *planned manpower* dan *actual manpower* dari sekitar 9% menjadi 4%. Selain itu, nilai *Labor Performance Index* (LPI) rata-rata sebesar 0,92 menunjukkan bahwa strategi pengendalian tenaga kerja memberikan peningkatan efisiensi dibandingkan metode pengendalian konvensional. Dengan demikian, strategi tersebut dinilai cukup efektif dalam membantu mengurangi potensi keterlambatan pekerjaan dan pembengkakan biaya tenaga kerja pada proyek pembangunan kapal OPV.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah mendukung penyusunan studi kasus ini, khususnya pihak galangan kapal, dosen pembimbing Program Profesi Insinyur, serta rekan-rekan yang telah memberikan masukan selama proses penyusunan artikel.

Referensi

Fabi, B., & Pettersen, N. (1992). Human resource management practices in project management. *International Journal of Project Management, 10*(2), 81–88. https://doi.org/10.1016/0263-7863(92)90060-M

Kerzner, H. (2017). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling.* Wiley.

Lientz, B. P., & Rea, K. P. (2011). *Project management for the 21st century* (3rd ed.).

Mayo, G., Shoghli, O., & Morgan, T. (2018). *Manpower and efficiency study of the Manns Harbor Shipyard.*

Popaitoon, S., & Siengthai, S. (2014). The moderating effect of human resource management practices on the relationship between knowledge absorptive capacity and project performance in project-oriented companies. *International Journal of Project Management, 32*(6), 908–920. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.12.002

Wuryaningrum, N. D. (2025). Tantangan manajemen pembangunan kapal di Indonesia. *INOVTEK Polbeng, 15*(2), 101–112. https://doi.org/10.35314/v00wbp34

 ISSN 2987-677x

Penerapan *Ground Anchor Prategang* untuk Peningkatan Faktor Keamanan Lereng pada Lingkungan Tropis Basah: Studi Kasus Jalan Tol Gempol–Pandaan

Iwan Wisnoe[1] Rasional Sitepu[1]

[1] PT. Duta Bangsa Mandiri & Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2] Dosen program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ iwan.wisnoe29@gmail.com

✉ rasional@ukwms.ac.id

Ruas Jalan Tol Gempol–Pandaan merupakan koridor transportasi strategis yang melewati topografi perbukitan dengan potensi ketidakstabilan lereng yang tinggi. Pada segmen KM 51+400B, lereng mengalami pergerakan progresif yang dipicu oleh infiltrasi air hujan intensif dan akumulasi air pada zona-zona rentan di bawah permukaan, yang diperparah oleh ketidakefektifan sistem drainase eksisting. Kondisi ini menimbulkan ancaman nyata terhadap keselamatan pengguna jalan sekaligus keberlangsungan operasional infrastruktur tol sebagai aset strategis nasional. Penelitian ini bertujuan menganalisis kondisi stabilitas lereng eksisting, merumuskan desain sistem perkuatan *ground anchor* prategang yang diintegrasikan dengan sub-drain horizontal, mendokumentasikan proses implementasi lapangan secara sistematis, serta mengevaluasi efektivitas peningkatan faktor keamanan yang dihasilkan. Pendekatan yang digunakan adalah studi kasus rekayasa dengan analisis stabilitas lereng melalui Metode Bishop yang Dimodifikasi pada tiga penampang kritis menggunakan dua skenario muka air tanah. Investigasi geoteknik mencakup pengujian *Standard Penetration Test* dan pemetaan geolistrik untuk mengidentifikasi distribusi kantongan air di bawah lereng. Desain *ground anchor* didasarkan pada defisit momen perlawanan terbesar yang diperoleh dari setiap penampang kritis. Hasil analisis menunjukkan bahwa mekanisme ketidakstabilan lereng bersifat hidrologis-dominan, di mana kondisi kritis terjadi pada musim hujan saat muka air tanah berada pada elevasi tertinggi. Desain sistem perkuatan berhasil dirumuskan berdasarkan defisit momen perlawanan pada masing-masing penampang, dan implementasi lapangan berlangsung selama kurang lebih tujuh minggu hingga menghasilkan penyelesaian seluruh item pekerjaan struktural. Faktor keamanan setelah perkuatan melampaui batas minimum yang disyaratkan, sementara sistem sub-drain horizontal secara efektif menurunkan tekanan air pori secara permanen.

Kata kunci: *ground anchor*; faktor keamanan; stabilitas lereng; metode Bishop; sub-drain horizontal; infrastruktur jalan tol

Pendahuluan

Jalan tol sebagai tulang punggung sistem transportasi nasional menanggung tuntutan keandalan struktural yang tinggi, tidak hanya dari sisi kapasitas beban lalu lintas, tetapi juga dari aspek stabilitas lereng di sepanjang koridornya. Di Indonesia, yang secara geografis berada pada zona konvergensi tektonik aktif dengan intensitas curah hujan tahunan tinggi, persoalan kelongsoran lereng pada ruas jalan tol bukan sekadar risiko teknis, melainkan telah berulang kali berkembang menjadi bencana infrastruktur yang menimbulkan kerugian ekonomi besar, gangguan mobilitas, serta biaya rehabilitasi yang signifikan (Karnawati, 2003; Natawidjaja, 2007). Kondisi tersebut diperparah oleh karakteristik tanah residual tropis yang umumnya memiliki permeabilitas tinggi, mudah mengalami peningkatan tekanan air pori saat musim hujan, dan rentan mengalami penurunan kuat geser ketika jenuh air.

Ruas Jalan Tol Gempol–Pandaan sepanjang 13,61 km yang menghubungkan kawasan industri Gempol dengan pusat distribusi Pandaan di Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur, merupakan salah satu koridor strategis nasional yang melintasi topografi perbukitan dengan perbedaan elevasi signifikan antara badan jalan dan lereng alami di sekitarnya. Pada segmen KM 50+500 hingga KM 51+600, telah terjadi kelongsoran besar pada periode 2016–2017 yang dipicu oleh kombinasi infiltrasi air hujan, peningkatan tekanan air pori, dan kondisi tanah residual yang tidak stabil (Institut Teknologi Sepuluh Nopember/ITS, 2024).

Secara global, penggunaan *ground anchor* telah banyak diterapkan sebagai metode perkuatan lereng pada kasus lereng dalam dengan gaya penggeser tinggi. Xanthakos (1991) dan Sabatini et al (1999) menjelaskan

 ISSN 2987-677x

bahwa *ground anchor* bekerja dengan mentransfer gaya tarik melewati zona longsor menuju lapisan tanah atau batuan yang stabil sehingga mampu meningkatkan gaya normal pada bidang gelincir kritis. Penelitian Bahsan dan Sopandji (2019) menunjukkan bahwa penggunaan *ground anchor* pada lereng galian mampu meningkatkan faktor keamanan secara signifikan dibandingkan sistem penahan konvensional.

Kebaruan utama penelitian ini terletak pada tiga aspek. Pertama, integrasi analitik antara data uji geolistrik (identifikasi *water pocket*) dengan pemodelan stabilitas lereng Bishop untuk kuantifikasi defisit momen perlawanan (ΔMR) sebagai basis langsung desain gaya prategang. Kedua, pendokumentasian komprehensif implementasi *ground anchor* pada tanah granular residual (ϕ=35°) kategori yang relatif sedikit dibahas dibanding tanah kohesif dalam literatur domestik.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus rekayasa (*engineering case study*) dengan desain penelitian deskriptif-evaluatif. Data primer diperoleh dari investigasi lapangan dan pelaksanaan konstruksi pada KM 51+400 hingga 51+500B, sedangkan data sekunder berupa hasil uji tanah laboratorium dan laporan investigasi geoteknik yang dilakukan oleh Laboratorium Mekanika Tanah dan Batuan, Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya pada Desember 2024.

Lokasi penelitian berada pada Ruas Jalan Tol Gempol–Pandaan, tepatnya pada segmen KM 51+435 hingga KM 51+485, Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur. Area ini merupakan zona *cutting* bukit dengan lereng alami di kedua sisi badan jalan. Topografi setempat menunjukkan perbedaan elevasi antara permukaan jalan dan puncak tebing yang cenderung tinggi. Berdasarkan pengamatan lapangan, terdapat indikasi pergerakan tanah berupa: (a) retakan vertikal dan diagonal pada lapisan shotcrete eksisting; (b) penurunan dan pergeseran bronjong kawat yang menutup alur saluran drainase di kaki tebing; serta (c) ketidakefektifan sistem weep hole akibat penyumbatan. Uji geolistrik (2D resistivity) yang dilakukan pada enam lintasan pengukuran mengidentifikasi keberadaan kantongan air (water pocket) pada kedalaman 9–19 meter di zona R4, serta pada kedalaman 9 meter (R1) dan 11 meter (R2) dari permukaan lereng.

Analisis stabilitas lereng dilakukan menggunakan metode Bishop yang Dimodifikasi (*Modified Bishop Method*), yang diakui sebagai salah satu metode kesetimbangan batas yang akurat untuk bidang longsor berbentuk lingkaran (*circular failure surface*) dengan tingkat ketelitian mencapai 5% dibandingkan solusi eksak (Duncan & Wright, 2005). Analisis dilaksanakan pada tiga penampang representatif: KM 51+500, KM 51+550, dan KM 51+600.

Dua skenario kondisi muka air tanah disimulasikan: (1) Kondisi Muka Air Tanah Tinggi (MAT Tinggi) merepresentasikan kondisi puncak musim hujan di mana kantongan air terisi penuh; dan (2) Kondisi Muka Air Tanah Rendah (MAT Rendah) merepresentasikan kondisi musim kemarau. Kantongan air yang terdeteksi dari uji geolistrik dimodelkan sebagai lapisan jenuh dengan tekanan air pori penuh. Pada setiap penampang, dianalisis beberapa kemungkinan bidang longsor (*multiple failure circles*) untuk mengidentifikasi bidang kritis dengan faktor keamanan minimum. Defisit momen perlawanan (ΔMR) dihitung sebagai selisih antara momen perlawanan yang dibutuhkan untuk mencapai FK target dan momen perlawanan yang tersedia dari kekuatan tanah sendiri.

Faktor Keamanan target yang ditetapkan dalam perencanaan perkuatan adalah FK = 1,50, sesuai dengan persyaratan minimum untuk perkuatan lereng permanen pada infrastruktur jalan tol berdasarkan SNI dan panduan teknis Kementerian PUPR.

Desain *ground anchor* mengacu pada kerangka teori transfer beban Littlejohn (2012) dan *British Standard* BS 8081:2015 (*Ground Anchorages*). Gaya prategang yang dibutuhkan pada setiap angkur dihitung berdasarkan defisit momen perlawanan (ΔMR) terbesar pada masing-masing penampang, dengan persamaan:

$$N_{anchor} = \Delta MR / (R \times jarak_{angkur} \times jumlah_{angkur})$$

Gaya lekat (*skin friction/bond stress*, τf) pada zona angkur (*bond zone*) dihitung berdasarkan tegangan normal efektif pada tiga kedalaman angkur berbeda (σn1, σn2, σn3 = 14,4; 21,6; 27,0 t/m²), menggunakan formula:

$$\tau f = \sigma n \times \tan(\phi) \; ; \; L_{bond} = (T \times SF) / (\pi \times D \times \tau f)$$

di mana T adalah gaya per angkur, D adalah diameter grouting (0,10 m), dan SF = 1,30. Material tendon yang digunakan adalah PC *Strand* 7-kawat ASTM A416 *Grade* 270 berdiameter 0,5" (12,7 mm) dengan UTS 184 kN per *strand*. Setiap titik angkur terdiri dari 3 buah *strand*. Sistem *grouting* menggunakan semen dengan *admixture non-shrinkage* untuk memastikan transfer beban yang sempurna antara strand dan tanah. Angkur diklasifikasikan sebagai tipe permanen (*permanent anchor*) sesuai dengan persyaratan EN 1537.

Pelaksanaan konstruksi mengikuti tahapan yang terstruktur dan terdokumentasi melalui laporan harian (*daily report*) yang mencatat tanggal, lokasi (*nomor grid beam*), personel, alat yang digunakan, dan volume pekerjaan. Urutan pekerjaan utama adalah sebagai berikut:

a. Pekerjaan persiapan: pembongkaran *U-Ditch* eksisting (50,4 m') dan *shotcrete eksisting* (550 m²) menggunakan *excavator* PC 200 dan *jack hammer*.
b. Galian tanah struktur: penggalian pada area *grid beam* setebal 0,1575–0,3725 meter per titik menggunakan kombinasi *jack hammer* dan alat manual (total 205,20 m³).

 ISSN 2987-677x

c. Pengeboran (*drilling*): menggunakan *spindle drill* untuk membuat lubang bor berdiameter 100 mm pada sudut dan kedalaman sesuai desain (total panjang 14 m/titik: 4 m *free* + 10 m *bond*).
d. Fabrikasi dan instalasi strand: perakitan tendon meliputi *centralizer* PVC 3"–4", HDPE *grout tube* 1", *corrugated sheath*, dan *end cap*; dimasukkan ke dalam lubang bor.
e. Grouting: injeksi *grout* semen dengan *grout pump* bertekanan untuk memenuhi zona *bond length*; dilakukan dengan *admixture plasticizer* dan non-*shrinkage*.
f. Konstruksi *grid beam*: pemasangan *bekisting*, tulangan, dan pengecoran beton Kelas B untuk *grid beam* 200×200 mm sebagai dudukan *anchor block* dan *wedges*.
g. *Stressing*: pemberian gaya prategang menggunakan *hydraulic jack* (1 *unit*) dan *power pack* (1 *unit*) sesuai gaya desain; dikontrol melalui pengujian gaya prategang.
h. *Sub-drain horizontal*: pengeboran horizontal (139 m'), pemasangan *geotextile non-woven* (20,60 m²), dan instalasi pipa PVC *perforated* Ø1,5" sepanjang 8 m per titik (18 titik).

Pengendalian mutu (*quality control*) dilaksanakan melalui: uji kuat tekan beton *grouting*, uji kuat tekan beton *grid beam*, dan pengujian gaya prategang (*stressing test*) untuk verifikasi kapasitas setiap angkur.

Hasil Kerja

Analisis stabilitas lereng dengan metode Bishop pada tiga penampang kritis menghasilkan nilai Faktor Keamanan (FK) yang bervariasi secara signifikan tergantung kondisi muka air tanah (Tabel 2). Pada kondisi MAT Tinggi menunjukkan skenario paling kritis saat musim hujan ditemukan beberapa bidang longsor dengan FK < 1,00, mengindikasikan lereng dalam kondisi aktif runtuh secara parsial.

Tabel 2. Rekapitulasi Nilai Faktor Keamanan (FK) Kondisi Eksisting

Lokasi	FS Bishop (MAT Tinggi) – Kritis	FS Bishop (MAT Rendah)	Status	ΔMR Terbesar (kN-m)
KM 51+500	0,95 – 1,35	1,33 – 1,58	Kritis / Tidak Stabil	3.756,10
KM 51+550	0,88 – 1,41	1,16 – 1,61	Kritis / Tidak Stabil	3.104,33
KM 51+600	0,86 – 1,60	1,30 – 1,58	Kritis / Tidak Stabil	3.755,35

Sumber: Laporan Investigasi Geoteknik ITS (2024), diolah.

Pada KM 51+500, FK Bishop terendah mencapai 0,95 (kondisi MAT Tinggi) dengan bidang longsor berpusat di koordinat (33,33; 21,49) dan radius 11,05 m. Defisit momen perlawanan (ΔMR) terbesar pada penampang ini adalah 3.756,10 kN-m. Pada KM 51+550, FK kritis sebesar 0,88 teridentifikasi pada bidang longsor dengan ΔMR mencapai 3.104,33 kN-m. Sementara itu, KM 51+600 mencatat FK terendah 0,86 nilai paling kritis di antara ketiga penampang dengan ΔMR sebesar 3.755,35 kN-m, yang mengindikasikan potensi kelongsoran yang signifikan jika kondisi muka air tanah tinggi bertahan dalam durasi yang panjang.

Pada kondisi MAT Rendah, seluruh penampang menunjukkan FK ≥ 1,16, dengan sebagian besar bidang longsor mencapai kondisi aman (FK > 1,50). Pola ini mengkonfirmasi bahwa destabilisasi lereng di lokasi ini bersifat sepenuhnya hidrologis (*hydrologically driven*), konsisten dengan temuan uji geolistrik yang mengidentifikasi kantongan air di kedalaman 9–19 meter. Korelasi antara fluktuasi muka air tanah musiman dan nilai FK memberikan landasan ilmiah yang kuat untuk pemilihan solusi ganda: perkuatan mekanis (*ground anchor*) dan pengelolaan air tanah (*sub-drain horizontal*).

Desain Ground Anchor dan Sub-Drain

Berdasarkan defisit momen perlawanan terbesar pada kondisi MAT Tinggi, desain *ground anchor* dirumuskan untuk memenuhi FK target = 1,50. Rekapitulasi parameter desain disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Parameter Desain *Ground Anchor* per Penampang

Parameter Desain	KM 51+500	KM 51+550	KM 51+600	Spesifikasi Umum	Satuan
Gaya prategang terbesar	22,95	29,02	30,21	-	ton
Jumlah angkur/ bidang longsor	3	3	3	3 nos/ tendon	bh
Jarak pemasangan	3	3	3	3	meter
Panjang *bond length*	5–8	6–10	5–10	10	meter
Free length	4	4	4	4	meter
Diameter *borehole grouting*	10	10	10	10	cm
Strand: PC Wire ASTM A416, Grade 270	Ø12,7 mm	Ø12,7 mm	Ø12,7 mm	Ø0,5" (UTS 184 kN)	-

Sumber: Laporan Desain ITS (2024); Dokumen Teknis Kontrak PT Kelana Ilmu Abadi (2025).

Gaya prategang terbesar terjadi pada KM 51+550 dan 51+600, yakni masing-masing 29,02 dan 30,21 ton, nilai ini yang menjadi acuan kapasitas desain angkur per titik. Dengan konfigurasi 3 tendon dan jarak pemasangan 3 meter, gaya prategang total per meter panjang lereng mencapai 30 ton/3m = 10 ton/m', nilai yang memadai untuk menetralkan gaya penggeser residual. Bond length yang lebih panjang pada KM 51+550 dan 51+600 (hingga 10 meter) mencerminkan kebutuhan kapasitas lekat yang lebih besar akibat gaya angkur yang lebih tinggi. Panjang total angkur (*free + bond* = 14 meter) dirancang agar zona *bond* berada sepenuhnya di luar zona longsor aktif, sesuai persyaratan fundamental perencanaan *ground anchor*.

Sistem *sub-drain* horizontal terdiri dari 18 titik pengeboran horizontal (borehole Ø7,5 cm) sedalam 8 meter pada lokasi yang diidentifikasi sebagai zona kantongan air.

 ISSN 2987-677x

Pipa PVC Ø1,5" *perforated* yang diproteksi dengan selimut *geotextile non-woven* dipasang untuk memfasilitasi aliran air gravitasi dari zona jenuh ke permukaan lereng, secara efektif menurunkan muka air tanah dan mengurangi tekanan air pori pada bidang longsor.

Pembahasan

Temuan utama dari analisis stabilitas lereng menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan (FK) turun drastis dari rentang 1,16–1,58 pada kondisi muka air tanah (MAT) rendah menjadi 0,86–1,35 pada kondisi MAT tinggi. Hasil ini mengonfirmasi bahwa kegagalan lereng di lokasi penelitian bersifat *hydrologically driven failure*, yaitu kegagalan yang didominasi oleh pengaruh hidrologi dan tekanan air pori, bukan semata-mata akibat rendahnya kekuatan geser intrinsik tanah.

Fenomena tersebut konsisten dengan konsep tegangan efektif Terzaghi, di mana peningkatan tekanan air pori (u) secara langsung menurunkan tegangan normal efektif ($\sigma' = \sigma - u$) pada bidang longsor sehingga kapasitas tahanan geser tanah ($\tau = \sigma' \tan \phi$) ikut menurun secara signifikan. Pada material granular murni dengan parameter kohesi c = 0 seperti pada lokasi penelitian, kekuatan geser sepenuhnya bergantung pada besarnya tegangan efektif sehingga perubahan muka air tanah sangat memengaruhi stabilitas lereng (Fredlund & Rahardjo, 1993). Temuan ini juga sejalan dengan penelitian Bian et al. (2023) dan Hosseini et al. (2024) yang menyatakan bahwa peningkatan tekanan air pori merupakan faktor dominan penyebab penurunan reliabilitas lereng berjangkar pada daerah dengan curah hujan tinggi.

Keberadaan kantongan air (*water pocket*) pada kedalaman 9–19 meter yang teridentifikasi melalui pengujian geolistrik menjadi faktor utama yang membedakan lokasi ini dari lereng lain yang secara visual tampak stabil. Kantongan air tersebut terbentuk akibat kombinasi lapisan tanah dengan permeabilitas rendah dan tidak efektifnya sistem drainase eksisting. Kondisi serupa juga dilaporkan oleh Dou et al. (2022) dan Liu & Lai (2024) yang menunjukkan bahwa akumulasi air bawah permukaan dapat memicu peningkatan tekanan air pori lokal dan mempercepat deformasi progresif lereng. Hasil penelitian ini menegaskan pentingnya investigasi geofisika seperti geolistrik sebagai bagian integral investigasi geoteknik lereng jalan tol, bukan sekadar investigasi tambahan. Temuan ini memperkuat pendapat Karnawati et al. (2008) bahwa banyak kegagalan lereng di Indonesia dipicu oleh ketidakmampuan investigasi konvensional dalam mendeteksi kondisi hidrogeologi bawah permukaan secara detail.

Keunggulan *ground anchor* dibanding alternatif boredpile pada konteks ini menurut laporan investigasi ITS (2024) merekomendasikan dua alternatif perkuatan, yaitu boredpile Ø80 cm dengan kapasitas momen retak 39 t-m dan sistem *ground anchor* prategang. Pemilihan *ground anchor* dalam implementasi aktual dapat dianalisis dari sudut pandang mekanis dan konstruktif.

Secara mekanis, *boredpile* bekerja sebagai elemen lentur pasif yang menahan gaya lateral melalui mobilisasi momen lentur pada penampang beton. Kapasitasnya sangat bergantung pada kemampuan penampang menahan momen hingga batas retak. Sebaliknya, *ground anchor* bekerja sebagai sistem aktif yang memberikan tambahan gaya normal pada bidang longsor sehingga meningkatkan tahanan geser tanah secara langsung. Mekanisme ini memungkinkan transfer gaya melewati zona longsor menuju lapisan tanah yang lebih stabil, sebagaimana dijelaskan oleh Xanthakos (1991) dan Sabatini et al. (1999).

Dari sisi konstruksi, pemasangan *ground anchor* pada lereng aktif lebih fleksibel karena pekerjaan *drilling* dan *stressing* dapat dilakukan menggunakan *scaffolding* tanpa memerlukan *platform* kerja besar. Kondisi ini sangat relevan pada lereng Tol Gempol–Pandaan yang memiliki keterbatasan ruang kerja di antara tebing dan jalur lalu lintas.

Efektivitas peningkatan faktor keamanan, data desain menunjukkan bahwa gaya prategang setiap angkur menghasilkan tambahan momen penahan (ΔMR) yang signifikan pada bidang longsor kritis. Sebagai contoh, pada KM 51+500 dengan FK awal 0,96, radius longsor 11,49 meter, dan ΔMR sebesar 1.864 kN-m, penggunaan tiga *anchor* pada jarak 3 meter dengan gaya prategang T1 = 24 ton menghasilkan gaya horizontal sebesar 8 ton/m'. Tambahan momen resistif dari sistem anchor meningkatkan FK lereng menjadi ≥ 1,50. Hasil ini konsisten dengan penelitian Matos et al. (2021) yang menunjukkan bahwa peningkatan gaya prategang anchor berkorelasi langsung dengan kenaikan faktor keamanan pada lereng jalan raya.

Efektivitas tersebut juga didukung oleh penelitian Liu (2025) yang menyatakan bahwa sistem *ground anchor* mampu meningkatkan stabilitas lereng secara signifikan pada kondisi bidang longsor dalam dan tekanan air pori tinggi. Penelitian Hosseini et al (2024) bahkan menunjukkan bahwa kombinasi *anchor* dan pengurangan tekanan air pori mampu meningkatkan reliabilitas lereng hingga lebih dari 40% dibanding kondisi tanpa perkuatan.

Perlu dicatat bahwa sebanyak 12 titik *anchor* tidak dapat terinstalasi akibat hambatan pengeboran pada lapisan keras (N-SPT > 50) dan penyesuaian geometri lapangan. Meskipun demikian, redundansi desain yang diterapkan membuat kapasitas total 70 *anchor* tetap mampu memenuhi kebutuhan ΔMR keseluruhan sehingga FK target ≥ 1,50 tetap tercapai. Prinsip redundansi ini sejalan dengan standar desain *anchor* permanen BS 8081:2015 yang mensyaratkan faktor keamanan minimum 2,0 terhadap kapasitas ultimit sistem *anchor*.

Dari perspektif teoritis, penelitian ini memperkuat validitas metode bishop yang dimodifikasi sebagai alat analisis yang *reliable* untuk kondisi tanah granular

 ISSN 2987-677x

residual tropis, sekaligus menegaskan pentingnya pemodelan multiskenario (MAT Tinggi vs. MAT Rendah) untuk memperoleh gambaran risiko yang komprehensif sesuatu yang sering diabaikan dalam perencanaan yang hanya menggunakan satu kondisi statis.

Dari perspektif praktis, studi ini memberikan template metodologis yang dapat diadopsi oleh pengelola jalan tol dan konsultan geoteknik dalam menghadapi masalah serupa. Penggabungan investigasi geolistrik → analisis bishop multiskenario → desain *ground anchor* berbasis ΔMR → *sub-drain* horizontal merupakan rantai metodologis yang koheren dan dapat direplikasi. Biaya perkuatan, meskipun tidak dibahas secara eksplisit dalam penelitian ini, dapat diestimasi berdasarkan *Bill of Quantities* (BOQ) yang telah terdokumentasi, memberikan data komparatif bagi penelitian *life-cycle cost analysis* di masa mendatang. Keterbatasan penelitian ini perlu diakui secara jujur. Data *monitoring* pasca-konstruksi (*post-construction performance monitoring*) dalam jangka panjang berupa pembacaan *load cell* pada angkur dan pencatatan pergerakan tanah melalui inklinometer belum tersedia pada saat penelitian ini disusun. *Monitoring* jangka panjang sangat penting untuk memvalidasi durabilitas sistem dan mengidentifikasi potensi degradasi kapasitas angkur akibat korosi atau relaksasi prategang, yang menjadi agenda penelitian lanjutan yang direkomendasikan.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis stabilitas lereng, perencanaan perkuatan, serta evaluasi implementasi *ground anchor* dan *sub-drain* horizontal pada lereng Jalan Tol Gempol–Pandaan KM 51+400B, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

a. Kondisi ketidakstabilan lereng pada lokasi penelitian dipengaruhi secara dominan oleh faktor hidrologi, khususnya peningkatan tekanan air pori akibat akumulasi air bawah permukaan (*water pocket*) dan tingginya muka air tanah. Kondisi tersebut menyebabkan penurunan tegangan efektif tanah sehingga mengurangi kapasitas tahanan geser lereng.
b. Investigasi geolistrik berhasil mengidentifikasi keberadaan kantongan air pada kedalaman tertentu yang berperan penting dalam memicu pergerakan tanah progresif. Hasil ini menunjukkan bahwa investigasi geofisika memiliki peran strategis dalam mendukung analisis geoteknik, khususnya pada lereng jalan tol dengan kondisi hidrogeologi kompleks.
c. Sistem *ground anchor* prategang terbukti lebih sesuai diterapkan dibandingkan alternatif *boredpile* pada kondisi lereng penelitian karena mampu memberikan gaya penahan aktif secara langsung pada bidang longsor. Selain itu, *ground anchor* memiliki fleksibilitas pelaksanaan yang lebih baik pada area dengan keterbatasan ruang kerja dan kondisi lereng yang masih aktif bergerak.
d. Kombinasi *ground anchor* dan *sub-drain* horizontal menghasilkan sistem perkuatan terpadu yang efektif dalam meningkatkan stabilitas lereng. *Ground anchor* berfungsi meningkatkan tahanan mekanis lereng, sedangkan *sub-drain* horizontal mengurangi tekanan air pori sebagai penyebab utama longsor. Integrasi kedua sistem tersebut memberikan mekanisme perlindungan yang lebih optimal dibandingkan penggunaan satu jenis perkuatan saja.

Implementasi perkuatan di lapangan menunjukkan bahwa pendekatan desain berbasis kondisi aktual lereng, investigasi bawah permukaan, dan kontrol pelaksanaan konstruksi sangat penting untuk memastikan efektivitas sistem perkuatan jangka panjang pada infrastruktur jalan tol di wilayah tropis basah.

Ucapan Terimakasih

Ungkapan terima kasih yang terutama kepada ALLAH SWT yang telah meridhoi penulisan artikel ini sebagai penyelesaian Program Studi Profesi Insinyur. Ucapan terima kasih kepada Istri, Anak, dan Orang Tua tercinta atas doa terbaiknya untuk penulis. Terima kasih kepada Bapak Rasional Sitepu sebagai dosen pembimbing pada Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas arahan dan bimbingannya selama ini. Terima Kasih pada PII sebagai naungan kami profesi insinyur, terima kasih kepada Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas bimbingan akademisnya, serta kepada manajemen PT Duta Bangsa Mandiri Pasuruan selalu memberikan semangat, motivasi, bantuan dalam menyelesaikan penulisan artikel.

Referensi

Abramson, L. W. (2001). *Slope stability and stabilization methods* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Akhmudiyanto, A., & Rahardjo, P. P. (2021). *Slope repair using ground anchor on toll road.* Retrieved from https://www.academia.edu/download/112002592/pdf.pdf

Bahsan, E., & Sopandji, B. S. (2019). Evaluation of ground anchor design on cut slope: A case study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 650*(1), 012023. https://doi.org/10.1088/1757-899X/650/1/012023

Barla, G., Barla, M., & Antolini, F. (2013). Analysis and design of rock slopes stabilized by anchors. *Landslides, 10*(1), 1–14. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0396-2

Bian, X., et al. (2023). Reliability evaluation of anchored slope: Case study. *Case Studies in Construction Materials, 19,* e02345. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02345

 ISSN 2987-677x

British Standards Institution. (2015). *BS 8081:2015 – Code of Practice for Grouted Anchors.* BSI Standards Publication.

British Standards Institution. (2015). *BS 8081:2015. Code of practice for grouted anchors.* BSI Standards Publication.

Bruce, D. A., & Jewell, R. A. (1987). Soil nailing: Application and practice – Part 2. *Ground Engineering, 20*(1), 21–33.

Bryson, L. S., & Giraldo, J. R. (2020). Ground anchor load-transfer response: Case study. *Canadian Geotechnical Journal, 57*(9), 1321–1335.

Chen, Z., et al. (2016). Recent advances in high slope reinforcement: Case studies. *Engineering Geology, 208*, 63–76. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.05.0

Dou, H., et al. (2022). Slope failure and reinforcement implementation in complex geological conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81*(9), 1–18. https://doi.org/10.1007/s10064-022-02707-x

Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons.

Elias, V. L., Juran, I., Bruce, D. A., Driscoll, R., & Wolosick, J. R. (2001). *Ground anchors and anchored systems*. Federal Highway Administration (FHWA).

Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils.* John Wiley & Sons.

Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). (2024). *Laporan desain penanganan lereng pada ruas Jalan Tol Gempol-Pandaan dan Surabaya-Gempol tahun 2024*. Direktorat Kerjasama dan Pengelolaan Usaha (DKPU), ITS Surabaya.

Institut Teknologi Sepuluh Nopember. (2024). *Laporan investigasi stabilitas lereng Jalan Tol Gempol–Pandaan KM 51+400B.* ITS Press.

ISSN 2987-677x

Perancangan Sinergi Radar IMSS dan Senjata MLRS Marinir dalam Transformasi Pertahanan Pantai di Wilayah ALKI

Imam Tohari[1] Joko Purnomo[2] Sulasana[3]

[1,2] Program Studi Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[1,2,3] Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut

✉ imam50aal_sby@ukwms.ac.id

Wilayah Alur Laut Kepulauan Indonesia (ALKI) merupakan jalur pelayaran internasional yang memiliki nilai strategis tinggi bagi kepentingan ekonomi dan keamanan nasional Indonesia, sehingga memerlukan sistem pengawasan dan pertahanan yang efektif. Namun, saat ini terdapat kesenjangan operasional antara sistem deteksi *Integrated Maritime Surveillance System* (IMSS) dan sistem senjata *Multi Launch Rocket System* (MLRS) milik Korps Marinir TNI AL yang masih bekerja secara terpisah, sehingga mengurangi kecepatan dan efektivitas respons terhadap potensi ancaman maritim. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis urgensi strategis wilayah ALKI, mengidentifikasi permasalahan integrasi antara sistem sensor dan efektor, serta merumuskan rancangan sinergi sistem dalam kerangka *Network Centric Warfare* guna meningkatkan efektivitas pertahanan pantai. Metode yang digunakan adalah analisis sebab–akibat (*cause and effect analysis*) untuk mengidentifikasi faktor-faktor penyebab dan dampaknya terhadap efektivitas sistem pertahanan pantai, yang ditinjau dari aspek lokasi dan aspek teknis. Hasil analisis menunjukkan bahwa keterbatasan cakupan pengawasan radar, distribusi sistem senjata yang belum optimal, serta belum terintegrasinya jaringan komunikasi dan sistem komando menyebabkan menurunnya efektivitas respons pertahanan. Oleh karena itu, diperlukan perancangan arsitektur integrasi antara radar IMSS dan sistem kendali tembakan MLRS melalui jaringan komunikasi militer yang cepat, aman, dan terintegrasi. Implementasi sinergi sistem ini diharapkan mampu meningkatkan kemampuan deteksi dini, mempercepat proses pengambilan keputusan, serta memperkuat efek penangkalan (*deterrence effect*) dalam menjaga kedaulatan dan keamanan wilayah ALKI secara berkelanjutan.

Kata kunci: ALKI, IMSS, MLRS, Pertahanan Pantai, *Network Centric Warfare*

Pendahuluan

Penulisan artikel ini didasarkan pada kondisi lingkungan strategis yang terus berkembang dan menuntut perhatian serius, terutama pada wilayah Alur Laut Kepulauan Indonesia (ALKI). ALKI merupakan jalur pelayaran internasional yang sangat penting, namun juga rentan terhadap berbagai ancaman, baik yang bersifat konvensional maupun asimetris. Oleh karena itu, pengawasan dan perlindungan di titik-titik sempit jalur ini menjadi hal yang wajib dilakukan untuk menjaga kedaulatan negara. Selain itu, terdapat kesenjangan antara sistem deteksi dan eksekusi saat ini, di mana sistem pengawasan maritim (IMSS) dan sistem persenjataan (MLRS) masih bekerja secara terpisah. Hal ini menyebabkan informasi yang diperoleh dari deteksi tidak dapat langsung dimanfaatkan secara efektif dalam pengambilan keputusan tindakan di lapangan.

Di sisi lain, perkembangan teknologi militer yang mengarah pada konsep *Network Centric Warfare* (NCW) menuntut adanya transformasi dalam sistem pertahanan pantai menjadi lebih terintegrasi, cerdas, dan saling terhubung. Kondisi geografis Indonesia yang memiliki banyak wilayah pantai dan berbatasan dengan negara lain semakin memperkuat kebutuhan akan sistem pertahanan yang terintegrasi. Integrasi antara radar IMSS dan senjata MLRS memungkinkan data target dapat langsung diolah dengan akurasi tinggi untuk meningkatkan kecepatan dan ketepatan pengambilan keputusan, sekaligus memperkuat efek gentar (*deterrence effect*). Secara keinsinyuran, studi kasus ini juga relevan karena melibatkan integrasi sistem, optimasi jaringan komunikasi yang aman dan minim gangguan, serta analisis data radar menjadi parameter penembakan yang efektif.

Rekomendasi solusi terbaik dalam sinergi IMSS dan MLRS pada pertahanan pantai adalah dengan memperkuat seluruh komponen secara terintegrasi, dimulai dari optimalisasi dan modernisasi sistem sensor IMSS agar mampu menutup *blind spot* melalui penambahan jangkauan radar, penggunaan sensor canggih, dan penyajian data maritim secara *real-time*. Di sisi lain, perlu dilakukan redistribusi dan peningkatan kesiapan operasional MLRS ke wilayah-wilayah strategis seperti *choke points* ALKI agar mampu merespons ancaman dengan cepat. Kunci utama dari efektivitas sistem ini adalah integrasi antara sensor dan

 ISSN 2987-677x

senjata melalui konsep *Network Centric Warfare* dengan dukungan sistem komando dan kontrol terpadu serta jaringan komunikasi militer yang cepat, aman, dan andal. Selain itu, data target dari radar harus dapat langsung terhubung dengan sistem kendali tembak MLRS agar proses penindakan menjadi lebih cepat dan akurat. Dengan keseluruhan langkah tersebut, sinergi IMSS dan MLRS tidak hanya meningkatkan kemampuan deteksi dan respons, tetapi juga memperkuat efek gentar (*deterrence*) dalam menjaga kedaulatan wilayah laut Indonesia.

Metode

Metode analisis yang digunakan adalah analisis sebab–akibat, yaitu cara untuk memahami hubungan antara penyebab (faktor yang memengaruhi) dan akibat (dampak yang ditimbulkan). Secara sederhana, metode ini digunakan untuk mencari tahu kenapa suatu masalah terjadi dan apa dampaknya, sehingga bisa ditemukan akar penyebabnya. Dalam penelitian ini, analisis sebab–akibat dipakai untuk melihat bagaimana berbagai faktor memengaruhi efektivitas pertahanan pantai, khususnya dalam sinergi antara sistem radar IMSS dan sistem senjata MLRS di wilayah ALKI.

Analisis dilakukan dengan melihat dua aspek utama, yaitu aspek lokasi dan aspek teknis. Pada aspek lokasi, diperhatikan kondisi geografis dan strategis ALKI, seperti tingginya lalu lintas kapal dan luasnya wilayah laut, yang menyebabkan perlunya sistem pengawasan dan pertahanan yang kuat serta saling terintegrasi. Sedangkan pada aspek teknis, dianalisis kemampuan teknologi seperti radar, senjata, jaringan komunikasi, dan sistem komando, yang berpengaruh terhadap kecepatan deteksi, ketepatan respons, dan koordinasi antar sistem. Dari kedua aspek ini dapat dipahami bahwa semakin baik hubungan antara faktor.

Hasil Kerja

Integrasi IMSS dan MLRS dalam Meningkatkan Efektivitas Pertahanan Pantai di Wilayah Strategis ALKI

Hasil kerja yang telah dilakukan dalam studi ini menunjukkan bahwa penerapan teori-teori yang digunakan mampu menjelaskan pentingnya sinergi antara sistem pengawasan dan sistem persenjataan dalam memperkuat pertahanan pantai. Berdasarkan teori wilayah strategis maritim, wilayah ALKI terbukti memiliki tingkat kerawanan tinggi karena menjadi jalur pelayaran internasional yang padat, sehingga membutuhkan pengawasan yang optimal. Hal ini selaras dengan penerapan teori sistem pengawasan maritim, di mana penggunaan IMSS mampu memberikan gambaran situasi maritim secara *real-time* melalui integrasi radar, sensor, dan komunikasi data. Namun, hasil analisis juga menunjukkan bahwa tanpa dukungan sistem eksekutor seperti MLRS, informasi yang dihasilkan belum dapat dimanfaatkan secara maksimal dalam merespons ancaman.

Lebih lanjut, berdasarkan teori sistem eksekutor dan *Network Centric Warfare* (NCW), hasil kerja menunjukkan bahwa efektivitas pertahanan pantai sangat ditentukan oleh integrasi antara sensor, sistem komando, dan sistem senjata dalam satu jaringan yang terhubung. Hal ini didukung oleh teori arsitektur jaringan komunikasi militer yang menekankan pentingnya jaringan yang cepat, aman, dan andal untuk memastikan distribusi data berjalan *real-time*. Selain itu, penerapan teori pengolahan data target dan *Fire Control System* (FCS) menunjukkan bahwa data dari radar dapat diolah menjadi parameter penembakan yang akurat untuk meningkatkan ketepatan respons MLRS. Secara keseluruhan, integrasi sistem ini terbukti mampu meningkatkan efek *deterrence* (daya tangkal), sehingga memperkuat kemampuan pertahanan pantai Indonesia dalam menjaga kedaulatan wilayah, khususnya di jalur strategis ALKI.

Penguatan Integrasi IMSS dan MLRS Berbasis Literatur untuk Meningkatkan Efektivitas Pertahanan Maritim di Wilayah ALKI

Hasil kerja dalam studi ini tidak hanya berdasarkan analisis sendiri, tetapi juga didukung oleh literatur atau penelitian terdahulu yang relevan dan terpercaya. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penempatan radar IMSS di wilayah strategis seperti Selat Sunda dan Selat Malaka sangat penting untuk meningkatkan efektivitas pengawasan maritim, terutama di jalur ALKI yang memiliki lalu lintas kapal tinggi. Selain itu, studi lain juga menjelaskan bahwa strategi pemasangan radar pantai dan penggunaan teknologi sensor yang terintegrasi dapat membantu mendeteksi ancaman laut dengan lebih cepat dan akurat. Bahkan, konsep interoperabilitas antar sistem sensor juga terbukti mampu meningkatkan kinerja sistem pertahanan maritim secara keseluruhan.

Hal ini menunjukkan bahwa proyek integrasi IMSS dan MLRS menjadi sangat penting (urgensi tinggi) karena dapat menjawab kebutuhan nyata dalam pengawasan dan pertahanan wilayah laut Indonesia. Dari sisi keinsinyuran, proyek ini juga memiliki manfaat besar karena melibatkan penerapan ilmu seperti integrasi sistem, jaringan komunikasi, dan pengolahan data teknologi tinggi. Dengan memanfaatkan referensi yang sudah ada, hasil kerja ini menjadi lebih kuat secara ilmiah serta memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan sistem pertahanan yang lebih efektif, modern, dan terintegrasi.

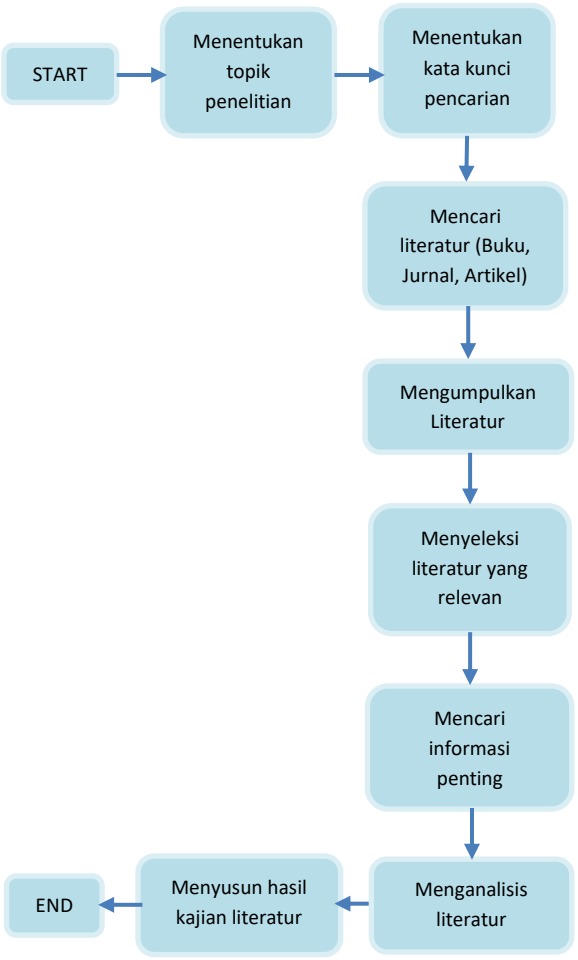
Strategi Penempatan dan Sinergi IMSS dengan MLRS

Pengambilan data pada studi literatur berdasarkan flowchart tersebut dilakukan secara bertahap dan sistematis. Proses dimulai dari menentukan topik penelitian agar fokus pembahasan jelas, kemudian dilanjutkan dengan menentukan kata kunci yang relevan untuk memudahkan pencarian sumber. Setelah itu, peneliti mencari literatur dari berbagai sumber seperti buku, jurnal, dan artikel, lalu mengumpulkan semua referensi yang ditemukan.

Selanjutnya, literatur yang terkumpul diseleksi untuk memilih sumber yang paling relevan dengan topik penelitian. Dari literatur terpilih, diambil informasi penting yang kemudian dianalisis untuk mendapatkan pemahaman yang mendalam. Hasil analisis tersebut disusun menjadi

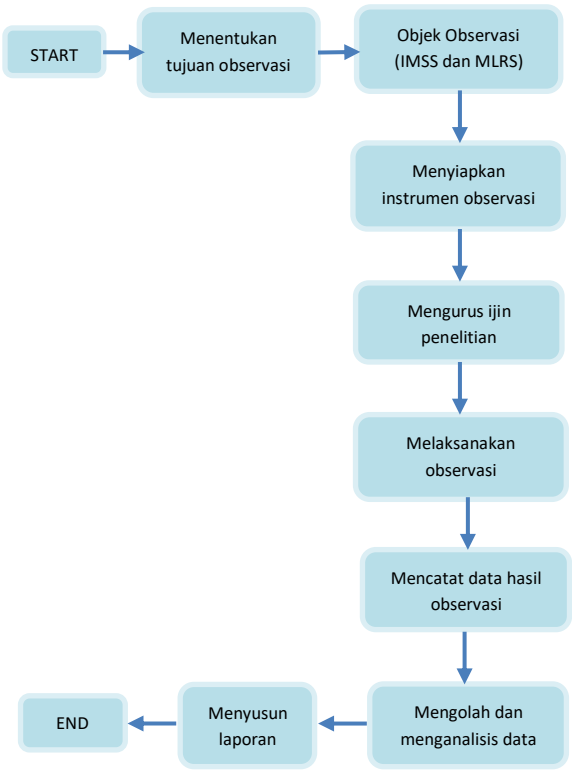
 ISSN 2987-677x

kajian literatur yang sistematis sebagai dasar dalam penelitian.



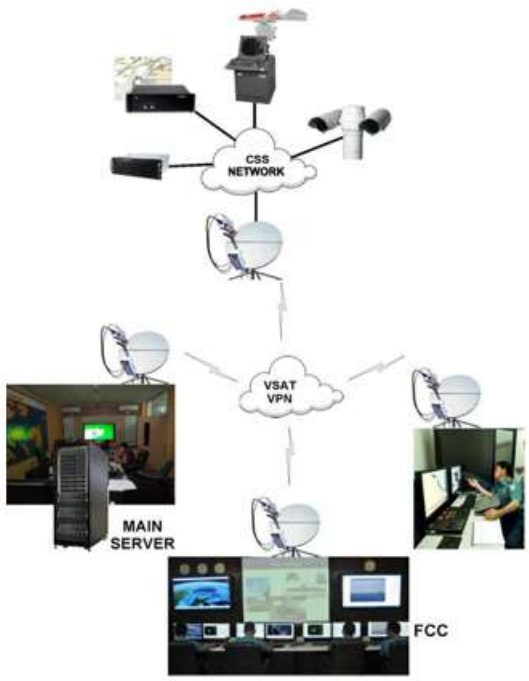
Gambar 1. *Flowchart* Metode Studi Literatur

Prosedur pengumpulan data dengan metode observasi terhadap sistem IMSS dan sistem senjata MLRS dilakukan melalui tiga tahap utama. Tahap pertama adalah persiapan, yaitu menentukan tujuan untuk memahami sistem kerja dan operasional, menetapkan objek dan lokasi observasi, menyusun aspek yang akan diamati (seperti komponen sistem, proses operasional, dan peran operator), menyiapkan instrumen seperti lembar observasi dan catatan lapangan, serta mengurus izin penelitian. Tahap kedua adalah pelaksanaan, yaitu melakukan pengamatan langsung terhadap sistem IMSS dan MLRS, mencatat seluruh hasil pengamatan, serta mengumpulkan data tambahan yang relevan. Tahap terakhir adalah pengolahan data, yaitu mengelompokkan data hasil observasi, menganalisisnya secara deskriptif sesuai tujuan penelitian, dan menyusunnya menjadi laporan agar diperoleh hasil yang jelas dan akurat.



Gambar 2. *Flowchart* Metode Observasi

Perangkat IMSS terdiri atas *Regional Command and Control Centre* (RCC), *Fleet Command and Control Centre* (FCC), *Headquater Command and Control Centre* (HCC), dan *Coastal Surveillance Station* (CSS). Tiap perangkat IMSS mempunyai fungsi dan tanggung jawab yang berbeda dan saling terkait untuk mendukung dan memberikan informasi.



Gambar 3. Perangkat Sistem IMSS

 ISSN 2987-677x

Persenjataan MLRS kaliber 122 mm yang dimiliki Marinir TNI terdiri dari beberapa jenis, yaitu RM-70 *Grad Long* dan RM-70 *Vampire* dari Ceko serta MLRS 90-B Norinco dari China, yang pada dasarnya memiliki mekanisme penembakan dan pergerakan yang hampir sama. RM-70 Grad merupakan generasi awal dengan kapasitas 40 tabung peluncur dan 40 cadangan, serta jangkauan tembakan sekitar 20 km atau lebih dengan roket modern, sedangkan RM-70 *Vampire* merupakan versi modern yang dilengkapi sistem kendali tembakan digital, kabin lapis baja, mobilitas lebih tinggi, dan kemampuan integrasi dengan jaringan tempur modern. Saat ini, seluruh sistem MLRS kaliber 122 mm tersebut ditempatkan di Surabaya dan Jakarta, tepatnya pada satuan Batalyon Roket Pasmar 1 dan Pasmar 2.



Gambar 4. Senjata MLRS Mainir TNI AL

Timeline pengambilan data untuk IMSS dilakukan selama bulan Februari dengan rincian kegiatan sebagai berikut: wawancara dilakukan pada awal minggu pertama, observasi berlangsung selama minggu pertama sampai pertengahan minggu kedua, studi dokumentasi pada akhir minggu kedua hingga awal minggu ketiga, studi literatur pada minggu ketiga, dan pengumpulan data sekunder dilakukan pada minggu keempat.

Tabel 1. Pengumpulan Data IMSS

No	Kegiatan	Alokasi Waktu (Perhari Pada Maret)									
		Minggu Ke-III					Minggu Ke-IV				
		13	16	17	18	20	22	23	24	25	26
1	Wawancara										
2	Observasi										
3	Studi Dokumentasi										
4	Studi Literatur										
5	Pengumpulan Data Sekunder										

Sementara itu, pengambilan data untuk MLRS juga berlangsung di bulan Februari, namun dimulai pada minggu kedua setelah masa libur. Wawancara dilakukan pada minggu kedua, observasi pada minggu kedua sampai pertengahan minggu ketiga, studi dokumentasi pada akhir minggu ketiga hingga awal minggu keempat, dan studi literatur serta pengumpulan data sekunder dilakukan pada minggu keempat. Pada minggu pertama hingga sebagian minggu kedua, dilakukan libur sehingga tidak ada kegiatan pengumpulan data MLRS.

Tabel 2. Pengumpulan Data MLRS

No	Kegiatan	Alokasi Waktu (Perhari pada Maret-April)						
		Minggu Ke-IV					Minggu Ke-I	
		27	28	29	30	31	1	2
1	Wawancara							
2	Observasi							
3	Studi Dokumentasi							
4	Studi Literatur							
5	Pengumpulan Data Sekunder							

Rekomendasi sinergi antara sistem IMSS dan MLRS dalam pertahanan pantai menekankan pentingnya kesesuaian antara kebutuhan teknologi dengan kemampuan personel. Modernisasi sistem IMSS untuk menutup area yang belum terpantau serta peningkatan kesiapan MLRS memerlukan personel yang memahami teknologi radar, sistem senjata, dan konsep operasi pertahanan terpadu. Selain itu, integrasi kedua sistem melalui konsep *Network Centric Warfare* menuntut keahlian dalam sistem informasi militer, jaringan komunikasi, dan *Fire Control System*, sehingga personel mampu mengelola alur data dari sensor hingga ke sistem senjata secara cepat dan tepat. Oleh karena itu, peningkatan kompetensi melalui pelatihan teknis dan penguasaan teknologi menjadi faktor utama agar sistem pertahanan pantai dapat berjalan optimal, responsif, dan sesuai kebutuhan operasional.

Tabel 3. Relevansi Kompetensi (Pengetahuan dan Keahlian)

Pilar Kompetensi	Aspek Relevansi dalam Studi Kasus IMSS–MLRS	Penjelasan Keterkaitan dengan Implementasi
Pengetahuan	Pemahaman teknologi radar IMSS	Diperlukan pemahaman tentang cara kerja sensor, proses mendeteksi target, dan penyusunan gambaran situasi maritim
Pengetahuan	Pemahaman sistem persenjataan MLRS	Menjadi dasar untuk memahami karakteristik senjata, jangkauan tembak, dan kesiapan operasional dalam pertahanan pantai
Pengetahuan	Konsep operasi pertahanan pantai terpadu	Membantu personel memahami kerja sama antara sistem deteksi (IMSS) dan sistem penindakan (MLRS) dalam satu operasi
Pengetahuan	Konsep *Network Centric Warfare*	Menjadi dasar untuk memahami integrasi sistem berbasis jaringan militer yang menghubungkan sensor dan senjata secara *real-time*
Keahlian	Pengoperasian sistem radar dan sensor IMSS	Diperlukan untuk mengoperasikan,memantau, dan memahami data deteksi dengan cepat dan tepat
Keahlian	Pengoperasian dan kesiapan sistem MLRS	Berkaitan dengan kemampuan teknis dalam mengoperasikan senjata dan kesiapan tempur di lapangan
Keahlian	Analisis dan respons data target	Kemampuan menganalisis data radar untuk menentukan tindakan dengan cepat dan tepat

 ISSN 2987-677x

Keahlian	Penguasaan sistem komunikasi dan *Fire Control System*	Penting untuk memastikan data dari sensor ke senjata berjalan cepat, aman, dan terhubung dengan baik

Kesimpulan

Solusi ini meliputi penambahan dan penataan ulang stasiun pengawasan SCC di titik-titik strategis ALKI untuk menghilangkan blind spot dan memperluas cakupan radar secara optimal. Selain itu, kesiapan operasional MLRS ditingkatkan melalui pemeliharaan rutin dan penempatan yang lebih dekat dengan jalur strategis agar respons terhadap ancaman menjadi lebih cepat. Sistem IMSS dan MLRS juga diintegrasikan lewat jaringan komunikasi militer yang aman dan cepat, memungkinkan data radar langsung diteruskan ke sistem kendali tembakan. Untuk menjaga efektivitas, latihan terpadu dilakukan secara rutin antara satuan pengawasan dan senjata, serta evaluasi dan pengembangan sistem pertahanan pantai terus dilaksanakan agar selalu siap menghadapi ancaman dan perkembangan teknologi terbaru.

Ucapan Terimakasih

Saya mengucapkan terima kasih kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat-Nya sehingga penulisan Artikel ini dapat diselesaikan dengan baik. Terima kasih juga saya sampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan bantuan selama proses penyusunan laporan ini. Saya menyadari penulisan ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu saya sangat mengharapkan saran dan masukan untuk perbaikan di masa depan. Semoga penulisan ini dapat bermanfaat dan menjadi kontribusi dalam pengembangan sistem pertahanan pantai yang lebih baik dan terintegrasi.

Referensi

Alberts, D. S., Garstka, J. J., & Stein, F. P. (2000). *Network centric warfare: Developing and leveraging information superiority*. CCRP Publication.

Bishop, C. (2012). *The encyclopedia of modern military weapons*. Amber Books.

Brno Defence Group. (n.d.). *RM-70 multiple rocket launcher*.

Department of Defense. (2001). *Network centric warfare report to Congress*.

Department of Defense. (2015). *Joint Publication 6-0: Joint communications system*.

Freedman, L. (2004). *Deterrence*. Polity Press.

Globalsecurity. (n.d.). *RM-70 Vampir: 122 mm modular rocket launcher*.

Gray, C. S. (2011). *The strategy bridge: Theory for practice*. Oxford University Press.

Hermawan, S. A. (2024). *Smart surveillance: IoT dalam mitigasi kejahatan dan keamanan maritim.*

Infoglobal. (2025). *Integrated Maritime Monitoring & Surveillance System (IMSS) product description*.

IRMAPA. (2020). *Analisis sebab dan akibat (cause and effect analysis)*. https://irmapa.org/belajar-teknik-asesmen-risiko-analisis-sebab-dan-akibat-cause-and-effect-analysis-cea/

Kementerian Koordinator Bidang Kemaritiman Republik Indonesia. (2019). *Sistem pengawasan maritim Indonesia*.

Kementerian Pertahanan Republik Indonesia. (2015). *Buku putih pertahanan Indonesia*.

Napitupulu, T. A. (2022). *Model hubungan sebab-akibat dengan non-observable variables*. https://mmsi.binus.ac.id/files/2022/10/Model-Sebab-akibat-dengan-Non-observable-variables.pdf

NATO. (2016). *Fire control systems in modern weapon platforms*.

Ogorkiewicz, R. (2010). *Artillery: Modern developments*. Jane's Information Group.

Skolnik, M. (2008). *Radar handbook*. McGraw-Hill.

Stallings, W. (2013). *Data and computer communications*. Pearson.

Till, G. (2018). *Seapower: A guide for the twenty-first century*. Routledge.

United Nations. (1982). *United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS)*.

ISSN 2987-677x

Penyusunan *Master Plan* Penanganan Jalan Berbasis Survei Elevasi dan Identifikasi Kerusakan Perkerasan di Wilayah Peganden Manyar Kabupaten Gresik

Mohammad Fikri Ghozali[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ andrew_sby@ukwms.ac.id

Penyelenggaraan infrastruktur jalan memerlukan data kondisi eksisting yang akurat sebagai dasar dalam perencanaan penanganan dan pemeliharaan jalan. Kegiatan ini bertujuan menyusun master plan penanganan jalan berdasarkan hasil survei elevasi dan identifikasi kerusakan perkerasan pada ruas jalan di wilayah Peganden Manyar, Kabupaten Gresik. Metode yang digunakan meliputi observasi lapangan, pengukuran elevasi menggunakan theodolit, identifikasi jenis dan tingkat kerusakan jalan, serta pengolahan data menjadi gambar potongan melintang, potongan memanjang, dan master plan eksisting. Hasil survei menunjukkan adanya penurunan elevasi sepanjang ruas jalan dengan tingkat kerusakan yang bervariasi, mulai dari kerusakan ringan hingga berat. Kerusakan berat ditemukan pada beberapa *stationing* (STA) yang mengalami kerusakan paving disertai penurunan permukaan jalan sehingga memerlukan penanganan prioritas. Data hasil survei dan analisis kondisi jalan berhasil digunakan sebagai dasar penyusunan master plan penanganan jalan yang mendukung proses pengambilan keputusan teknis secara lebih tepat dan terukur. Hasil kerja tersebut menunjukkan bahwa penerapan metode survei teknis dan analisis kondisi perkerasan berperan penting dalam mendukung pengelolaan infrastruktur jalan yang efektif, aman, dan berkelanjutan.

Kata kunci: Survei Elevasi, Kerusakan Jalan, Theodolit, *Master Plan*, Bina Marga

Pendahuluan

Jalan merupakan salah satu infrastruktur transportasi yang memiliki peran penting dalam mendukung mobilitas masyarakat, distribusi barang dan jasa, serta pertumbuhan ekonomi daerah. Infrastruktur jalan yang memadai mampu meningkatkan konektivitas antarwilayah, memperlancar arus logistik, serta mendukung pemerataan pembangunan ekonomi dan sosial (Morlok, 1995). Kondisi jalan yang baik juga berkontribusi terhadap peningkatan aksesibilitas masyarakat dan efisiensi sistem transportasi secara keseluruhan (Tamin, 2008).

Kinerja jalan sangat dipengaruhi oleh kondisi geometrik, kualitas perkerasan, serta efektivitas sistem pemeliharaan yang diterapkan. Kerusakan jalan yang tidak ditangani secara tepat dapat menurunkan tingkat pelayanan jalan, meningkatkan biaya operasional kendaraan, dan mengurangi keselamatan pengguna jalan (Hardiyatmo, 2007). Oleh karena itu, diperlukan kegiatan evaluasi kondisi jalan secara berkala untuk memastikan fungsi pelayanan infrastruktur tetap berjalan dengan baik sesuai umur rencana yang ditetapkan.

Pengelolaan infrastruktur jalan pada era pembangunan berkelanjutan tidak hanya berorientasi pada penyediaan sarana transportasi, tetapi juga pada upaya menjaga keberlanjutan fungsi jalan melalui pemeliharaan yang efektif dan efisien. Konsep *sustainability* dalam pengelolaan jalan menekankan pemanfaatan sumber daya secara optimal, perpanjangan umur layanan infrastruktur, pengurangan dampak lingkungan akibat kerusakan jalan, serta peningkatan manfaat ekonomi dan sosial bagi masyarakat. Oleh karena itu, kegiatan evaluasi kondisi jalan dan penyusunan rencana penanganan berbasis data menjadi bagian penting dalam mendukung pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan.

Pengelolaan infrastruktur jalan memerlukan perencanaan yang didasarkan pada data kondisi eksisting yang akurat dan dapat dipertanggungjawabkan. Data tersebut meliputi informasi mengenai elevasi jalan, kondisi geometrik, serta tingkat kerusakan perkerasan yang terjadi pada setiap segmen jalan. Ketersediaan data yang lengkap akan membantu proses identifikasi permasalahan, penentuan prioritas penanganan, dan penyusunan program pemeliharaan yang lebih efektif (Bina Marga, 2010).

Survei lapangan merupakan salah satu tahapan penting dalam proses perencanaan dan pengelolaan infrastruktur jalan. Kegiatan survei bertujuan memperoleh data teknis yang menggambarkan kondisi aktual ruas jalan sehingga keputusan yang diambil dapat didasarkan pada kondisi nyata di lapangan. Penggunaan peralatan survei seperti theodolit memungkinkan pengukuran elevasi dilakukan secara akurat dan menghasilkan data yang dapat digunakan sebagai dasar penyusunan gambar teknis serta dokumen perencanaan jalan (Basuki, 2011).

 ISSN 2987-677x

Wilayah Peganden, Kecamatan Manyar, Kabupaten Gresik merupakan salah satu kawasan yang memerlukan evaluasi kondisi jalan sebagai dasar penyusunan rencana penanganan infrastruktur. Hasil observasi lapangan menunjukkan adanya variasi kondisi perkerasan dengan tingkat kerusakan yang berbeda pada beberapa segmen jalan. Kondisi tersebut memerlukan identifikasi yang sistematis agar prioritas penanganan dapat ditentukan secara tepat berdasarkan tingkat kerusakan dan kondisi geometrik jalan yang ada.

Kegiatan yang dilakukan dalam proyek ini meliputi survei elevasi jalan menggunakan theodolit, identifikasi jenis dan tingkat kerusakan perkerasan, analisis kondisi eksisting jalan, serta penyusunan gambar potongan melintang, potongan memanjang, dan master plan penanganan jalan di wilayah Peganden Manyar Kabupaten Gresik. Hasil kegiatan digunakan sebagai dasar dalam penyusunan rekomendasi teknis dan perencanaan penanganan jalan yang sesuai dengan kondisi lapangan. Pendekatan tersebut diharapkan dapat mendukung pengelolaan infrastruktur jalan yang lebih efektif, aman, dan berkelanjutan.

Metode

Kegiatan dilaksanakan di Dinas Pekerjaan Umum dan Tata Ruang Kabupaten Gresik Bidang Bina Marga selama periode Praktik Keinsinyuran. Metode yang digunakan meliputi observasi lapangan, survei teknis, pengukuran elevasi jalan, dokumentasi kondisi infrastruktur, serta asistensi dengan tenaga ahli dan konsultan. Observasi dilakukan pada pekerjaan jalan dan jembatan untuk memperoleh data kondisi eksisting, tingkat kerusakan, serta permasalahan teknis yang ditemukan di lapangan.

Pengukuran elevasi jalan dilakukan menggunakan theodolit dan peralatan survei lapangan sesuai prosedur survei dan pemetaan pada pekerjaan jalan. Data hasil pengukuran digunakan untuk menyusun gambar potongan melintang, potongan memanjang, serta master plan eksisting sebagai dasar perencanaan penanganan jalan. Evaluasi kondisi jalan dan jembatan dilakukan berdasarkan hasil observasi visual, pengukuran lapangan, serta data teknis yang tersedia.

Analisis data dilakukan secara deskriptif dengan membandingkan kondisi eksisting terhadap standar teknis yang berlaku pada bidang bina marga. Penyusunan rekomendasi teknis mengacu pada hasil survei lapangan, hasil asistensi dengan tenaga ahli, serta pedoman teknis pekerjaan jalan dan jembatan yang digunakan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga.

Hasil Kerja

Analisis Dampak Abrasi Sungai terhadap Stabilitas Jembatan di Wilayah Bawean

Hasil observasi dan asistensi teknis pada Jembatan Bawean menunjukkan adanya indikasi abrasi sungai pada area sekitar pondasi dan bangunan pendekat jembatan. Hasil pembahasan antara tenaga ahli Bidang Bina Marga dan pihak konsultan menghasilkan rekomendasi pembangunan dinding penahan tanah sebelum jembatan serta penguatan pondasi untuk meningkatkan stabilitas struktur. Rekomendasi tersebut diberikan karena terdapat potensi pengikisan tanah yang dapat mengurangi daya dukung pondasi apabila tidak segera ditangani.

Fenomena gerusan di sekitar pilar dan pondasi jembatan merupakan salah satu permasalahan yang sering terjadi pada infrastruktur yang berada di daerah aliran sungai. Penelitian (Kasmawati et al., 2021) menunjukkan bahwa perubahan morfologi sungai dan keberadaan pilar jembatan dapat memengaruhi pola aliran sehingga menyebabkan gerusan lokal di sekitar struktur jembatan. Kedalaman gerusan akan semakin meningkat apabila kecepatan aliran sungai bertambah sehingga berpotensi mengganggu kestabilan struktur bawah jembatan.

Temuan lapangan pada Jembatan Bawean juga menunjukkan adanya potensi penurunan kestabilan tanah di sekitar pondasi akibat proses abrasi yang berlangsung secara terus-menerus. Hasil penelitian (Setiati et al., 2019) menjelaskan bahwa gerusan merupakan salah satu penyebab utama kerusakan struktur jembatan, terutama pada bagian pilar dan pondasi. Penelitian tersebut menemukan bahwa sebagian besar kegagalan jembatan akibat banjir berkaitan dengan terjadinya gerusan pada struktur bawah jembatan.

Berdasarkan hasil evaluasi teknis, pembangunan dinding penahan tanah dan penguatan pondasi menjadi alternatif penanganan yang sesuai untuk mengurangi risiko kerusakan yang lebih besar. Penelitian (Allo & Verucha, 2025) menyebutkan bahwa gerusan lokal di sekitar pilar jembatan merupakan salah satu penyebab utama kegagalan struktur secara global. Penelitian tersebut juga merekomendasikan upaya mitigasi melalui penguatan struktur, perlindungan tebing sungai, serta pengendalian aliran untuk meningkatkan keamanan jembatan.

Peningkatan Kompetensi Gambar Teknik pada Bidang Bina Marga

Gambar teknik merupakan media komunikasi utama dalam pekerjaan konstruksi karena seluruh informasi perencanaan, dimensi, spesifikasi, dan detail pelaksanaan pekerjaan disajikan melalui gambar kerja. Kemampuan membaca dan menginterpretasikan gambar teknik menjadi kompetensi dasar yang harus dimiliki oleh tenaga teknik maupun calon insinyur. Pemahaman yang baik terhadap gambar teknik akan membantu proses pelaksanaan pekerjaan di lapangan serta meminimalkan kesalahan interpretasi dalam kegiatan konstruksi (Telaumbanua & Zalukhu, 2026).

Kegiatan peningkatan kompetensi gambar teknik dilaksanakan melalui sosialisasi dan pelatihan yang diberikan oleh tenaga ahli Bidang Bina Marga Dinas

 ISSN 2987-677x

Pekerjaan Umum dan Tata Ruang Kabupaten Gresik. Materi yang diberikan meliputi pengenalan standar gambar jalan, gambar potongan melintang, gambar potongan memanjang, master plan jalan, gambar struktur jembatan, serta detail pembesian jembatan. Kegiatan dilaksanakan secara bertahap melalui penjelasan teori, praktik membaca gambar, dan latihan penyusunan gambar berdasarkan kondisi eksisting di lapangan.

Pelaksanaan pelatihan diawali dengan pengenalan standar gambar kerja jalan yang digunakan dalam pekerjaan bina marga. Peserta diberikan pemahaman mengenai fungsi setiap komponen gambar, simbol teknis, notasi elevasi, serta hubungan antara gambar perencanaan dan kondisi aktual di lapangan. Tahap tersebut menjadi dasar untuk memahami proses penyusunan dokumen teknis yang digunakan dalam pekerjaan jalan dan jembatan.

Tahap berikutnya difokuskan pada latihan membaca dan menyusun gambar potongan melintang, potongan memanjang, dan master plan jalan. Kegiatan tersebut bertujuan meningkatkan kemampuan peserta dalam menerjemahkan data survei menjadi informasi visual yang mudah dipahami. Kemampuan tersebut sangat penting karena sebagian besar keputusan teknis pada pekerjaan jalan didasarkan pada hasil interpretasi gambar kerja.

Hasil evaluasi menunjukkan adanya peningkatan pemahaman peserta setelah mengikuti kegiatan sosialisasi dan pelatihan. Kemampuan mengaplikasikan hasil survei menjadi gambar meningkat dari 35% menjadi 82%, pemahaman terhadap kerusakan jalan meningkat dari 40% menjadi 78%, kemampuan membaca potongan gambar meningkat dari 38% menjadi 80%, dan kemampuan interpretasi elevasi meningkat dari 35% menjadi 76%. Peningkatan pada seluruh indikator menunjukkan bahwa proses pembelajaran yang dilakukan mampu meningkatkan kompetensi teknis peserta secara signifikan.

Hasil tersebut sejalan dengan penelitian (Zamzani, 2026) yang menunjukkan bahwa kemampuan membaca gambar dan kemampuan menggambar berpengaruh signifikan terhadap kesiapan peserta dalam melaksanakan pekerjaan lapangan pada bidang konstruksi. Penguasaan gambar teknik tidak hanya mendukung kemampuan teknis, tetapi juga meningkatkan efektivitas komunikasi dan pemahaman terhadap pekerjaan konstruksi yang akan dilaksanakan. Temuan tersebut juga didukung oleh (Fistcar et al., 2023)) yang menyatakan bahwa pelatihan dan pembelajaran gambar konstruksi mampu meningkatkan kemampuan peserta dalam memahami serta menghasilkan gambar teknik yang sesuai dengan standar pekerjaan konstruksi. Pendekatan pembelajaran yang mengombinasikan teori dan praktik terbukti memberikan peningkatan kompetensi yang lebih baik dibandingkan metode pembelajaran konvensional. Rahardianto (2024) menjelaskan bahwa kemampuan interpretasi gambar teknik memiliki peran penting dalam mendukung pengambilan keputusan dan pemahaman informasi teknis pada pekerjaan konstruksi. Peningkatan kompetensi gambar teknik pada bidang bina marga memberikan manfaat yang besar karena sebagian besar proses perencanaan, pelaksanaan, dan pengawasan pekerjaan jalan serta jembatan bergantung pada dokumen gambar kerja. Kompetensi tersebut menjadi salah satu kemampuan penting yang harus dimiliki oleh seorang insinyur dalam mendukung pembangunan infrastruktur yang aman, efektif, dan sesuai standar.

Survei Elevasi dan Identifikasi Kerusakan Jalan di Wilayah Peganden Manyar

Kegiatan survei dilaksanakan di wilayah Peganden, Kecamatan Manyar, Kabupaten Gresik menggunakan theodolit untuk memperoleh data elevasi jalan pada setiap titik stationing (STA). Pengukuran dilakukan mulai dari STA 0+000 hingga STA 0+150 dengan interval tertentu untuk memperoleh profil elevasi jalan secara rinci. Selain pengukuran elevasi, dilakukan pula observasi visual untuk mengidentifikasi jenis kerusakan dan menentukan tingkat kerusakan perkerasan yang terjadi pada ruas jalan tersebut.

Hasil survei menunjukkan bahwa elevasi jalan mengalami penurunan bertahap dari 20,191 m pada STA 0+000 menjadi 19,370 m pada STA 0+150. Perbedaan elevasi tersebut menunjukkan adanya kemiringan memanjang jalan yang perlu diperhatikan dalam perencanaan sistem drainase dan perbaikan geometrik jalan. Data elevasi yang akurat sangat diperlukan untuk mendukung penyusunan gambar potongan memanjang dan perencanaan teknis penanganan jalan.

Berdasarkan hasil observasi lapangan, kerusakan jalan didominasi oleh kerusakan paving dengan tingkat kerusakan yang bervariasi. Kerusakan ringan ditemukan pada STA 0+000 dan STA 0+075, sedangkan kerusakan sedang ditemukan pada STA 0+025, STA 0+050, dan STA 0+100. Kerusakan berat ditemukan pada STA 0+125 dan STA 0+150 yang ditandai dengan kerusakan paving yang parah serta penurunan permukaan jalan yang cukup signifikan.

Kerusakan yang disertai penurunan permukaan jalan mengindikasikan adanya permasalahan pada lapisan pondasi maupun tanah dasar yang mendukung struktur perkerasan. Kondisi tersebut dapat menyebabkan distribusi beban kendaraan menjadi tidak merata sehingga mempercepat perkembangan kerusakan jalan. Apabila tidak segera dilakukan penanganan, kerusakan berpotensi berkembang menjadi lebih luas dan mengurangi tingkat pelayanan jalan bagi pengguna.

Hasil temuan lapangan sejalan dengan penelitian Sari dan Saleh (2023) yang menyatakan bahwa kerusakan perkerasan jalan umumnya dipengaruhi oleh kondisi drainase, beban lalu lintas, serta penurunan

 ISSN 2987-677x

kualitas lapisan perkerasan. Evaluasi kondisi jalan secara berkala diperlukan untuk mengidentifikasi kerusakan sejak dini sehingga penanganan dapat dilakukan sebelum kerusakan berkembang menjadi lebih berat. Pendekatan tersebut dapat meningkatkan efektivitas pemeliharaan dan mengurangi biaya rehabilitasi jalan pada masa mendatang.

Data elevasi yang diperoleh dari hasil survei kemudian digunakan sebagai dasar penyusunan gambar potongan melintang, potongan memanjang, dan master plan eksisting. Proses pengolahan data memungkinkan identifikasi titik-titik kritis yang memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan penanganan jalan. Hasil analisis juga memberikan gambaran mengenai hubungan antara kondisi geometrik jalan dan tingkat kerusakan yang terjadi pada setiap STA.

Kegiatan survei elevasi dan identifikasi kerusakan jalan di wilayah Peganden Manyar menghasilkan data teknis yang digunakan sebagai dasar penyusunan gambar eksisting dan master plan penanganan jalan. Hasil pekerjaan tersebut memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi geometrik dan tingkat kerusakan jalan sehingga proses perencanaan dapat dilakukan secara lebih tepat. Dari perspektif profesi insinyur, kegiatan survei dan analisis kondisi jalan merupakan bagian penting dalam mendukung penyediaan infrastruktur transportasi yang aman, andal, dan berkelanjutan.

Penyusunan Gambar Potongan Eksisting dan Master Plan Penanganan Jalan

Penyusunan gambar potongan eksisting dan master plan merupakan tahapan lanjutan setelah pelaksanaan survei elevasi dan identifikasi kerusakan jalan. Dokumen tersebut berfungsi sebagai media visual yang menggambarkan kondisi aktual ruas jalan secara rinci sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam proses analisis dan perencanaan penanganan infrastruktur. Ketersediaan data geometrik yang akurat menjadi faktor penting dalam menghasilkan dokumen perencanaan yang sesuai dengan kondisi lapangan (Yanto, 2022).

Proses penyusunan gambar diawali dengan pengolahan data elevasi hasil pengukuran menggunakan theodolit pada setiap titik STA. Data tersebut kemudian digunakan untuk menyusun gambar potongan melintang dan potongan memanjang jalan yang menggambarkan profil eksisting ruas jalan di wilayah Peganden, Kecamatan Manyar, Kabupaten Gresik. Potongan memanjang memberikan informasi mengenai perubahan elevasi sepanjang trase jalan, sedangkan potongan melintang digunakan untuk menggambarkan kondisi penampang jalan pada setiap STA yang diamati (Putri, 2021).

Hasil pengolahan data menunjukkan adanya perubahan elevasi dari STA 0+000 hingga STA 0+150 yang memengaruhi kondisi geometrik jalan. Informasi elevasi tersebut menjadi dasar dalam penyusunan profil memanjang jalan sehingga dapat diketahui lokasi-lokasi yang mengalami penurunan permukaan maupun perubahan kemiringan jalan. Data elevasi juga berperan penting dalam evaluasi sistem drainase karena perbedaan elevasi akan memengaruhi pola aliran air pada badan jalan. Perencanaan geometrik jalan membutuhkan data topografi yang akurat agar desain yang dihasilkan memenuhi aspek keselamatan dan kenyamanan pengguna jalan (Yanto, 2022).

Penyusunan gambar potongan melintang dilakukan untuk menggambarkan kondisi lebar perkerasan, bentuk penampang jalan, serta posisi area yang mengalami kerusakan. Hasil gambar menunjukkan bahwa beberapa segmen jalan mengalami penurunan permukaan yang berasosiasi dengan kerusakan paving pada tingkat sedang hingga berat. Informasi tersebut digunakan untuk mengidentifikasi kebutuhan perbaikan struktur perkerasan dan menentukan prioritas penanganan pada segmen yang mengalami kerusakan paling signifikan.

Setelah gambar potongan eksisting selesai disusun, tahap berikutnya adalah penyusunan master plan jalan. Master plan memuat informasi mengenai kondisi geometrik jalan, lokasi kerusakan, profil elevasi, serta gambaran umum kebutuhan penanganan pada ruas jalan yang ditinjau. Penyusunan dokumen tersebut bertujuan menyediakan dasar teknis bagi proses perencanaan perbaikan maupun peningkatan jalan pada masa mendatang. Penggunaan data survei lapangan dan pengolahan data geometrik menjadi komponen utama dalam menghasilkan dokumen perencanaan yang dapat diimplementasikan secara efektif (Balqis et al., 2023).

Pengolahan data elevasi menjadi gambar potongan memanjang dan potongan melintang juga memudahkan proses analisis kebutuhan galian dan timbunan apabila dilakukan pekerjaan peningkatan jalan. Penggunaan data topografi dan penggambaran profil jalan memungkinkan perencana mengevaluasi kondisi trase secara lebih rinci sehingga potensi permasalahan teknis dapat diidentifikasi sejak tahap perencanaan. Pendekatan tersebut banyak digunakan dalam perencanaan geometrik jalan berbasis Civil 3D karena mampu meningkatkan akurasi desain dan efisiensi pekerjaan (Pass et al., 2021).

Hasil penyusunan gambar eksisting dan master plan menunjukkan bahwa data survei elevasi memiliki peran penting dalam mendukung proses pengambilan keputusan teknis. Informasi yang dihasilkan tidak hanya menggambarkan kondisi jalan saat ini, tetapi juga menjadi dasar dalam penyusunan alternatif penanganan yang lebih efektif dan tepat sasaran. Dokumen tersebut selanjutnya dapat digunakan sebagai acuan dalam perencanaan rehabilitasi maupun peningkatan jalan sesuai kebutuhan infrastruktur di wilayah Peganden Manyar.

Dari perspektif profesi insinyur, kemampuan mengolah data survei menjadi gambar teknik dan

 ISSN 2987-677x

master plan merupakan bagian dari kompetensi pengelolaan informasi teknik yang sangat penting dalam bidang bina marga. Proses tersebut menuntut ketelitian dalam pengumpulan data, kemampuan analisis geometrik, serta pemahaman terhadap standar perencanaan jalan yang berlaku. Hasil pekerjaan yang disusun berdasarkan data lapangan yang akurat akan meningkatkan kualitas perencanaan dan mendukung penyelenggaraan infrastruktur jalan yang aman, efektif, dan berkelanjutan.

Kesimpulan

Hasil evaluasi abrasi sungai pada Jembatan Bawean menunjukkan bahwa gerusan pada area sekitar pondasi berpotensi menurunkan stabilitas struktur sehingga diperlukan upaya mitigasi berupa penguatan pondasi dan pembangunan dinding penahan tanah. Kegiatan sosialisasi gambar teknik juga berhasil meningkatkan kemampuan peserta dalam membaca gambar konstruksi, memahami kerusakan jalan, serta menginterpretasikan data elevasi yang diperlukan dalam pekerjaan bidang bina marga.

Survei elevasi dan identifikasi kerusakan jalan di wilayah Peganden Manyar menghasilkan data teknis yang menggambarkan kondisi geometrik jalan dan tingkat kerusakan perkerasan pada setiap STA. Data tersebut kemudian digunakan sebagai dasar penyusunan gambar potongan melintang, potongan memanjang, dan master plan penanganan jalan yang dapat mendukung proses pengambilan keputusan teknis secara lebih akurat. Hasil pekerjaan menunjukkan bahwa pemanfaatan data lapangan yang akurat mampu meningkatkan kualitas perencanaan dan efektivitas penanganan infrastruktur jalan.

Pelaksanaan kegiatan juga menunjukkan pentingnya penerapan kompetensi profesional yang mencakup kemampuan teknis, pengelolaan informasi teknik, komunikasi profesional, etika profesi, serta keselamatan dan kesehatan kerja. Seluruh kompetensi tersebut saling mendukung dalam menghasilkan solusi yang tepat terhadap berbagai permasalahan infrastruktur yang ditemukan di lapangan. Pengalaman yang diperoleh selama kegiatan ini memperkuat pemahaman mengenai peran insinyur dalam mendukung pembangunan infrastruktur yang aman, andal, dan berkelanjutan.

Pengembangan kegiatan pada masa mendatang dapat dilakukan melalui pemanfaatan teknologi survei yang lebih modern, peningkatan penggunaan perangkat lunak perencanaan infrastruktur, serta penerapan sistem pengelolaan aset jalan dan jembatan berbasis data digital. Pendekatan tersebut diharapkan mampu meningkatkan akurasi perencanaan, efektivitas pemeliharaan, dan kualitas pengambilan keputusan dalam pengelolaan infrastruktur transportasi.

Referensi

Allo, M. B., & Verucha, N. V. (2025). Analisis upaya mitigasi dampak erosi aliran sungai terhadap struktur pilar jembatan. *Paulus Civil Engineering Journal*, *7*(3), 381–391.

Basuki, S. (2011). *Ilmu Ukur Tanah (Cetakan ke2)*. Gadjah Mada University Press.

Bina Marga. (2010). Spesifikasi umum 2018. *Direktorat Jendral Bina Marga*, *2010*.

Fistcar, W. A., Rohman, A., Zubet, M. A., & Astuti, M. D. (2023). Peningkatan Keterampilan penggunaan program bantu gambar teknik autocad bagi siswa SMK Muhammadiyah 3 Pucang Gading Demak. *Jurnal Pasopati*, *5*(3).

Hardiyatmo, H. C. (2007). *Pemeliharaan jalan raya*. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.

Kasmawati, K., Ali, M. Y., Pradana, D., & Khumairah, N. A. (2021). Analisis gerusan di sekitar pilar jempatan sungai pappa'akibat perubahan kecepatan aliran. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur Hexagon*, *6*(2), 58–67.

Morlok, E. K. (1995). Pengantar Teknik Perencanaan Transportasi. *Jakarta: Penerbit Erlangga*.

Rahardianto, T. (2024). Integrasi building information modeling (BIM) terhadap Kesiapan lulusan teknik sipil menghadapi transformasi digital di industri konstruksi. *Journal of Practice Learning and Educational Development*, *4*(4), 343–349.

Setiati, N. R., Guntorojati, I., & Kurniawati, E. (2019). Analisis penanganan dampak bahaya gerusan aliran sungai pada struktur pilar jembatan. *Jurnal Jalan Jembatan*, *36*(1), 41–53.

Tamin, O. Z. (2008). *Perencanaan, pemodelan, & rekayasa transportasi*. ITB Press.

Telaumbanua, A., & Zalukhu, R. R. (2026). Peran pembelajaran berbasis CAD terhadap penguasaan kompetensi gambar teknik di pendidikan vokasi: Tinjauan literatur (2021–2025). *Jurnal Pengabdian Masyarakat dan Riset Pendidikan*, *4*(3), 20613–20627.

Zamzani, M. D. I. (2026). Pengaruh soft skills, kemampuan menggambar, dan kemampuan membaca gambar terhadap kesiapan praktik kerja lapangan siswa SMK. *Journal of Vocational and Technical Education (JVTE)*, *8*(1), 44–49.

 ISSN 2987-677x

Peran Sinergis *Silica Fume* dan *Plasticiser* dalam Meningkatkan Mutu Tekan Beton

Ghea Alfa Dewangga[1] Rasional Sitepu[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ ghea.dewangga@gmail.com

✉ rasional@ukwms.ac.id

Beton mutu tinggi dengan fc' ≥ 35 MPa menjadi kebutuhan mendesak dalam konstruksi struktural modern, namun pencapaiannya kerap terhambat oleh paradoks antara tuntutan kekuatan dan kemudahan pengerjaan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh *silica fume* dan *plasticiser* secara individual maupun kombinasi terhadap kuat tekan dan *workability* beton, sekaligus membandingkan performa beton normal dengan beton ber-*admixture* sebagai dasar rekomendasi teknis. Empat variasi campuran diuji secara eksperimental: BN (kontrol), BS (*silica fume* 8%), BP (*plasticiser* 1%), dan BSP (kombinasi keduanya), dengan pengujian kuat tekan pada umur 7, 14, dan 28 hari sesuai SNI 1974:2011 serta pengujian slump sesuai SNI 1972:2008. Variasi BSP menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 52 MPa pada 28 hari dan *slump* 10 cm, melampaui target fc' ≥ 35 MPa sebesar 48,6% sekaligus mempertahankan *workability* yang memadai. Temuan ini menegaskan efek komplementer antara *admixture* mineral dan kimia, dan merekomendasikan kombinasi keduanya sebagai solusi optimal pada pekerjaan konstruksi beton mutu tinggi.

Kata kunci: *silica fume; plasticiser*; mutu beton; kuat tekan; *workability*

Pendahuluan

Pertumbuhan konstruksi vertikal dan infrastruktur berskala besar di Indonesia dalam satu dekade terakhir telah mendorong kebutuhan beton mutu tinggi yang terus meningkat secara signifikan. Data Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) mencatat bahwa lebih dari 60% proyek infrastruktur nasional yang berjalan saat ini mensyaratkan spesifikasi beton struktural dengan kuat tekan minimum di atas 30 MPa, bahkan mencapai 50–80 MPa untuk elemen kritis seperti tiang pancang jembatan, kolom gedung super tinggi, dan struktur bendungan. Tuntutan ini tidak semata-mata berdimensi kekuatan, melainkan juga mencakup durabilitas jangka panjang, impermeabilitas, dan kemudahan pengerjaan di lapangan yang kerap menjadi variabel yang saling bertolak belakang dalam praktik produksi beton mutu tinggi.

Persoalan mendasar yang dihadapi oleh perencana dan pelaksana konstruksi terletak pada hubungan terbalik antara rasio air-semen (w/c) dan kuat tekan beton. Neville (2011) menegaskan bahwa setiap penurunan w/c yang diperlukan untuk mencapai kekuatan target secara langsung mengorbankan fluiditas campuran beton segar, sehingga pada titik tertentu campuran tidak lagi dapat dikerjakan secara praktis tanpa alat pemadatan khusus. Di lapangan, kondisi ini sering menjadi sumber kompromi teknis yang tidak semestinya: operator lapangan secara sepihak menambahkan air untuk memulihkan *workability*, yang pada akhirnya merusak desain w/c yang telah direncanakan secara cermat oleh perencana. Mulyono (2005) mencatat bahwa penyimpangan w/c aktual terhadap rancangan merupakan salah satu penyebab utama tidak tercapainya mutu beton yang disyaratkan pada proyek-proyek konstruksi di Indonesia.

Intervensi melalui penggunaan bahan tambah (*admixture*) mineral dan kimia telah berkembang menjadi pendekatan standar dalam teknologi beton mutu tinggi global. *Silica fume*, sebagai *admixture* mineral *pozzolan*, dan *plasticiser/superplasticiser*, sebagai *admixture* kimia pereduksi air, secara teoretis mampu menjawab paradoks tersebut melalui mekanisme yang saling melengkapi. Berbagai penelitian terdahulu telah mengkonfirmasi efektivitas keduanya secara terpisah maupun bersama. Hamada et al. (2023) melaporkan peningkatan kuat tekan rata-rata 10–30% pada beton ber-*silica fume* dengan penurunan permeabilitas yang signifikan. Prayuda dan Saleh (2018) membuktikan bahwa kombinasi *superplasticiser* dan silica fume menghasilkan kuat tekan awal tinggi melampaui target rancangan. Pala'langan et al. (2024) mengonfirmasi peningkatan signifikan pada kuat tekan dan kuat lentur beton ketika *silica fume* digunakan sebagai substitusi parsial semen bersama *superplasticiser*.

Namun demikian, kajian literatur secara kritis mengidentifikasi tiga celah penelitian yang belum terjawab secara memadai. Pertama, sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada salah satu variabel secara *isolated* kuat tekan saja atau *workability* saja tanpa mengevaluasi keduanya secara terpadu sebagai indikator mutu beton yang holistik. Kedua, perbandingan sistematis antara beton normal dan beton ber-*admixture* dengan kuantifikasi peningkatan pada setiap umur pengujian masih jarang disajikan dalam format yang mudah digunakan sebagai acuan praktis oleh pelaksana konstruksi. Ketiga, rekomendasi teknis berbasis data pengujian yang spesifik dan terukur untuk pekerjaan konstruksi umum di Indonesia bukan sekadar kesimpulan kualitatif masih sangat terbatas dalam literatur nasional.

 ISSN 2987-677x

Ketiga kesenjangan inilah yang menjadi motivasi utama penelitian ini.

Novelty penelitian ini terletak pada pendekatan evaluasi terpadu yang secara bersamaan mengkuantifikasi dampak *silica fume* dan *plasticiser* terhadap dua parameter mutu utama beton kekuatan dan *workability* melalui empat variasi campuran yang dirancang untuk mengisolasi kontribusi masing-masing *admixture* secara individual dan sinergis, disertai rekomendasi teknis operasional yang dapat langsung diterapkan pada pekerjaan konstruksi beton mutu tinggi.

Metode

Penelitian ini menggunakan desain eksperimental kuantitatif dengan rancangan perbandingan empat kelompok perlakuan yang disusun secara faktorial sederhana. Variabel bebas terdiri dari dua faktor: proporsi *silica fume* (0% dan 8% terhadap berat semen) dan dosis *plasticiser* (0% dan 1% terhadap berat semen), menghasilkan empat kombinasi perlakuan yang mewakili kondisi tanpa *admixture* hingga penggunaan penuh secara simultan. Variabel terikat mencakup nilai *slump* (cm) sebagai indikator *workability* dan kuat tekan beton (MPa) pada umur 7, 14, dan 28 hari sebagai indikator performa mekanis. Variabel kontrol yang dijaga konstan meliputi jenis semen Portland Tipe I (SNI 2049:2015), jenis dan gradasi agregat, prosedur pengadukan, dan metode perawatan (*curing*).

Empat variasi campuran yang diuji adalah: BN beton normal tanpa *admixture* dengan w/c = 0,50 sebagai kelompok kontrol; BS beton dengan silica fume 8% tanpa plasticiser, w/c = 0,50; BP beton tanpa silica fume dengan plasticiser 1%, w/c = 0,40; dan BSP beton dengan kombinasi silica fume 8% dan plasticiser 1%, w/c = 0,40. Perbedaan w/c antara kelompok tanpa dan dengan plasticiser (0,50 vs 0,40) dirancang secara eksplisit untuk merepresentasikan manfaat pengurangan air sebesar 20% yang dimungkinkan oleh mekanisme dispersi plasticiser berbasis *polycarboxylate ether* (PCE), sesuai klasifikasi ASTM C494/C494M-19 Tipe F. Silica fume yang digunakan memenuhi persyaratan kandungan $SiO_2 \geq 85\%$ sesuai ASTM C1240-20.

Benda uji berbentuk silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm, dengan tiga buah per variasi per umur pengujian, menghasilkan total 36 benda uji. Pengujian *workability* dilakukan melalui uji *slump* kerucut Abrams segera setelah pengadukan (≤ 5 menit) sesuai SNI 1972:2008. Pengujian kuat tekan menggunakan *compression testing machine* (CTM) berkapasitas 2.000 kN dengan laju pembebanan 0,15–0,35 MPa/detik sesuai SNI 1974:2011. Perawatan dilakukan melalui perendaman dalam air pada suhu 23°C ± 2°C hingga umur pengujian. Analisis data dilakukan secara deskriptif komparatif, meliputi nilai rata-rata kuat tekan, persentase peningkatan terhadap BN, dan evaluasi kesesuaian dengan persyaratan fc' ≥ 35 MPa sesuai SNI 2847:2019.

Hasil Kerja

Pengaruh *Admixture* terhadap Nilai Slump

Hasil pengujian *slump* pada keempat variasi campuran menunjukkan pola yang mencerminkan mekanisme fisikokimia masing-masing *admixture* secara konsisten. BN menghasilkan nilai *slump* 7 cm yang dikategorikan cukup kaku dan dapat dikerjakan untuk sebagian besar pekerjaan konstruksi umum. Penambahan *silica fume* pada BS menurunkan *slump* menjadi 5 cm penurunan sebesar 28,6% yang secara langsung dapat dijelaskan oleh karakteristik luas permukaan spesifik silica fume yang sangat besar (15.000–25.000 m^2/kg), jauh melampaui semen Portland biasa (300–400 m^2/kg). Luas permukaan yang ekstrem ini menyerap sebagian besar air bebas dalam campuran untuk pembasahan permukaan partikel, sehingga air yang tersedia sebagai media pelumas berkurang secara proporsional (ASTM C1240-20; Ibrahim et al., 2016). Nilai slump 5 cm pada BS menempatkan campuran pada batas bawah rentang yang dapat dikerjakan, dan berpotensi menimbulkan kendala serius dalam pengecoran elemen struktural dengan kepadatan tulangan tinggi atau akses terbatas.

Kontras yang sangat tajam terlihat pada variasi BP yang menghasilkan *slump* 12 cm meningkat 71,4% dibandingkan BN meskipun w/c justru diturunkan dari 0,50 menjadi 0,40. Fenomena ini secara eksperimental memvalidasi mekanisme dispersi elektrostatik dan sterik yang ditimbulkan oleh rantai polimer PCE *superplasticiser*: partikel semen yang semula beraglomerasi dan memerangkap air dalam strukturnya terdispersi secara merata, membebaskan air yang sebelumnya terperangkap untuk berfungsi efektif sebagai media pelumas (Mehta & Monteiro, 2014). Temuan ini menegaskan bahwa *plasticiser* tidak sekadar menambah fluiditas campuran, melainkan secara fundamental mengubah reologi campuran beton segar dengan cara yang tidak dapat dicapai melalui penambahan air biasa.

Variasi BSP menghasilkan *slump* 10 cm nilai yang lebih rendah 2 cm dibandingkan BP namun masih 3 cm di atas BN. Penurunan slump BSP relatif terhadap BP mencerminkan efek absorpsi air oleh *silica fume* yang tetap bekerja meskipun *plasticiser* hadir, namun besaran penurunan yang hanya 16,7% menunjukkan bahwa *plasticiser* berhasil mengkompensasi sebagian besar penurunan *workability* yang diakibatkan oleh *silica fume*. Nilai 10 cm ini berada dalam rentang optimal yang direkomendasikan untuk beton mutu tinggi pada pekerjaan konstruksi umum, menunjukkan bahwa kombinasi keduanya tidak mengorbankan kemudahan pengerjaan demi pencapaian kekuatan sebuah keseimbangan teknis yang kritis bagi pelaksana lapangan.

 ISSN 2987-677x

Perbandingan Kuat Tekan

Rekapitulasi lengkap hasil pengujian kuat tekan dan slump seluruh variasi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Slump dan Kuat Tekan Seluruh Variasi Campuran Beton

Variasi	w/c	*Slump* (cm)	fc'7 hari (MPa)	fc'14 hari (MPa)	fc'28 hari (MPa)	Δ vs BN (28 hr)
BN	0,50	7	25	32	38	
BS	0,50	5	28	36	44	+15,8%
BP	0,40	12	30	38	46	+21,1%
BSP	0,40	10	34	42	52	+36,8%

Sumber : diolah peneliti (2026)

Beton normal (BN) mencapai kuat tekan 38 MPa pada umur 28 hari, yang secara teknis telah melampaui threshold fc' ≥ 35 MPa yang disyaratkan SNI 2847:2019. Namun demikian, *margin* keamanan yang hanya 8,6% terhadap target minimum ini terlalu tipis untuk mengakomodasi variabilitas mutu yang tidak terhindarkan dalam kondisi pelaksanaan lapangan yang nyata, di mana fluktuasi suhu, kelembaban, dan konsistensi pengadukan dapat menurunkan kuat tekan aktual secara signifikan. Hal ini menegaskan bahwa beton normal tanpa *admixture*, meskipun secara nominal memenuhi syarat, tidak memberikan jaminan mutu yang memadai untuk konstruksi beton mutu tinggi yang sesungguhnya.

Variasi BS memperlihatkan pola peningkatan yang semakin progresif: +12,0% pada 7 hari, +12,5% pada 14 hari, dan +15,8% pada 28 hari. Akselerasi peningkatan yang konsisten ini merupakan sidik jari khas dari reaksi *pozzolan silica fume* yang berjalan secara sekunder dan berlanjut setelah hidrasi primer semen terjadi. SiO_2 amorf bereaksi dengan $Ca(OH)_2$ yang dihasilkan dari hidrasi C_3S dan C_2S semen, membentuk C-S-H sekunder yang lebih padat dan mengisi ruang pori kapiler yang sebelumnya ditempati oleh $Ca(OH)_2$ fase yang secara struktural lemah dan mudah terlarut dalam lingkungan agresif (Mehta & Monteiro, 2014). Temuan ini konsisten dengan Arman et al. (2024) dan Hamada et al. (2023) yang melaporkan kontribusi *silica fume* terhadap kuat tekan semakin dominan pada umur yang lebih lanjut, namun dalam penelitian ini besaran peningkatannya (15,8%) berada pada batas bawah rentang yang dilaporkan Hamada et al. (10–30%), kemungkinan disebabkan oleh perbedaan kondisi material dan prosedur perawatan.

Variasi BP menghasilkan peningkatan kuat tekan 28 hari yang lebih besar dibandingkan BS (21,1% vs 15,8%), sebuah temuan yang patut mendapat perhatian analitis. Secara mekanistik, kontribusi utama BP terhadap kuat tekan berasal dari penurunan w/c yang cukup signifikan dari 0,50 menjadi 0,40, atau pengurangan 20% yang secara langsung mengurangi volume pori kapiler dalam pasta semen yang mengeras sesuai persamaan porositas *powers*. Pada umur 7 hari, peningkatan BP terhadap BN (+20,0%) bahkan lebih besar dari peningkatan BS (+12,0%), yang secara eksplisit menunjukkan bahwa efek penurunan w/c bekerja segera sejak tahap awal pengerasan, sementara reaksi *pozzolan silica fume* pada BS baru mencapai kontribusi maksimalnya pada umur yang lebih panjang. Temuan ini menambahkan nuansa penting pada pemahaman mekanistik yang sering disederhanakan dalam literatur: *plasticiser* bukan sekadar agen reologi, melainkan juga secara substansial berkontribusi pada kekuatan mekanis beton melalui jalur pengurangan w/c.

Variasi BSP secara konsisten mengungguli seluruh variasi lain pada setiap umur pengujian, mencapai 34 MPa pada 7 hari dan 52 MPa pada 28 hari. Peningkatan BSP sebesar 36,8% terhadap BN pada 28 hari melampaui target fc' ≥ 35 MPa sebesar 48,6%, memberikan margin keamanan yang jauh lebih substansial 17 MPa di atas nilai minimum yang sangat penting untuk mengakomodasi variabilitas lapangan. Perbandingan lintas variasi mengungkapkan bahwa peningkatan kuat tekan BSP (14 MPa di atas BN) lebih besar dari penjumlahan aritmetika peningkatan BS (6 MPa) dan BP (8 MPa) secara terpisah jika dihitung dari basis BN yang sama sebuah indikasi efek interaksi positif antara kedua *admixture*. *Silica fume* memaksimalkan kerapatan matriks melalui mekanisme *pozzolan* dan pengisian mikro, sementara w/c yang lebih rendah dimungkinkan oleh *plasticiser* memperkecil volume pori kapiler awal, sehingga kedua mekanisme bekerja pada level struktural yang berbeda namun saling memperkuat (Prayuda & Saleh, 2018; Slat et al., 2020; Pala'langan et al., 2024).

Implikasi terhadap Praktik Konstruksi

Dari perspektif praktis, temuan penelitian ini memiliki implikasi langsung yang dapat diterjemahkan ke dalam keputusan teknis di lapangan. Pertama, penggunaan *silica fume* tanpa *plasticiser* (BS) meskipun meningkatkan kekuatan secara signifikan menghasilkan *workability* yang terlalu rendah untuk sebagian besar aplikasi konstruksi, sehingga tidak direkomendasikan sebagai solusi tunggal kecuali pada kondisi pengecoran dengan akses mekanis penuh dan pemadatan intensif seperti pada beton pra-cetak. Kedua, *plasticiser* tunggal (BP) menawarkan keseimbangan yang lebih baik antara kekuatan dan *workability*, namun tidak memanfaatkan potensi peningkatan durabilitas jangka panjang yang ditawarkan oleh *silica fume* aspek yang kritis untuk struktur dengan umur rencana panjang. Ketiga, kombinasi BSP terbukti menjadi solusi paling komprehensif yang memenuhi seluruh kriteria mutu secara bersamaan: kuat tekan tinggi, *workability* memadai, dan durabilitas yang superior. Rekomendasi ini selaras dengan arah perkembangan standar teknis internasional yang semakin mendorong penggunaan kombinasi *admixture* sebagai praktik terbaik dalam produksi beton mutu tinggi (Hamada et al., 2023; Novita et al., 2023).

Kesimpulan

Hasil pengujian secara konsisten menunjukkan bahwa penggunaan *admixture* baik tunggal maupun

 ISSN 2987-677x

kombinasi memberikan peningkatan mutu beton yang signifikan dibandingkan beton normal. *Silica fume* 8% meningkatkan kuat tekan secara progresif melalui reaksi *pozzolan*, namun menurunkan *workability* apabila digunakan tanpa *plasticiser*. *Plasticiser* 1% secara efektif meningkatkan *workability* sekaligus mendukung peningkatan kuat tekan melalui pengurangan w/c. Kombinasi keduanya (BSP) terbukti menghasilkan performa paling optimal: kuat tekan 52 MPa pada 28 hari dengan *slump* 10 cm, melampaui persyaratan fc' ≥ 35 MPa (SNI 2847:2019) dengan *margin* keamanan yang substansial. Kombinasi *silica fume* dan *plasticiser* direkomendasikan sebagai solusi *admixture* standar untuk konstruksi beton mutu tinggi, mengingat kemampuannya memenuhi kriteria kekuatan, *workability*, dan durabilitas secara bersamaan.

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada cakupan variasi dosis yang diuji serta belum mencakup parameter durabilitas seperti permeabilitas dan ketahanan klorida. Penelitian lanjutan disarankan mengeksplorasi optimasi dosis admixture pada rentang yang lebih luas, pengujian *rapid chloride penetration test* (RCPT), serta pengkajian jenis *superplasticiser* generasi terbaru berbasis PCE. Bagi praktisi, proporsi BSP dalam penelitian ini dapat dijadikan acuan awal perencanaan campuran beton mutu tinggi, dengan trial mix lapangan sebagai langkah verifikasi wajib sebelum pengecoran skala penuh.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Laboratorium Bahan Konstruksi Universitas Brawijaya yang telah menyediakan fasilitas pengujian, peralatan, dan dukungan teknis selama pelaksanaan penelitian ini berlangsung. Apresiasi yang sama disampaikan kepada PT Duta Bangsa Mandiri atas dukungan material dan kolaborasi teknis yang sangat berarti dalam proses pengumpulan data lapangan. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian penelitian ini. Penelitian ini tidak menerima pendanaan dari lembaga komersial manapun sehingga bebas dari konflik kepentingan, dan seluruh temuan yang disajikan merupakan hasil analisis objektif berdasarkan data pengujian yang terverifikasi.

Referensi

Arman, A., et al. (2024). The effect of Silica fume addition on the compressive strength of concrete. *Journal of Technology and Vocational Studies, 2*(1), 9–16. https://doi.org/10.21063/jtv.2024.2.1.9-16

ASTM International. (2019). *ASTM C494/C494M-19: Standard specification for chemical admixtures for concrete.* ASTM International.

ASTM International. (2020). *ASTM C1240-20: Standard specification for Silica fume used in cementitious mixtures.* ASTM International.

ASTM International. (2021). *ASTM C39/C39M-21: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.* ASTM International.

Badan Standardisasi Nasional. (2008). *SNI 1972:2008: Cara uji slump beton.* BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 1974:2011: Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder.* BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 2847:2019: Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*. BSN.

Hamada, H. M., Abed, F., Katman, H. Y. B., Humada, A. M., Al Jawahery, M. S., Majdi, A., Yousif, S. T., & Thomas, B. S. (2023). Effect of Silica fume on the properties of sustainable cement concrete. *Journal of Materials Research and Technology, 24*, 8887–8908. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.147

Hendrawati, N., Rahmayanti, E. D., & Priapnasar, E. D. (2017). Study pembuatan durable cement dengan penambahan pozzolan Silica fume. *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan, 2*(1), 1–7. https://doi.org/10.33795/jtkl.v2i1.68

Ibrahim, A. B., Husin, W. N. W., & Johari, I. (2016). Effect of Silica fume on the performance of polyvinyl alcohol concrete. *Jurnal Teknologi, 78*(5), 1–6. https://doi.org/10.11113/jt.v78.8841

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Mulyono, T. (2005). *Teknologi beton.* Andi Offset.

Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.

Novita, A. A., et al. (2023). Pengaruh proporsi Silica fume dengan penambahan additive terhadap kuat tekan mortar. *Journal of Applied Civil Engineering and Infrastructure Technology, 6*(1). https://doi.org/10.52158/jaceit.v6i1.952

Pala'langan, W., Sariman, S., & Mulyani, S. P. (2024). Penggunaan Silica fume sebagai pengganti sebagian semen dengan penambahan superplasticiser terhadap kuat tekan dan lentur beton. *Jurnal Penelitian Teknik Sipil Konsolidasi, 3*(2). https://doi.org/10.56326/jptsk.v3i2.4369

Prayogi, G. R., & Fitriana, I. R. (2022). Kuat tekan roller compacted concrete dengan Silica fume dan superplasticiser. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil.* https://doi.org/10.37037/jrftsp.v12i1.122

Prayuda, H., & Saleh, F. (2018). Kuat tekan beton awal tinggi dengan variasi penambahan superplasticiser dan Silica fume. *Media Teknik Sipil, 17*(1). https://doi.org/10.22219/jmts.v17i1.5951

Slat, V. B., Supit, S. W. M., Kondoj, N., & Tulung, C. W. M. (2020). Pengaruh pemanfaatan Silica fume dan superplasticiser polymer terhadap kuat tekan beton pra-cetak mutu tinggi. *Jurnal Teknik Sipil Terapan, 2*(2). https://doi.org/10.47600/jtst.v2i2.24

 ISSN 2987-677x

Korelasi Nilai *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) dengan Nilai California *Bearing Ratio* (CBR) pada Lapisan Tanah *Subgrade*

Hadi Suryanto[1] Rasional Sitepu[2]

[1,2] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ suryaandi59@gmail.com

✉ rasional@ukwms.ac.id

California Bearing Ratio **(CBR) banyak digunakan dalam desain jalan sebagai ukuran daya dukung tanah dasar. Namun prosedur untuk mendapatkan nilai CBR lapangan seringkali dianggap rumit dan memakan waktu, sehingga; Uji Penetrasi Kerucut Dinamis (DCP) biasanya dilakukan sebagai pengganti uji CBR lapangan. Studi ini mengevaluasi penerapan sebelas (11) korelasi yang dipublikasikan pada tanah dasar di Kabupaten OI, Sumatera Selatan. Hasil menunjukkan bahwa tujuh (7) korelasi dapat digunakan untuk tanah di wilayah studi sedangkan empat korelasi lainnya tidak dapat digunakan. Di antara ke tujuh korelasi tersebut, persamaan yang dikembangkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum Indonesia adalah yang terbaik untuk mengevaluasi nilai CBR dari hasil uji DCP.**

Kata Kunci: *California Bearing Ratio, Dynamic Cone Penetrometer*, Korelasi

Pendahuluan

Infrastuktrur jalan merupakan bagian yang sangat penting dalam menunjang Transportasi orang, barang maupun jasa. Ada dua jenis "konstruksi jalan yaitu (1) Perkerasan *Rigid* (*Rigid Pavement*) dan (2) Perkerasan Lentur (*Flexible Pavement*), keduanya dibedakan dengan jenis bahan yang digunakan untuk konstruksi perkerasannya. Nilai CBR ditentukan berdasarkan beban yang dibutuhkan untuk penetrasi piston sebesar 0,1" dan 0,2" dibandingkan dengan beban penetrasi standar yang diberikan pada Tabel 1 prosedur standar uji CBR lapangan konvensional diuraikan dalam ASTM D4429-93.

Tabel 1. *Standard* Beban CBR

Penetration (Inch)	Standard Load (Lbs)	Standard Pressure (Lbs/Inch)
0.1	3000	1000
0.2	4500	1500
0.3	5700	1900
0.4	6900	2300
0.5	7800	6000

Metode

Penelitian ini menggunakan teknik eksperimental, dan pengujian DCP dan CBR dilakukan di lokasi penelitian, seperti ditunjukkan pada Gambar 1 proyek titik uji diambil secara acak dari STA 0+050 hingga STA 6+450.



Gambar 1. Titik Uji Proyek

Tabel 2. Korelasi yang Dipublikasikan yang Digunakan Dalam Penelitian Ini

No	Reference	Correlation / Equation	Location	Types of soil
1	Kementrian Pekerjaan Umum (2010)	Log CBR = 2.8135 - 1.313 (Log DCPI)	Indonesia	Fine grained soil
2	Lengkong, 2013	Log CBR = 2.440 - 1.16(Log DCPI)	Indonesia	Clay
3	Transport Road Research (TRL, 1993)	Log CBR = 2.480 - 1.075(Log DCPI)	England	Clay
4	Kleyn (1987)	Log CBR = 2.73 - 1.3(Log DCPI)	Netherland	All types of soil
5	Harison (2005)	Log CBR = 2.81 - 1.32(Log DCPI)	Australia	Clay
6	Webster (1994)	CBR = 1 / (0.002871 x DCPI)	USA	All types of soil
7	Coonse (1999)	Log CBR = 2.53 - 1.14(Log DCPI)	USA	Residual soil
8	NCDOT (North Carolina Department of Transportation,1998)	Log CBR = 2.6 - 1.07(Log DCPI)	Mississipi USA	Clay
9	ERA (Ethiopian Roads Authority, 2013)	Log CBR = 2.63 - 1.28(Log DCPI)	Ethiopia	Clay
10	Zohrabi (2003)	$CBR = 247DCP^{-0.98}$	England	Clay
11	ASTM D6591-03	Log CBR = 2.46 - 1.12 (Log DCPI)	USA	All types of soil

Tabel 3. Koefisien Determinasi (Sugiyono, 2019)

Coefficient of determination (R^2)	level of accuracy of the regression model
0.00 – 0.199	Very weak
0.20 – 0.399	Weak
0.40 – 0.599	Good
0.60 – 0.799	strong
0.80 – 1.000	Very strong

Tabel 4. Koefisien Korelasi (Sarwono. 2009)

Coefficient of correlation (r)	Type of correlation
1	Perfect positive correlation
0.6 – 1	Good positive correlation
0 – 0.6	Weak positive correlation
0	No correlation
-0.6 – 0	Weak negative correlation
-1 – -0.6	Negative correlation
-1	Perfect negative correlation

 ISSN 2987-677x

Hasil Kerja

Klasifikasi Tanah

Pengujian DCP dan CBR dilakukan di dua puluh (20) lokasi sepanjang lokasi proyek antara STA 0+050 dan STA 6+450. Sampel tanah juga dikumpulkan di setiap titik untuk uji laboratorium guna tujuan klasifikasi. Ditemukan bahwa tanahnya seragam. Hasil analisis saringan seluruh sampel menunjukkan lebih dari 50% lolos saringan No. 200, LL = 46,62%, PI = 29,80. Oleh karena itu, tanah dapat diklasifikasikan menjadi CL (berdasarkan USCS) dan A–7–6 (menurut AASHTO).

Hasil DCP dan CBR *Test*

Hasil pengujian DCP (DCPI) yang dilakukan pada penelitian ini dan nilai CBR terkait yang dihitung menggunakan persamaan yang disarankan dalam SNI 03-4153-1996 ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Uji DCPT

No Titik	Kumulatif Tumbukan	Penetrasi (mm)	DCPI (mm/tumbukan)	CBR %
1	6,0	573,0	33,0	6,60
2	6,0	512,0	32,0	6,87
3	6,0	515,0	35,0	6,11
4	7,0	548,0	28,0	8,19
5	6,0	498,0	28,0	8,19
6	6,0	502,0	22,0	11,24
7	6,0	504,0	24,0	10,03
8	5,0	450,0	30,0	7,48
9	6,0	518,0	33,0	6,60
10	5,0	478,0	28,0	8,19
11	4,0	429,0	34,0	6,35
12	5,0	477,0	27,0	8,59
13	5,0	426,0	31,0	7,17
14	4,0	423,0	23,0	10,61
15	5,0	470,0	30,0	7,48
16	4,0	419,0	34,0	6,35
17	4,0	429,0	29,0	7,82
18	5,0	454,0	24,0	10,03
19	5,0	453,0	23,0	10,61
20	4,0	365,0	20,0	12,74

Tabel 6. Hasil Uji CBR

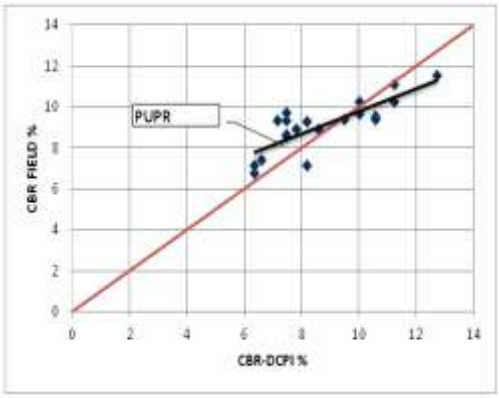
No.	Titik Pengujian	Nilai CBR					
		0,1 inc		0,2 inc		Rata-rata	
1	STA 0 + 050	7,41	%	9,68	%	8,54	%
2	STA 0 + 100	6,95	%	11,72	%	9,34	%
3	STA 0 + 150	6,54	%	12,22	%	9,38	%
4	STA 0 + 200	7,39	%	11,15	%	9,27	%
5	STA 0 + 250	5,45	%	8,84	%	7,15	%
6	STA 0 + 300	8,09	%	12,39	%	10,24	%
7	STA 0 + 350	7,88	%	12,41	%	10,14	%
8	STA 0 + 400	7,84	%	11,51	%	9,68	%
9	STA 0 + 450	7,25	%	7,53	%	7,39	%
10	STA 0 + 500	10,36	%	11,81	%	11,09	%
11	STA 0 + 550	6,21	%	7,31	%	6,76	%
12	STA 0 + 600	8,06	%	9,73	%	8,90	%
13	STA 0 + 650	7,80	%	10,88	%	9,34	%
14	STA 0 + 700	7,51	%	11,55	%	9,53	%
15	STA 0 + 750	7,18	%	10,11	%	8,65	%
16	STA 0 + 800	6,12	%	8,12	%	7,12	%
17	STA 0 + 850	6,96	%	10,80	%	8,88	%
18	STA 0 + 900	7,49	%	11,81	%	9,65	%
19	STA 0 + 950	7,16	%	11,58	%	9,37	%
20	STA 1 + 000	10,55	%	12,45	%	11,50	%

Analisa Data

Perbandingan nilai CBR yang dihitung dari DCPI dan yang diperoleh dari pengujian CBR mekanis ditunjukkan pada Gambar 2 hasil analisis data pada Gambar 2 menunjukkan bahwa nilai CBR yang diperoleh dari DCPI tersebar. Terlihat dari garis regresi, nilai CBR yang diperoleh dari DCPI lebih tinggi dibandingkan dengan yang diperoleh langsung dengan menggunakan uji *mechanical* CBR. Garis regresi diplot untuk mencari persamaan antara CBR hasil uji CBR lapangan dengan CBR yang diperoleh dari DCPI berdasarkan data yang diperoleh pada penelitian ini. Garis 45° juga diplot pada gambar untuk menunjukkan apakah kedua data cocok satu sama lain. Persamaannya adalah :

$$CBRfield = 0.551\ (\text{CBR } from \text{ DCPI}) + 4.2744$$

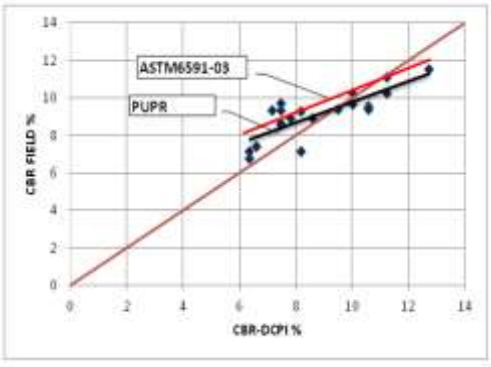
dengan koefisien determinasi R2 sebesar 0,66 lebih besar dari 0,6 menunjukkan adanya korelasi yang kuat. Koefisien korelasi r = 7087 > 0,6 (Korelasi positif baik).



Gambar 2. Nilai CBR Dari Uji CBR Lapangan dan Dihitung dari DCPI

Evaluasi Korelasi

Penerapan sepuluh (10) persamaan lain yang diterbitkan diuji secara statistik berdasarkan koefisien determinasi R2 dan koefisien korelasi r. Hasilnya dirangkum dalam Tabel 7. Gambar 3 menunjukkan contoh analisis statistik yang dilakukan untuk persamaan ASTM 6591-03. Berdasarkan metode ini, nilai CBR yang diprediksi menggunakan persamaan ini berkorelasi sedang dengan DCPI yang diperoleh dari uji DCP (R2 > 0,4).



Gambar 3. Statistik Persamaan ASTM (2003)

 ISSN 2987-677x

Tabel 7. Hasil Analisis Statistik antara Nilai Data dan Korelasi yang Dipublikasikan

No	Reference	Coefficient of determination (R^2)	Coefficient of correlation (r)	Status
1	Kementrian Pekerjaan Umum (2010)	R^2=0.6611	r = 0.787	Strongly correlated
2	Lengkong. 2013	R^2=0.0529	r = -0.984	Not correlated
3	TRL. 1993	R^2=0.550	r = 0.742	Moderately correlated
4	Kleyn (1987)	R^2=0.529	r = 0.724	Moderately correlated
5	Harison (1989)	R^2=0.4815	r = 0.693	Moderately correlated
6	Webster (1994)	R^2=0.0196	r = -0.140	Not correlated
7	Coonse (1999)	R^2=0.4842	r = 0.695	Moderately correlated
8	NCDOT (1998)	R^2=0.0061	r = -0.078	Not correlated
9	ERA (2013)	R^2=0.2015	r = 0.448	Not correlated
10	Zohrabi (2003)	R^2=0.4318	r = 0.657	Moderately correlated
11	ASTM D6591-03	R^2=0.4871	r = 0.697	Moderately correlated

Kesimpulan

Berdasarkan kajian korelasi DCPI dan nilai CBR tanah liat plastisitas rendah (CL) yang diperoleh pada Proyek Peningkatan Jalan dan Jembatan Ruas Tanjung Dayang-Tanjung Laut, Kecamatan Tanjung Batu, Desa Tanjung Laut, dapat disimpulkan sebagai berikut: Kabupaten Ogan Ilir, Provinsi Sumatera Selatan:

1. Nilai CBR yang dihitung menggunakan persamaan yang dikemukakan oleh Kementerian Pekerjaan Umum Indonesia (2010) lebih tinggi dibandingkan nilai CBR sebenarnya yang diperoleh langsung dengan menggunakan uji CBR lapangan konvensional. Nilai prediksi tersebut harus dikoreksi menggunakan persamaan yang diajukan dalam penelitian ini.
2. Korelasi lain yang dipublikasikan dan diuji dalam penelitian ini tidak memberikan estimasi nilai CBR yang lebih baik dibandingkan dengan yang diusulkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum Indonesia (2010). Dari 10 persamaan, enam diantaranya berkorelasi positif sedangkan empat persamaan lainnya tidak dapat digunakan karena memberikan korelasi negatif.

Ucapan Terimakasih

Secara khusus pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Ir. Rasional Sitepu, M.Eng., IPU., ASEAN Eng. selaku dosen pembimbing yang telah membimbing penulis selama penyusunan Artikel ini.
2. Bpk Ir. Eko Randi Satria, S.T.,M.M. Selaku Kepala Bidang Bina Marga Kabupaten Ogan Ilir.
3. Seluruh *Staff* dan Pengajar Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya.

Referensi

ASTM International. (2003). *Standard test method for use of the dynamic cone penetrometer in shallow pavement applications* (ASTM D6951/D6951M-03).

Coonse. (1999). *Potential applications of dynamic and static cone penetrometers in MDOT pavement design and construction*. Department of Civil Engineering, Jackson State University.

Ethiopian Roads Authority. (2013). *Standard technical specifications: Site investigation manual*.

Gofar, N. (2024). *Pengenalan konsep mekanika tanah*. Palembang: Unsri Press.

Harison. (2005). *Correlation between California Bearing Ratio and dynamic cone penetrometer strength measurement of soils* (Technical Note 463). Thomas Telford.

Kleyn. (1987). *The application of a portable pavement dynamic cone penetrometer to determine in-situ bearing properties of road pavement layers and subgrades in South Africa*. Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam.

Lengkong, P. I. (2013). Hubungan nilai CBR laboratorium dan DCP pada tanah yang dipadatkan pada ruas jalan Wori–Likupang Kabupaten Minahasa Utara. *Jurnal Sipil Statik, 1*(5), 368–376.

Sapta, W., Harianto, Y., & Gofar, N. (2023). Correlation of CBR with index and compaction properties. *Indonesian Geotechnical Journal, 2*(3), 179–188. https://doi.org/10.56144/igj.v2i3.7230

SNI 03-1744. (2012). *Metode pengujian CBR lapangan*. Badan Standardisasi Nasional Indonesia.

Transport Research Laboratory. (1993). *Overseas Road Note 31: A guide to the structural design of bitumen-surfaced roads in tropical and sub-tropical countries*. United Kingdom.

Webster. (1994). *Force projection site evaluation using the electric cone penetrometer and the dynamic cone penetrometer* (Technical Report GL-94-Z7). U.S. Army.

Zohrabi. (2003). *The correlation between the CBR value and penetrability of pavement construction materials*. Transportation Research Laboratory.

ISSN 2987-677x

Mitigasi Risiko Ergonomi dan Teknis: Evaluasi Implementasi Keselamatan Kerja pada Manufaktur di PT Duta Bangsa Mandiri Pasuruan

Sutadjianto[1] Rasional Sitepu[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ sutadjianto.db@gmail.com

✉ rasional@ukwms.ac.id

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi implementasi keselamatan kerja serta merumuskan strategi mitigasi risiko ergonomi dan teknis di PT Duta Bangsa Mandiri Pasuruan, mengingat industri beton skala menengah memiliki potensi bahaya kompleks namun penerapan K3 seringkali belum optimal. Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain studi kasus. Data dikumpulkan melalui studi dokumen Instruksi Kerja, observasi lapangan terstruktur di empat unit produksi (penggilingan batu, *paving*, *precast*, *ready mix*), wawancara mendalam dengan petugas K3 dan operator, serta identifikasi bahaya menggunakan metode HIRARC. Hasil penelitian mengidentifikasi 17 potensi bahaya, dengan tiga risiko kategori sangat tinggi (*Risk Rating* 20): paparan debu silika tanpa pengendalian teknis, potensi mesin aktif saat perbaikan karena absennya sistem LOTO fisik, dan risiko jatuh dari ketinggian. Bahaya ergonomi seperti getaran tangan-lengan dan aktivitas manual material handling juga berada pada tingkat risiko tinggi (15–16). Kesenjangan utama terletak pada dominasi pengendalian administratif dan APD dibandingkan rekayasa teknik, tidak adanya sistem surveilans kesehatan berkala, serta spesifikasi APD yang belum mengacu standar internasional. Penelitian menyimpulkan bahwa kebutuhan kesehatan kerja paling mendesak adalah peralihan prioritas menuju rekayasa teknik, pembangunan sistem *surveilans* kesehatan berbasis paparan aktual, serta standardisasi APD. Intervensi prioritas diproyeksikan mampu menurunkan tingkat risiko hingga ±52,9%.

Kata kunci: Mitigasi Risiko Ergonomi; Keselamatan Kerja; Industri Beton; HIRARC; *Lockout/Tagout*

Pendahuluan

Paradigma keselamatan dan kesehatan kerja (K3) kontemporer menempatkan mitigasi risiko ergonomi dan teknis sebagai pilar fundamental dalam sistem manajemen manufaktur modern. Idealitas (*Das Sollen*) yang termaktub dalam standar global seperti ISO 45001:2018 dan kerangka *Hierarchy of Controls* menuntut pendekatan pengendalian yang berlapis dan sistematis, dimulai dari rekayasa teknik (*engineering control*) sebagai prioritas utama, diikuti pengendalian administratif, dan terakhir alat pelindung diri (APD). Secara spesifik, mitigasi risiko ergonomi terutama yang berkaitan dengan *Manual Material Handling* (MMH) dan paparan getaran tangan-lengan (*Hand-Arm Vibration*/ HAV) serta risiko teknis seperti kegagalan prosedur *Lockout/Tagout* (LOTO) dan pengendalian paparan debu silika, idealnya terintegrasi dalam siklus *Plan-Do-Check-Act* (PDCA) yang berkelanjutan. Regulasi nasional, melalui PP No. 50/2012 tentang SMK3 dan Permenaker No. 5/2018, juga secara eksplisit mewajibkan identifikasi bahaya dan penilaian risiko sebagai prasyarat penyusunan program K3 yang efektif dan adaptif terhadap kompleksitas operasional industri berat.

Namun, kesenjangan antara idealitas normatif dan realitas empirik (*Das Sein*) di lapangan masih teramat lebar, khususnya pada industri beton skala menengah. Studi kasus di PT Duta Bangsa Mandiri Pasuruan mengungkap kondisi yang memprihatinkan: dari 17 potensi bahaya yang teridentifikasi, tiga di antaranya berada pada kategori risiko "Sangat Tinggi" (*Risk Rating* 20), yaitu paparan debu silika melebihi Nilai Ambang Batas, potensi mesin aktif saat perbaikan karena absennya sistem LOTO fisik, serta risiko jatuh dari ketinggian tanpa *platform* permanen. Fakta autentik lainnya menunjukkan belum adanya pemisahan jalur pejalan kaki dan forklift di area stapel, serta keterbatasan ventilasi lokal (*local exhaust ventilation*) yang menyebabkan akumulasi partikel respirabel. Data ini mengonfirmasi bahwa sistem K3 yang berjalan masih bersifat reaktif dan bergantung pada perilaku individu, bukan pada pengendalian teknis yang berkelanjutan.

Berbagai penelitian terdahulu telah memberikan fondasi penting bagi pemahaman risiko K3 di industri semen dan beton. Rohman & Putra (2024) mengidentifikasi 124 potensi bahaya di batching plant menggunakan metode HIRARC dan JSA, menekankan pentingnya pendekatan ganda untuk mengungkap bahaya laten. Dewi dkk. (2022) menemukan bahwa 63,8% bahaya di industri pengecoran berada pada kategori risiko tinggi, dengan dominasi bahaya mekanis dan fisika. Sementara itu, Hauke dkk. (2021) secara spesifik menganalisis beban spinal pada aktivitas MMH di produksi *precast*, menunjukkan bahwa 68% siklus

 ISSN 2987-677x

pengangkatan melampaui batas aman NIOSH *Lifting Equation*. Gharpure dkk. (2021) dan Kamaludin dkk. (2020) secara konsisten mengonfirmasi bahwa paparan debu silika dan logam berat di industri semen memiliki potensi karsinogenik dan fibrotik yang signifikan.

Namun, sebagian besar studi tersebut masih bersifat parsial fokus pada satu jenis bahaya atau satu area operasional serta jarang yang secara eksplisit menghubungkan hasil identifikasi bahaya teknis dengan perancangan program kesehatan kerja yang berbasis kebutuhan aktual (*needs-based approach*). Akibatnya, rekomendasi yang dihasilkan seringkali tidak terintegrasi dan sulit diimplementasikan secara holistik di tingkat operasional.

Berdasarkan sintesis kritis atas kesenjangan tersebut, maka *research gap* yang teridentifikasi adalah belum adanya studi yang mengevaluasi secara simultan mitigasi risiko ergonomi (terutama MMH dan HAV) dan teknis (LOTO, pengendalian debu, keselamatan ketinggian) dalam satu kerangka terintegrasi di industri beton skala menengah Indonesia, dengan menggunakan data aktual dari dokumen internal dan observasi lapangan terstruktur sebagai basis analisis. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada penggabungan metode HIRARC dengan *gap analysis* terhadap standar internasional (ISO 10819:2013 untuk APD anti-getaran, OSHA 29 CFR 1910.147 untuk LOTO, serta NIOSH untuk *dust suppression*), yang kemudian dirumuskan dalam delapan solusi prioritas dengan proyeksi kuantitatif penurunan tingkat risiko hingga ±52,9%. Pendekatan integratif ini tidak hanya mengisi kekosongan literatur tetapi juga menawarkan model implementasi yang aplikatif.

Secara teoritis, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan kerangka analisis risiko yang menggabungkan dimensi ergonomi dan rekayasa teknis dalam satu evaluasi sistemik, memperkaya literatur K3 pada sektor manufaktur beton. Secara praktis, hasil penelitian ini menyediakan rekomendasi terukur bagi PT. Duta Bangsa Mandiri, sekaligus menjadi model referensi bagi industri sejenis di kawasan Pasuruan dan sekitarnya. Adapun fokus utama penelitian ini adalah mengevaluasi implementasi keselamatan kerja di PT Duta Bangsa Mandiri, dengan sub-fokus sebagai berikut: (1) mengidentifikasi dan menganalisis tingkat risiko ergonomi (meliputi aktivitas MMH, postur kerja, dan paparan getaran) serta risiko teknis (LOTO, debu silika, kebisingan, dan pekerjaan ketinggian); (2) mengevaluasi kesenjangan antara praktik aktual dengan standar nasional dan internasional; serta (3) merumuskan strategi mitigasi prioritas berbasis hierarki pengendalian yang efektif dan berkelanjutan.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain studi kasus deskriptif-evaluatif (Yin, 2018). Lokasi penelitian di PT. Duta Bangsa Mandiri Pasuruan pada periode Januari–Maret 2026. Subjek penelitian ditentukan secara *purposive sampling* dengan kriteria: (1) area operasional intensitas bahaya tertinggi (penggilingan batu, *paving, precast, ready mix*); (2) informan kunci meliputi 1 Manajer Produksi, 1 petugas K3, dan 3 operator mesin; (3) dokumen Instruksi Kerja keempat unit produksi (Revisi 00, 2018).

Pengumpulan data melalui tiga metode komplementer: studi dokumen (Instruksi Kerja dan prosedur operasional), observasi lapangan terstruktur menggunakan *checklist* berbasis hierarki pengendalian risiko dengan 12 sesi pengamatan, serta wawancara mendalam semi-terstruktur. Identifikasi bahaya menggunakan metode *Hazard Identification, Risk Assessment, and Risk Control* (HIRARC) dengan matriks 5×5 (*Likelihood* 1–5; *Severity* 1-5), dimana nilai risiko (L × S) dikategorikan: sangat rendah (1-4), rendah (5-9), sedang (10-14), tinggi (15-19), sangat tinggi (20-25).

Analisis data menggunakan pendekatan tematik dan komparatif melalui reduksi data, penyajian data dalam matriks risiko, analisis kesenjangan (*gap analysis*) dengan membandingkan praktik aktual terhadap PP No. 50/2012, Permenaker No. 5/2018, ISO 45001:2018, ISO 10819:2013, dan OSHA 29 CFR 1910.147, serta penarikan kesimpulan dengan member *checking*. Keabsahan data dijamin melalui triangulasi sumber dan metode, audit *trail*, serta refleksivitas peneliti.

Hasil Kerja

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi 17 potensi bahaya yang tersebar di empat unit produksi utama PT Duta Bangsa Mandiri, yaitu penggilingan batu, *paving/ bataco, precas*t, dan *ready mix*. Berdasarkan klasifikasi jenis bahaya, ditemukan dominasi bahaya fisik (kebisingan, getaran, jatuh dari ketinggian), bahaya mekanis (terjepit mesin, tertimpa material), bahaya kimia (debu silika, debu semen), serta bahaya ergonomi (pengangkatan manual, postur kerja statis). Tabel 1 menyajikan lima bahaya prioritas tertinggi berdasarkan tingkat risiko dan dampak sistemik, dimana tiga di antaranya berada pada kategori sangat tinggi.

Tabel 1. Lima Prioritas Bahaya Tertinggi dan Intervensi

No.	Jenis Bahaya	Tingkat Risiko	Intervensi Inti (*Engineering First*)
1	Paparan debu silika & semen	20 (Sangat Tinggi)	*Dust suppression (water mist/LEV)* + respirator N95
2	Mesin aktif saat perbaikan (tanpa LOTO)	20 (Sangat Tinggi)	LOTO fisik (*padlock + hasp*) + prosedur tertulis
3	Jatuh dari ketinggian	20 (Sangat Tinggi)	*Platform* permanen + *guardrail + full body harness*
4	Tangan terjepit mesin cetak	16 (Tinggi)	*Presence* sensor/ pelindung *hopper + cut-resistant gloves*
5	Kejatuhan komponen precast	16 (Tinggi)	*Overhead crane* + inspeksi sling + *steel toe shoes*

Sumber: Analisis data lapangan dan dokumen IK PT Duta Bangsa Mandiri, 2026

 ISSN 2987-677x

Paparan debu silika yang menduduki peringkat risiko tertinggi mengonfirmasi temuan Gharpure dkk. (2021) bahwa *respirable crystalline silica* merupakan agen penyebab silikosis, COPD, dan kanker paru. Kesenjangan kritis di PT Duta Bangsa Mandiri terletak pada tidak adanya sistem *dust suppression* berbasis air (*water mist*) atau *local exhaust ventilation* di titik-titik emisi utama, sementara pengendalian yang ada hanya mengandalkan masker debu tanpa spesifikasi N95 yang terverifikasi. Praktik ini bertentangan dengan hierarki pengendalian risiko yang menempatkan rekayasa teknik sebagai intervensi paling efektif sebelum APD (Goetsch, 2019), serta melanggar Permenaker No. 5 Tahun 2018 yang mewajibkan Nilai Ambang Batas debu silika <0,1 mg/m³ dan pemantauan lingkungan kerja berkala. NIOSH (2020) merekomendasikan pendekatan *wet method* sebagai praktik terbaik, sehingga ketiadaan intervensi tersebut mengindikasikan kegagalan sistemik dalam pengendalian bahaya kimia di sumbernya.

Selanjutnya, temuan bahwa perusahaan belum memiliki prosedur LOTO tertulis yang terstandarisasi, tidak menyediakan gembok dan hasp untuk setiap titik isolasi, serta tidak melaksanakan pelatihan LOTO merupakan deviasi serius dari standar OSHA 29 CFR 1910.147 dan ISO 45001:2018 Klausul 8.1.3. Standar tersebut secara eksplisit mewajibkan identifikasi sumber energi, *lockout* dengan perangkat fisik, *tagout* sebagai media komunikasi, serta verifikasi *zero energy state*. Teori domino kecelakaan Heinrich dkk. (1980) menegaskan bahwa kondisi tidak aman seperti tidak adanya isolasi energi merupakan penyebab utama kecelakaan fatal di industri manufaktur. Risiko mesin menyala secara tidak sengaja saat perbaikan berlangsung sangat nyata, dan kondisi ini juga melanggar PP No. 50 Tahun 2012 Elemen 5 tentang perancangan prosedur kerja aman yang harus mencakup isolasi energi.

Bahaya getaran tangan-lengan dari mesin vibro di *unit precast* dinilai berisiko tinggi (15), namun pengendalian yang ada hanya berupa sarung tangan busa tanpa spesifikasi teknis. Padahal, standar ISO 10819:2013 mensyaratkan nilai *transmissibility* tertentu untuk sarung tangan anti-getaran yang efektif. Tanpa spesifikasi tersebut, pekerja tetap berisiko mengalami *Hand-Arm Vibration Syndrome* yang ditandai dengan *vibration white finger* (Hauke et al., 2021). Sementara itu, aktivitas manual *material handling* pada produksi *precast* dan *paving* berpotensi menimbulkan *work-related musculoskeletal disorders*. Instruksi Kerja hanya menyebutkan kewajiban menggunakan "kaidah ergonomi" tanpa mendefinisikan teknik pengangkatan yang benar, kontras dengan prinsip NIOSH *Lifting Equation* yang memberikan rekomendasi kuantitatif batas berat angkat aman berdasarkan jarak horizontal, vertikal, frekuensi, dan sudut asimetri.

Analisis Kritis Implementasi Program K3 Saat Ini

Secara umum, sistem K3 di PT Duta Bangsa Mandiri telah memiliki struktur formal yang cukup baik, ditandai dengan tersedianya empat dokumen Instruksi Kerja yang disahkan oleh Direktur Utama, serta adanya penanggung jawab K3 di setiap unit. Namun, efektivitas implementasi masih sangat terbatas karena tiga kelemahan utama:

1. Dominasi pengendalian administratif dan APD dibandingkan rekayasa teknik. Sebagaimana terlihat pada Tabel 1, intervensi pada level rekayasa teknik (LOTO fisik, *dust suppression*, *platform* permanen, *presence sensor*) belum diimplementasikan, meskipun secara teoritis dan regulatif merupakan prioritas tertinggi. Akibatnya, sistem K3 sangat rentan terhadap kegagalan karena bergantung pada kepatuhan perilaku pekerja yang fluktuatif.
2. Tidak adanya sistem pemantauan dan evaluasi yang terstruktur. Perusahaan tidak melakukan pengukuran berkala terhadap paparan debu, kebisingan, getaran, maupun pencahayaan, sehingga tidak dapat memverifikasi efektivitas pengendalian yang ada. Demikian pula, tidak ada rekam insiden dan *near miss* yang terdokumentasi, sehingga pembelajaran dari kegagalan tidak terjadi.
3. Lemahnya integrasi aspek kesehatan kerja (*surveilans* kesehatan) ke dalam program K3. Tidak ada pemeriksaan fungsi paru berkala bagi pekerja yang terpapar debu silika, tidak ada *audiometry test* bagi pekerja di area bising, dan tidak ada *skrining* dini gejala HAVS. Hal ini mengabaikan mandat UU No. 13 Tahun 2003 dan Permenaker No. 5 Tahun 2018 tentang hak pekerja atas pemantauan kesehatan.

Dengan demikian, meskipun secara dokumentasi perusahaan telah memenuhi sebagian persyaratan regulasi nasional, secara substantif implementasi K3 masih bersifat reaktif dan *compliance-driven*, belum mencapai tahap *proactive* dan *risk-based* sebagaimana dituntut oleh ISO 45001:2018.

Implikasi Temuan terhadap Mitigasi Risiko

Temuan di atas mengonfirmasi bahwa risiko ergonomi dan teknis di PT Duta Bangsa Mandiri memerlukan strategi mitigasi yang terintegrasi dan berlapis. Prioritas utama harus diberikan pada pengendalian rekayasa teknik: (1) instalasi sistem LOTO fisik di semua panel mesin; (2) pemasangan dust suppression dan LEV di titik emisi debu; (3) penyediaan *platform* permanen untuk pekerjaan ketinggian; (4) pemasangan *presence sensor* atau pelindung *hopper* pada mesin cetak. Intervensi ini diproyeksikan mampu menurunkan tingkat risiko hingga ±52,9% (dari rata-rata 15,3 menjadi 7,2). Selanjutnya, penguatan aspek administratif melalui digitalisasi *checklist* pra-operasi, pelatihan ergonomi MMH, dan program *safety reward* akan memperkuat budaya keselamatan. Terakhir,

 ISSN 2987-677x

standardisasi APD (respirator N95, sarung tangan ISO 10819, pelindung telinga dengan SNR ≥25 dB) serta program *surveilans* kesehatan berkala menjadi pelengkap yang tidak boleh diabaikan.

Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa implementasi keselamatan kerja di PT Duta Bangsa Mandiri Pasuruan menghadapi tiga kesenjangan utama dalam mitigasi risiko ergonomi dan teknis. Pertama, sistem pengendalian risiko masih didominasi oleh pendekatan administratif dan APD, sementara rekayasa Teknik. Seperti LOTO fisik, *dust suppression*, dan *platform* permanen belum diimplementasikan. Akibatnya, sistem K3 rentan terhadap kegagalan akibat ketidakpatuhan perilaku pekerja. Kedua, risiko kesehatan kerja jangka panjang (debu silika, getaran tangan-lengan, kebisingan) tidak dikelola dengan memadai. Perusahaan tidak memiliki program *surveilans* kesehatan berkala, tidak melakukan pengukuran lingkungan kerja, dan belum menetapkan spesifikasi teknis APD yang mengacu pada standar internasional (ISO 10819:2013, NIOSH N95). Ketiga, kesenjangan antara praktik aktual dengan regulasi nasional (PP No. 50/2012, Permenaker No. 5/2018) dan standar internasional (ISO 45001:2018) masih lebar pada aspek isolasi energi, pengendalian debu di sumber, standardisasi APD, serta dokumentasi kinerja K3. Dan kebutuhan kesehatan kerja yang paling mendesak adalah: (1) peralihan prioritas menuju rekayasa teknik; (2) pembangunan sistem surveilans kesehatan berbasis paparan aktual; dan (3) penguatan budaya keselamatan melalui pelatihan terjadwal.

Saran

Bagi Manajemen PT Duta Bangsa Mandiri:

1. Investasi pada rekayasa teknik
   Instalasi LOTO fisik di semua panel mesin, pemasangan *dust suppression* pada titik emisi debu, dan penyediaan *platform* permanen untuk pekerjaan ketinggian.
2. Bangun sistem surveilans kesehatan
   Lakukan pengukuran lingkungan kerja (debu, kebisingan, getaran) dua kali per tahun; wajibkan pemeriksaan fungsi paru, audiometri, dan *skrining* HAVS secara berkala.
3. Revisi standar APD dan prosedur
   Cantumkan spesifikasi teknis APD (respirator N95, sarung tangan ISO 10819, *earmuff* SNR≥25 dB) dan prosedur LOTO tertulis dalam Instruksi Kerja.
4. Bangun budaya keselamatan
   Laksanakan refresher training dua kali per tahun; terapkan program *Safety Reward*; integrasikan indikator K3 ke dalam penilaian kinerja manajer produksi.

Bagi Peneliti Selanjutnya:

1. Lakukan analisis efektivitas biaya (*cost-effectiveness analysis*) untuk setiap intervensi teknis guna memberikan justifikasi ekonomi bagi manajemen.
2. Kembangkan studi longitudinal untuk mengevaluasi efektivitas program *surveilans* kesehatan dalam menurunkan insiden penyakit akibat kerja.
3. Lakukan studi komparatif antar industri beton di Jawa Timur untuk mengidentifikasi praktik terbaik mitigasi risiko ergonomi dan teknis.

Ucapan Terimakasih

Ungkapan terima kasih yang terutama kepada ALLAH SWT yang telah meridhoi penulisan artikel ini sebagai penyelesaian Program Studi Profesi Insinyur. Ucapan terima kasih kepada Istri, Anak dan Orang Tua tercinta atas doa terbaiknya untuk penulis. Terima kasih kepada Bapak Rasional Sitepu sebagai dosen pembimbing pada Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas arahan dan bimbingannya selama ini. Terima Kasih pada PII sebagai naungan kami profesi insinyur, terima kasih kepada Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas bimbingan akademisnya, serta kepada manajemen PT Duta Bangsa Mandiri Pasuruan selalu memberikan semangat, motivasi, bantuan dalam menyelesaikan penulisan artikel.

Referensi

Dewi, M., Abidin, A. U., & Brontowiyono, W. (2022). Hazard identification, risk assessment and determining control in foundry industry. *Jurnal Teknik Lingkungan, 28*(2), 1–12. https://doi.org/10.5614/j.tl.2022.28.2.1

Gharpure, A., Heim, J. W., & Vander Wal, R. L. (2021). Characterization and hazard identification of respirable cement and concrete dust from construction activities. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 18*(19), 10126. https://doi.org/10.3390/ijerph181910126

Goetsch, D. L. (2019). *Occupational safety and health for technologists, engineers, and managers* (9th ed.). Pearson Education.

Hauke, M., Domaradzki, M., & Kowalski, R. (2021). Manual material handling in precast concrete production: Biomechanical analysis and control measures. *Applied Ergonomics, 92*, 103339. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103339

Heinrich, H. W., Petersen, D., & Roos, N. (1980). *Industrial accident prevention: A safety management approach* (5th ed.). McGraw-Hill.

International Labour Organization. (2023). *Safety and health at the heart of the future of work: Building on 100 years of experience*. ILO. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/

International Organization for Standardization. (2013). *ISO 10819:2013 Mechanical vibration and shock—*

 ISSN 2987-677x

Hand-arm vibration—Method for the measurement and evaluation of the vibration transmissibility of gloves at the palm of the hand. ISO.

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems—Requirements with guidance for use*. ISO. https://www.iso.org/standard/63787.html

Kamaludin, N. H., Jalaludin, J., & Tamrin, S. B. M. (2020). Exposure to silica, arsenic, and chromium (VI) in cement workers: A probability health risk assessment. *Aerosol and Air Quality Research, 20*, 2347–2370. https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.12.0656

Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia. (2018). *Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 5 Tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan Kerja*. Kementerian Ketenagakerjaan RI.

National Institute for Occupational Safety and Health. (2020). *Workplace safety and health topics: Construction and cement industry*. U.S. Department of Health and Human Services. https://www.cdc.gov/niosh/topics/construction/

Occupational Safety and Health Administration. (n.d.). *OSHA 29 CFR 1910.147—The control of hazardous energy (lockout/tagout)*. United States Department of Labor. https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.147

Pemerintah Republik Indonesia. (1970). *Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja*. Sekretariat Negara.

Pemerintah Republik Indonesia. (2012). *Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012 tentang Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3)*. Sekretariat Negara.

Ramli, S. (2010). *Sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja OHSAS 18001*. Dian Rakyat.

Ridley, J. (2008). *Health and safety in construction* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.

Rohman, A. F., & Putra, B. I. (2024). Analysis of occupational safety and health risks in the concrete production process using JSA and HIRARC methods. *Undergraduate Thesis Proceedings Series, 3*(9). https://doi.org/10.21070/ups.3929

Romadhoni, F. A. P., & Putra, I. N. D. P. (2025). Occupational safety and health model affecting worker performance. *Gelinkes Jurnal Kesehatan Lingkungan, 23*(3). https://doi.org/10.36568/gelinkes.v23i3.296

Tarwaka. (2015). *Keselamatan dan kesehatan kerja: Manajemen dan implementasi K3 di tempat kerja*. Harapan Press.

World Health Organization. (2022). *Occupational health: Protecting workers' health*. WHO. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/occupational-health

Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). Sage Publications.

 ISSN 2987-677x

Optimalisasi *Physical Availability* Komatsu HD785-7 melalui Pengendalian *Breakdown Unscheduled Retorque Stud Bolt Tyre* di PT Bagas Bumi Persada *Site* Tuhup

Bastian Manggala Aditama[1,2] , Hartono Pranjoto[1], Ivan Gunawan[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

[2] Departemen Plant, PT Bagas Bumi Persada Site Tuhup

✉ aditamabastian@gmail.com
✉ pranjoto@ukwms.ac.id
✉ ivangunawan@ukwms.ac.id

Studi ini membahas optimalisasi *Physical Availability* unit Komatsu HD785-7 melalui pengendalian *breakdown unscheduled retorque stud bolt tyre* di PT Bagas Bumi Persada Site Tuhup. Permasalahan utama adalah tingginya frekuensi gangguan *retorque stud bolt tyre* yang meningkatkan *downtime* dan menghambat pencapaian target kesiapan fisik unit. Tujuan studi ini adalah menganalisis pengaruh gangguan tersebut terhadap *Physical Availability*, mengidentifikasi akar penyebab, serta merumuskan tindakan pengendalian teknis dan nonteknis. Metode yang digunakan meliputi studi dokumen, observasi dan konfirmasi lapangan, analisis Pareto, analisis kondisi aktual, *relation diagram*, validasi akar penyebab, implementasi perbaikan, dan evaluasi hasil. Data Januari–Juli 2025 menunjukkan *retorque stud bolt tyre* menjadi permasalahan dominan dengan 1.128 kejadian, kontribusi 33%, dan *downtime* 1.569 jam. Pengendalian dilakukan melalui *marking*, pengendalian *RAD Tool*, kalkulasi material dan dimensi *stud bolt*, standardisasi pemasangan komponen, serta inspeksi dan *follow-up* berkelanjutan. Setelah *improvement* diterapkan, *Physical Availability* meningkat hingga 85% pada Januari 2026. Hasil studi menunjukkan bahwa pengendalian berbasis data berkontribusi terhadap peningkatan keandalan unit, penguatan profesionalisme keinsinyuran, dan keberlanjutan operasional dalam konteks SDG 9: Industri, Inovasi, dan Infrastruktur.

Kata kunci: *Physical Availability*, *Retorque Stud Bolt Tyre*, Profesionalisme Keinsinyuran, SDG 9: Industri, Inovasi, Infrastruktur

Pendahuluan

Kesiapan alat angkut merupakan faktor penting dalam mendukung kesinambungan produksi pada kegiatan penambangan terbuka. Pada PT Bagas Bumi Persada Site Tuhup, Komatsu HD785-7 digunakan sebagai salah satu unit angkut utama yang beroperasi pada kondisi kerja berat. Gangguan pada unit ini dapat berdampak terhadap pencapaian target operasional, peningkatan biaya perawatan, dan penurunan keandalan alat.

Salah satu indikator yang digunakan untuk menilai kesiapan unit adalah *Physical Availability* (PA), yaitu tingkat ketersediaan fisik alat dalam periode tertentu. *Physical Availability* digunakan sebagai indikator penting untuk menilai kesiapan alat dan efektivitas pemeliharaan (Alfarizi, Nurhakim, & Noorhakim, 2020). Semakin tinggi gangguan tidak terencana atau *breakdown unscheduled*, maka waktu unit tidak tersedia semakin besar, *downtime* meningkat, dan pencapaian PA berpotensi menurun.

Berdasarkan data Departemen Plant PT Bagas Bumi Persada periode Januari sampai Juli 2025, permasalahan *retorque stud bolt tyre* menjadi gangguan dominan pada unit HD785-7 dengan 1.128 kejadian, kontribusi 33% terhadap total permasalahan, dan *downtime* sebesar 1.569 jam. Permasalahan *retorque stud bolt tyre* tidak hanya menunjukkan adanya pekerjaan perawatan berulang, tetapi juga mengindikasikan potensi masalah pada sistem sambungan roda. Gangguan ini dapat dipengaruhi oleh ketidakterkendalian proses *torque*, kondisi *stud bolt*, *nut*, *rim*, dan *hub*, kesesuaian material serta dimensi komponen, penggunaan alat kerja, dan konsistensi inspeksi. Oleh karena itu, permasalahan ini perlu dianalisis secara sistematis agar akar penyebab dapat dikendalikan dan tindakan perbaikan yang diterapkan tidak hanya bersifat sementara.

Pengendalian gangguan berulang pada unit alat berat juga berkaitan dengan prinsip keberlanjutan atau *sustainability*. Penurunan *downtime*, pengurangan pekerjaan perawatan berulang, peningkatan keselamatan kerja, dan efisiensi penggunaan sumber daya mendukung operasional pertambangan yang lebih andal, aman, dan bertanggung jawab. Upaya ini juga mendukung keberlanjutan operasional dalam konteks SDG 9: Industri, Inovasi, dan Infrastruktur, khususnya melalui peningkatan keandalan sistem pemeliharaan, efisiensi proses industri, dan penguatan infrastruktur operasional alat berat.

Berdasarkan kondisi tersebut, studi kasus ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh gangguan *retorque stud bolt tyre* terhadap *Physical Availability* unit Komatsu HD785-7, mengidentifikasi faktor penyebab terjadinya *breakdown unscheduled*, serta merumuskan tindakan pengendalian teknis. Pengendalian difokuskan pada standardisasi proses *torque*, pengendalian penggunaan *RAD Tool*, validasi material dan dimensi *stud bolt*, pemeriksaan komponen *wheel assembly*, serta penguatan inspeksi dan *follow-up*.

 ISSN 2987-677x

Metode

Studi ini menggunakan pendekatan studi kasus deskriptif-analitis pada aktivitas pemeliharaan unit Komatsu HD785-7 di Departemen Plant PT Bagas Bumi Persada Site Tuhup. Objek kajian difokuskan pada gangguan *breakdown unscheduled retorque stud bolt tyre* yang memengaruhi pencapaian *Physical Availability* unit. Periode data utama yang digunakan adalah Januari sampai Juli 2025, sedangkan data setelah *improvement* digunakan sebagai dasar evaluasi efektivitas pengendalian.

Data yang digunakan terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi kondisi aktual dan konfirmasi lapangan pada aktivitas inspeksi roda, pekerjaan *retorque*, penggunaan alat *torque*, serta pemeriksaan komponen *wheel assembly*. Data sekunder diperoleh dari dokumen operasional Departemen Plant, data *Physical Availability*, data *breakdown unscheduled*, data *downtime*, Pareto problem HD785-7, data teknis komponen, dan dokumen *improvement* internal Departemen Plant PT Bagas Bumi Persada Site Tuhup.

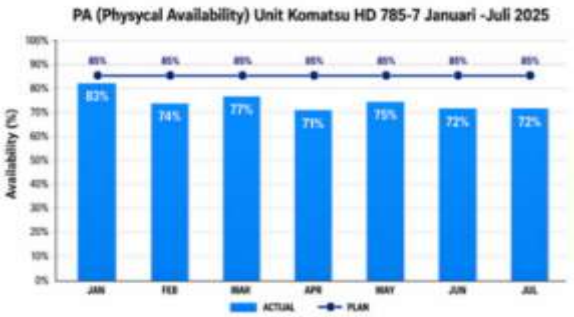
Analisis dilakukan melalui studi dokumen, observasi lapangan, analisis *Physical Availability*, Pareto, Anakonda, *Relation Diagram*, serta validasi akar penyebab. Analisis Pareto digunakan untuk menentukan prioritas masalah, sedangkan Anakonda dan *Relation Diagram* digunakan untuk mengidentifikasi keterkaitan penyebab berdasarkan aspek metode kerja, material, mesin atau komponen, dan inspeksi. Hasil validasi akar penyebab menjadi dasar penyusunan pengendalian berupa standardisasi proses *torque*, penerapan *marking*, pengendalian *RAD Tool*, pemeriksaan *wheel assembly*, validasi material dan dimensi *stud bolt*, serta penguatan inspeksi dan *follow-up*. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan kondisi sebelum dan sesudah *improvement* berdasarkan frekuensi gangguan, *downtime*, kontribusi problem pada Pareto, dan pencapaian *Physical Availability*.

Hasil Kerja

Bagian ini menjelaskan hasil pelaksanaan studi kasus yang meliputi identifikasi situasi permasalahan, analisis akar penyebab, implementasi pengendalian, evaluasi hasil perbaikan, serta implikasi keinsinyuran dan K3L. Pembahasan disusun berdasarkan data operasional Departemen Plant PT Bagas Bumi Persada Site Tuhup, hasil observasi lapangan, validasi teknis, dan evaluasi *improvement* pada unit Komatsu HD785-7.

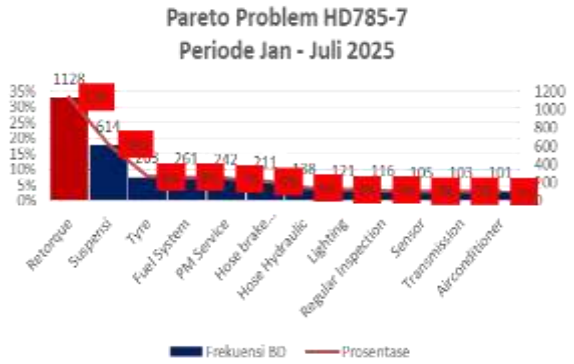
Situasi Permasalahan

Berdasarkan data Departemen Plant PT Bagas Bumi Persada Site Tuhup, pencapaian *Physical Availability* unit Komatsu HD785-7 pada periode Januari sampai Juli 2025 belum mencapai target yang ditetapkan, yaitu 85%. Kondisi ini menunjukkan bahwa masih terdapat gangguan tidak terencana atau *breakdown unscheduled* yang memengaruhi kesiapan fisik unit.



Gambar 1. Grafik *Physical Availability* Unit Komatsu HD785-7 Periode Januari–Juli 2025
Sumber: Departemen Plant PT Bagas Bumi Persada, 2025

Hasil analisis Pareto menunjukkan bahwa permasalahan *retorque stud bolt tyre* menjadi gangguan dominan pada unit Komatsu HD785-7. Permasalahan ini tercatat sebanyak 1.128 kejadian dengan kontribusi sebesar 33% terhadap total permasalahan dan menyebabkan *downtime* sebesar 1.569 jam. Tingginya frekuensi kejadian tersebut menunjukkan bahwa *retorque stud bolt tyre* bukan hanya pekerjaan perawatan berulang, tetapi merupakan permasalahan keandalan yang berdampak langsung terhadap pencapaian PA, produktivitas unit, biaya perawatan, dan keselamatan kerja.



Gambar 2. Pareto Problem Unit Komatsu HD785-7 Periode Januari–Juli 2025
Sumber: Departemen Plant PT Bagas Bumi Persada, 2025

Permasalahan *retorque stud bolt tyre* perlu diprioritaskan karena berkaitan dengan sistem roda atau *wheel assembly* yang memiliki risiko teknis dan keselamatan tinggi. Apabila gangguan ini tidak dikendalikan, potensi kelonggaran sambungan roda, peningkatan *downtime*, dan penurunan keandalan unit dapat terus berulang. Oleh karena itu, analisis akar penyebab diperlukan untuk menentukan tindakan pengendalian yang tepat dan berkelanjutan.

Analisis Akar Penyebab

Hasil analisis menunjukkan bahwa gangguan *retorque stud bolt tyre* tidak hanya disebabkan oleh baut yang mengalami kelonggaran, tetapi dipengaruhi oleh kombinasi faktor metode kerja, material, serta mesin atau komponen. Secara teknis, sambungan antara *stud bolt*, *nut*, *rim*, dan *hub* harus mampu mempertahankan gaya jepit atau *preload* selama unit beroperasi. Apabila proses *torque* tidak

 ISSN 2987-677x

terkendali, dimensi komponen tidak seragam, bidang kontak mengalami keausan, atau inspeksi tidak dilakukan secara konsisten, maka sambungan roda berpotensi mengalami kekendoran berulang. Hal ini sejalan dengan prinsip sambungan baut bahwa kestabilan sambungan dipengaruhi oleh hubungan antara *torque*, *preload*, kondisi permukaan kontak, dan karakteristik material komponen (Croccolo, De Agostinis, & Vincenzi, 2011).

Berdasarkan hasil analisis anakonda dan *relation diagram*, akar penyebab gangguan dikelompokkan ke dalam tiga aspek utama, yaitu metode, material, dan mesin atau komponen. Ringkasan faktor penyebab gangguan *retorque stud bolt tyre* ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan Faktor Penyebab Gangguan *Retorque Stud Bolt Tyre*

Faktor	Ringkasan Akar Penyebab	Arah Pengendalian
Metode	Pengendalian proses *torque*, penggunaan *RAD Tool*, penerapan *marking*, *checklist*, inspeksi, dan *follow-up* belum berjalan konsisten	Hasil pengencangan berpotensi tidak seragam dan potensi kelonggaran sulit dideteksi sejak awal
Material	Spesifikasi, kualitas, merek, dimensi, dan kesesuaian *stud bolt* serta komponen pendukung perlu divalidasi	Gaya jepit sambungan dapat menurun karena material atau dimensi komponen tidak sesuai kebutuhan kerja
Mesin/ Komponen	Terdapat kondisi fisik pada area *wheel assembly*, seperti kekendoran *nut*, keausan *mounting rim* dan *hub*, lubang *mounting* aus atau oval, serta ketidaksesuaian bidang kontak	Kestabilan sambungan roda menurun saat unit menerima beban kerja, getaran, dan pembebanan berulang

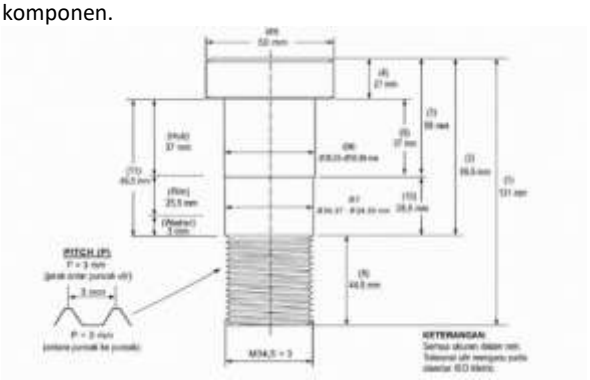
Sumber: Hasil olahan penulis berdasarkan data internal Departemen Plant PT Bagas Bumi Persada Site Tuhup dan Validasi Lapangan, 2025

Berdasarkan ringkasan tersebut, pengendalian gangguan tidak cukup dilakukan dengan *retorque* berulang. Tindakan perbaikan perlu diarahkan pada penguatan metode kerja, validasi material, pengendalian kondisi komponen, serta inspeksi berkelanjutan agar akar penyebab gangguan dapat dikendalikan secara sistematis.

Implementasi Pengendalian

Berdasarkan hasil validasi akar penyebab, tindakan pengendalian disusun untuk menekan gangguan *retorque stud bolt tyre* pada unit Komatsu HD785-7. Enam ide implementasi yang digunakan meliputi sosialisasi penggunaan *marking* dan fungsi *marking*, pengendalian penggunaan *RAD Tool* dan alat pengencangan, kalkulasi material dan dimensi *stud bolt*, standardisasi *stud bolt* dan instalasinya pada *hub* HD785-7, *re-engineering stud bolt*, serta inspeksi dan *follow-up*. Dari enam ide tersebut, kalkulasi material dan dimensi *stud bolt* dijadikan fokus utama karena berkaitan langsung dengan kesesuaian kekuatan material, dimensi komponen, dan kemampuan sambungan roda dalam mempertahankan gaya jepit selama unit beroperasi.

Sosialisasi penggunaan *marking* tetap dilakukan sebagai kontrol visual awal setelah proses *torque*. Pengendalian penggunaan *RAD Tool* dilakukan untuk memastikan alat pengencangan bekerja sesuai standar dan mencegah potensi *over torque* maupun *under torque*. Fokus pengendalian dilanjutkan pada validasi teknis *stud bolt* melalui kalkulasi material dan pemeriksaan dimensi komponen.



Gambar 3. Kalkulasi Material dan Dimensi *Stud Bolt* Sebagai Dasar Pengendalian *Retorque Stud Bolt Tyre*
Sumber: Hasil Olahan Penulis Berdasarkan Data Studi Kasus, 2026

Kalkulasi material dan dimensi *stud bolt* dilakukan untuk memastikan bahwa komponen memiliki kemampuan mekanis yang memadai dalam menerima gaya jepit awal atau *preload* akibat proses pengencangan. Berdasarkan hasil kalkulasi, gaya jepit awal yang bekerja pada *stud bolt* sebesar 268.616,93 N, luas tarik efektif ulir sebesar 788,51 mm², dan tegangan tarik kerja sebesar 340,66 MPa. Nilai tegangan kerja tersebut menjadi dasar penetapan spesifikasi minimum material, sehingga material *stud bolt* yang digunakan harus memiliki kekuatan tarik lebih besar dari tegangan kerja yang terjadi. Dengan demikian, pengendalian tidak hanya dilakukan melalui proses *retorque* berulang, tetapi juga melalui validasi material dan dimensi komponen yang berpengaruh langsung terhadap kestabilan sambungan roda.

Tabel 2. Ringkasan Kalkulasi Minimum Material *Stud Bolt*

Parameter Utama	Nilai
Preload	268.616,93 N
As	788,51 mm²
Tegangan kerja	340,66 MPa
Syarat material	UTS > 340,66 MPa

Sumber: Hasil Olahan Penulis Berdasarkan Data Studi Kasus, 2026

Material *stud bolt* harus memiliki kekuatan tarik di atas 340,66 MPa agar mampu menahan tegangan kerja akibat proses pengencangan. Nilai tersebut menjadi dasar teknis dalam validasi material, standardisasi komponen, dan pertimbangan *re-engineering stud bolt* apabila ditemukan ketidaksesuaian spesifikasi terhadap kebutuhan aktual operasi unit HD785-7. Dengan demikian, kalkulasi material dan dimensi *stud bolt* tidak hanya berfungsi sebagai verifikasi teknis, tetapi juga menjadi dasar pengambilan keputusan perbaikan yang lebih tepat dan berkelanjutan.

Hasil kalkulasi tersebut kemudian digunakan sebagai dasar untuk standardisasi *stud bolt* dan instalasinya pada *hub* HD785-7. Standardisasi dilakukan agar proses pemasangan, pemeriksaan, dan penerimaan kondisi komponen memiliki acuan yang seragam. Apabila hasil

 ISSN 2987-677x

validasi menunjukkan adanya ketidaksesuaian dimensi, kekuatan material, atau kondisi aktual komponen, maka *re-engineering stud bolt* dapat menjadi opsi teknis lanjutan. Selanjutnya, inspeksi dan *follow-up* dilakukan secara berkala untuk memastikan hasil pengendalian tetap terpantau, temuan abnormal ditindaklanjuti, dan gangguan *retorque stud bolt tyre* tidak kembali berulang.

Secara keseluruhan, implementasi pengendalian tetap mencakup enam ide utama, yaitu sosialisasi penggunaan *marking*, pengendalian penggunaan *RAD Tool*, kalkulasi material dan dimensi *stud bolt*, standardisasi *stud bolt* dan instalasinya pada *hub* HD785-7, *re-engineering stud bolt*, serta inspeksi dan *follow-up*. Keenam tindakan tersebut saling melengkapi, namun kalkulasi material dan dimensi *stud bolt* menjadi inti pengendalian karena memberikan dasar teknis terhadap kestabilan sambungan roda.

Tabel 3. Ringkasan Implementasi Pengendalian *Retorque Stud Bolt Tyre*

No.	Ide Implementasi	Posisi dalam Artikel	Tujuan Pengendalian
1	Sosialisasi penggunaan *marking* dan fungsi *marking*	Dibahas ringkas sebagai kontrol visual	Memudahkan inspeksi dan deteksi dini pergeseran *nut*
2	Pengendalian penggunaan *RAD Tool*	Dibahas ringkas sebagai pengendalian alat pengencangan	Mencegah potensi *under torque* dan *over torque*
3	Kalkulasi material dan dimensi *stud bolt*	Menjadi fokus utama validasi teknis	Memastikan kekuatan material dan dimensi *stud bolt* sesuai kebutuhan kerja
4	Standardisasi *stud bolt* dan instalasinya pada *hub* HD785-7	Dibahas sebagai tindak lanjut hasil kalkulasi	Menyeragamkan acuan pemasangan, pemeriksaan, dan penerimaan kondisi komponen
5	*Re-engineering stud bolt*	Dibahas sebagai opsi teknis lanjutan	Menyesuaikan spesifikasi *stud bolt* apabila ditemukan ketidaksesuaian terhadap kebutuhan operasi
6	Inspeksi dan *follow-up*	Dibahas sebagai pengendalian berkelanjutan	Memastikan hasil pengendalian dipantau melalui inspeksi berkala dan tindak lanjut temuan abnormal

Sumber: Hasil Olahan Penulis Berdasarkan Data Internal Departemen Plant PT Bagas Bumi Persada Site Tuhup, 2025–2026

Evaluasi Hasil Perbaikan

Evaluasi hasil perbaikan dilakukan untuk mengetahui efektivitas *improvement* terhadap penurunan gangguan *retorque stud bolt tyre* dan pencapaian *Physical Availability* unit Komatsu HD785-7. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan kondisi setelah implementasi pengendalian pada Desember 2025 dan Januari 2026. Parameter evaluasi meliputi frekuensi gangguan, *downtime*, kontribusi problem pada Pareto, dan pencapaian *Physical Availability*.

Tabel 4. Ringkasan Evaluasi Hasil *Improvement Retorque Stud Bolt Tyre*

Parameter Evaluasi	Desember 2025	Januari 2026	Dampak *Improvement*
Frekuensi *retorque stud bolt tyre*	52 kejadian	34 kejadian	Turun 18 kejadian atau 34,6%
Downtime	177 jam	47 jam	Turun 130 jam atau 73,4%
Kontribusi pada Pareto	19%	14%	Turun 5 poin persentase
PA	83%	85%	Mencapai target 85%

Sumber: Data evaluasi *improvement* internal Departemen Plant PT Bagas Bumi Persada *Site* Tuhup, 2025–2026

Berdasarkan Tabel 4, frekuensi gangguan *retorque stud bolt tyre* menurun dari 52 kejadian pada Desember 2025 menjadi 34 kejadian pada Januari 2026. Penurunan ini menunjukkan bahwa tindakan pengendalian mulai memberikan dampak terhadap pengurangan kejadian berulang. Selain itu, *downtime* juga menurun dari 177 jam menjadi 47 jam, sehingga waktu unit tidak tersedia akibat gangguan tersebut menjadi lebih rendah. Kontribusi problem *retorque stud bolt tyre* pada Pareto juga menurun dari 19% menjadi 14%. Kondisi ini menunjukkan bahwa dominasi gangguan terhadap total problem HD785-7 mulai berkurang setelah dilakukan pengendalian. Dampak akhir dari penurunan frekuensi dan *downtime* tersebut terlihat pada peningkatan *Physical Availability* dari 83% pada Desember 2025 menjadi 85% pada Januari 2026, sehingga target Plant sebesar 85% dapat tercapai.

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa pengendalian *retorque stud bolt tyre* memberikan dampak positif terhadap peningkatan keandalan dan kesiapan fisik unit Komatsu HD785-7. Penurunan frekuensi gangguan menunjukkan bahwa akar penyebab mulai terkendali, sedangkan penurunan *downtime* menunjukkan bahwa waktu perbaikan akibat gangguan tersebut semakin berkurang. Dengan demikian, implementasi pengendalian berkontribusi terhadap pencapaian *Physical Availability* dan mendukung kinerja pemeliharaan yang lebih efektif.

Implikasi Keinsinyuran dan K3L

Implikasi keinsinyuran dalam studi kasus ini mencakup aspek teknis, K3L, kode etik dan etika profesi, profesionalisme keinsinyuran, serta keberlanjutan operasional. Dari aspek teknis, permasalahan *retorque stud bolt tyre* pada unit Komatsu HD785-7 berkaitan dengan keandalan sambungan baut pada sistem roda. Sambungan antara *stud bolt*, *nut*, *washer*, *rim*, dan *hub* harus mampu mempertahankan gaya jepit atau *preload* selama unit beroperasi. Ketidaksesuaian proses *torque*, kondisi permukaan kontak, dimensi komponen, atau kualitas material dapat menyebabkan penurunan gaya jepit dan memicu kebutuhan *retorque* berulang. Oleh karena itu, pengendalian diarahkan pada standardisasi proses kerja, validasi material dan dimensi komponen, pengendalian alat *torque*, serta inspeksi berkelanjutan agar keandalan sistem roda tetap terjaga.

Dari aspek K3L, pekerjaan pada sistem roda alat berat memiliki potensi bahaya tinggi karena melibatkan komponen berat, penggunaan alat *torque*, area kerja terbatas, serta risiko *line of fire*. Oleh karena itu,

 ISSN 2987-677x

pengendalian risiko perlu dilakukan melalui identifikasi bahaya dan penilaian risiko menggunakan pendekatan HIRA atau IBPR. Risiko utama pada pekerjaan *retorque stud bolt tyre* meliputi potensi terjepit, tertimpa komponen, terkena reaksi alat *torque*, berada pada area *line of fire*, serta bahaya akibat unit atau komponen yang belum diamankan dengan benar. Pengendalian dilakukan melalui penerapan prosedur kerja aman, penggunaan *wheel chock*, *safety cone*, *barricade*, *danger tag*, serta penerapan *Lock Out Tag Out* apabila diperlukan. Dengan demikian, HIRA/IBPR berperan sebagai dasar untuk memastikan pekerjaan pengendalian *retorque stud bolt tyre* dilakukan secara aman, terukur, dan sesuai dengan prinsip K3L.

Dari aspek kode etik, etika profesi, dan profesionalisme keinsinyuran, penyelesaian masalah dilakukan melalui pendekatan berbasis data dalam mengidentifikasi masalah, menganalisis akar penyebab, menentukan tindakan pengendalian, dan mengevaluasi hasil perbaikan. Insinyur berkewajiban memastikan bahwa keputusan teknis tidak hanya berorientasi pada pencapaian target operasional, tetapi juga mempertimbangkan keselamatan kerja, keandalan alat, efisiensi pemeliharaan, dan tanggung jawab profesional. Upaya pengurangan *downtime*, peningkatan keandalan unit, efisiensi proses pemeliharaan, dan pengendalian risiko kerja juga menunjukkan kontribusi terhadap keberlanjutan operasional dalam konteks SDG 9: Industri, Inovasi, dan Infrastruktur.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi kasus, permasalahan *breakdown unscheduled retorque stud bolt tyre* merupakan salah satu gangguan dominan yang memengaruhi pencapaian *Physical Availability* unit Komatsu HD785-7 di PT Bagas Bumi Persada Site Tuhup. Pada periode Januari sampai Juli 2025, gangguan ini tercatat sebanyak 1.128 kejadian dengan kontribusi 33% terhadap total permasalahan dan menyebabkan *downtime* sebesar 1.569 jam. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa *retorque stud bolt tyre* bukan hanya pekerjaan perawatan berulang, tetapi merupakan permasalahan keandalan yang perlu dikendalikan secara sistematis.

Hasil analisis menunjukkan bahwa akar penyebab gangguan berkaitan dengan aspek metode kerja, kondisi material, mesin atau komponen, penggunaan alat *torque*, serta pelaksanaan inspeksi dan *follow-up*. Tindakan pengendalian dilakukan melalui sosialisasi penggunaan *marking*, pengendalian penggunaan *RAD Tool*, kalkulasi material dan dimensi *stud bolt*, standardisasi *stud bolt* dan instalasinya pada *hub* HD785-7, *re-engineering stud bolt*, serta inspeksi dan *follow-up*. Dari rangkaian pengendalian tersebut, kalkulasi material dan dimensi *stud bolt* menjadi dasar teknis utama karena memastikan kesesuaian kekuatan material, dimensi, dan kemampuan komponen dalam mempertahankan gaya jepit sambungan roda.

Setelah *improvement* diterapkan, frekuensi gangguan *retorque stud bolt tyre* menurun dari 52 kejadian pada Desember 2025 menjadi 34 kejadian pada Januari 2026. *Downtime* juga menurun dari 177 jam menjadi 47 jam, kontribusi permasalahan pada Pareto turun dari 19% menjadi 14%, dan *Physical Availability* unit mencapai target sebesar 85%. Dengan demikian, pengendalian *retorque stud bolt tyre* terbukti berkontribusi terhadap peningkatan keandalan unit, pengurangan *downtime*, serta pencapaian kinerja pemeliharaan yang lebih baik.

Sebagai tindak lanjut, pengendalian yang telah diterapkan perlu dipertahankan melalui inspeksi berkala, pencatatan hasil pemeriksaan dalam *checklist maintenance*, verifikasi kondisi *stud bolt*, *nut*, *washer*, *rim*, dan *hub*, serta evaluasi berkala terhadap penggunaan *RAD Tool* dan hasil *retorque*. Konsistensi *follow-up* terhadap temuan abnormal diperlukan agar hasil *improvement* tidak bersifat sementara, tetapi menjadi bagian dari sistem pengendalian *maintenance* yang berkelanjutan, aman, dan sesuai dengan prinsip profesionalisme keinsinyuran.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas dukungan akademik dalam penyusunan artikel ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, dan pendampingan selama pelaksanaan studi kasus. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Section Tyre dan Departemen Plant PT Bagas Bumi Persada Site Tuhup yang telah memberikan dukungan data, informasi teknis, dan kesempatan dalam pelaksanaan studi kasus pada unit Komatsu HD785-7.

Referensi

Accuride Corporation. (2020). *Rim/wheel safety and service manual*. Accuride Corporation.

Alfarizi, M. A., Nurhakim, & Noorhakim, R. (2020). Hubungan *physical availability* dan *used of availability* terhadap *overburden removal* di PT Semesta Centramas. *Jurnal Himasapta, 5*(2), 29–39.

Croccolo, D., De Agostinis, M., & Vincenzi, N. (2011). Failure analysis of bolted joints: Effect of friction coefficients in torque–preloading relationship. *Engineering Failure Analysis, 18*(1), 364–373.

Departemen Plant PT Bagas Bumi Persada. (2025–2026). *Data operasional, dokumentasi teknis, dan evaluasi improvement retorque stud bolt tyre unit Komatsu HD785-7*. PT Bagas Bumi Persada Site Tuhup.

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization.

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2018). *Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik*.

Republik Indonesia. (1970). *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja*.

Republik Indonesia. (2012). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 50 Tahun 2012 tentang Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja*.

 ISSN 2987-677x

Implementasi *Single Varnish* Sebagai Solusi Pengurangan *Defect Scratch* dan Efisiensi Biaya pada Proses *Hot Stamping Tube* Plastik Diameter 40 di PT Lamipak Primula Indonesia

Noviastuti[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ mariaagnesnoviastuti@gmail.com

PT Lamipak Primula Indonesia merupakan perusahaan yang bergerak di bidang manufaktur kemasan *tube* plastik. Salah satu permasalahan yang ditemukan pada proses produksi *tube* plastik diameter 40 adalah munculnya *defect scratch* pada proses *hot stamping*. *Defect* tersebut menyebabkan penurunan kualitas visual produk serta meningkatkan risiko produk *reject*. Berdasarkan hasil investigasi, permasalahan dipengaruhi oleh penurunan performa *varnish Glossy* SGC akibat masa simpan yang panjang sehingga proses *curing* tidak berlangsung optimal. Studi kasus ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas penggunaan *varnish Schekolin Glossy Hot Stamping* sebagai pengganti sistem *double varnish*. Metode yang digunakan meliputi observasi proses produksi, analisis data *reject*, evaluasi konsumsi varnish, analisis sebab-akibat menggunakan metode *Fishbone Diagram*, serta analisis biaya untuk membandingkan alternatif solusi yang tersedia. Hasil studi menunjukkan bahwa penggunaan *varnish Schekolin* mampu memberikan kualitas permukaan yang memenuhi persyaratan proses *hot stamping* dengan tingkat ketahanan terhadap *scratch* yang baik. Selain itu, penggunaan *single varnish Schekolin* mampu menurunkan biaya pemakaian *varnish* dari Rp69,18 per pcs menjadi Rp38,35 per pcs. Implementasi solusi tersebut menghasilkan estimasi penghematan biaya sebesar Rp369.937.901 per tahun atau sekitar 44,56% dibandingkan penggunaan sistem *double varnish*.

Kata Kunci: *hot stamping, varnish, scratch, quality improvement, cost reduction, continuous improvement*

Pendahuluan

PT Lamipak Primula Indonesia merupakan perusahaan manufaktur kemasan *tube* plastik. Pada proses *hot stamping tube* plastik diameter 40 ditemukan *defect scratch* yang berpotensi menurunkan kualitas produk dan meningkatkan *reject*. Permasalahan ini terkait penggunaan *varnish Glossy* SGC yang performanya menurun akibat masa simpan yang panjang. Untuk mengatasi masalah tersebut digunakan *double varnish*, namun menyebabkan kenaikan biaya dan kompleksitas proses. Oleh karena itu, dilakukan evaluasi penggunaan *varnish Schekolin* sebagai *single varnish* untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi.

Metode

Analisis Deskriptif

Analisis deskriptif digunakan untuk menggambarkan kondisi aktual proses produksi, jenis *defect* yang terjadi, serta dampaknya terhadap kualitas produk dan biaya produksi. Analisis ini dilakukan berdasarkan data produksi, data *reject*, dan hasil observasi lapangan.

Analisis Sebab-Akibat (*Fishbone Analysis*)

Fishbone Analysis digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab munculnya *defect scratch* pada produk tube plastik. Faktor yang dianalisis meliputi:

- *Man* (Operator)
- *Machine* (Mesin)
- *Material* (Varnish)
- *Method* (Metode Kerja)
- *Environment* (Lingkungan)

Metode ini membantu menentukan faktor dominan yang menyebabkan terjadinya *defect* sehingga dapat ditetapkan tindakan perbaikan yang tepat.

Analisis Komparatif

Analisis komparatif digunakan untuk membandingkan performa beberapa alternatif *varnish* yang digunakan dalam proses produksi. Perbandingan dilakukan berdasarkan:

- Tingkat *reject scratch*
- Konsumsi *varnish*
- Kemudahan proses
- Jumlah proses produksi
- Kebutuhan *inventory*
- Biaya pemakaian *varnish*

Cost Benefit Analysis

Cost Benefit Analysis digunakan untuk menghitung manfaat ekonomi yang diperoleh dari implementasi *varnish Schekolin* dibandingkan dengan penggunaan *double varnish*. Parameter yang dianalisis meliputi:

- Biaya pemakaian *varnish* per pcs
- Estimasi biaya bulanan
- Estimasi biaya tahunan
- Potensi penghematan biaya

Hasil analisis digunakan sebagai dasar dalam menentukan alternatif solusi yang memberikan manfaat teknis dan ekonomi terbaik bagi perusahaan.

Evaluasi dan Standarisasi

Tahap akhir dilakukan dengan mengevaluasi seluruh hasil trial dan analisis yang telah dilakukan. Apabila

 ISSN 2987-677x

alternatif yang dipilih memenuhi persyaratan kualitas dan memberikan manfaat ekonomi yang signifikan, maka dilakukan standarisasi sebagai material yang direkomendasikan untuk proses produksi berikutnya. *Fishbone Diagram* atau Diagram Ishikawa merupakan alat analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab suatu permasalahan. Penyebab masalah biasanya dikelompokkan menjadi:

- *Man* (manusia)
- *Machine* (mesin)
- *Material* (material)
- *Method* (metode)
- *Environment* (lingkungan)

Metode ini digunakan dalam studi kasus untuk mengidentifikasi faktor penyebab munculnya *defect scratch* pada proses *hot stamping.*

Hasil Kerja

Analisis *Defect Scratch*

Scratch merupakan goresan yang muncul pada permukaan produk akibat gesekan atau kontak dengan benda lain sehingga menyebabkan tampilan permukaan menjadi tidak rata dan menurunkan kualitas visual produk. Data produksi menunjukkan bahwa penggunaan *varnish Glossy* SGC menghasilkan *reject scratch* sebesar:

Tabel 1. Data *Reject Scratch* Product *Existing*

Produk	Produksi	*Reject Scratch*	*% Reject*
Safi Perfect White Micellar Gel Vit C 100 gr	80.847	6.945	8,59%
Safi Perfect White Light Cleanser 100 gr	67.944	2.086	3,07%
Safi Ultimate Bright Deep Export 100 gr	30.396	596	1,96%
Total	**179.187**	**9.627**	**5,37%**

Persentase *reject* sebesar 5,37% menunjukkan bahwa *defect scratch* memiliki dampak signifikan terhadap kualitas produk.

Analisis Sebab Akibat

Berdasarkan pendekatan *Fishbone Diagram*, faktor-faktor penyebab masalah dapat dikelompokkan sebagai berikut:



Gambar 1. *Fishbone Diagram* Penyebab *Defect Scratch*

Material

- Varnish SGC mendekati/melewati masa berlaku.
- MOQ tinggi.
- Material impor membutuhkan persediaan besar.
- Performa *curing* menurun.

Machine

- Efektivitas lampu UV harus dijaga.
- Kebersihan *reflector* mempengaruhi *curing*.

Method

- Penggunaan *double varnish* menambah kompleksitas proses.
- Potensi variasi proses meningkat.

Man

- Diperlukan *monitoring* parameter secara konsisten.
- Operator harus memahami karakteristik varnish.

Environment

- Penggunaan *varnish* lebih banyak meningkatkan potensi limbah B3.

Analisis *Cost*

Penggunaan *double varnish* menyebabkan peningkatan konsumsi *varnish* dari 18,52 kg menjadi 30,38 kg. Biaya pemakaian varnish meningkat dari: Rp 7.638.964 menjadi Rp 10.093.223. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa solusi *double varnish* efektif secara kualitas namun kurang efisien secara ekonomi.

Alternatif Solusi

Berdasarkan hasil analisis, terdapat tiga alternatif solusi yang dapat dipertimbangkan.

Alternatif 1: Tetap Menggunakan *Varnish* SG

Kelebihan:

- Tidak memerlukan perubahan proses
- Operator sudah familiar

Kekurangan:

- Potensi *scratch* tinggi
- Risiko material *expired*
- MOQ tinggi
- Bergantung pada impor

Alternatif 2: Menggunakan *Double Varnish* (SGC + E50)

Kelebihan:

- *Scratch* dapat dikurangi
- Kualitas produk lebih baik

Kekurangan:

- Konsumsi *varnish* meningkat
- Biaya produksi meningkat
- *Inventory* lebih kompleks
- Potensi proses menjadi lebih panjang

Alternatif 3: Menggunakan *Single Varnish Schekolin*

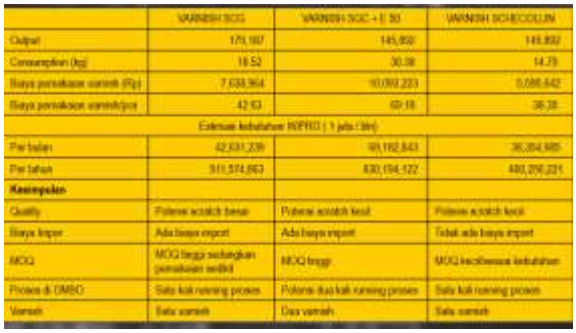
Kelebihan:

- *Scratch* rendah
- Konsumsi varnish lebih rendah
- Tidak memerlukan *double varnish*
- Tidak ada biaya impor
- MOQ lebih fleksibel
- *Inventory* lebih sederhana

Kekurangan:

- Membutuhkan proses *trial* dan validasi awal.

 ISSN 2987-677x



Gambar 2. Perbandingan Sistem *Double Varnish* & *Single Varnish*

Rekomendasi Solusi

Berdasarkan hasil *trial* dan evaluasi teknis, penggunaan *Varnish Schekolin Glossy Hot Stamping* 85-601072.3.2360 direkomendasikan sebagai solusi terbaik.



Gambar 3. Hasil Pengetesan dengan *Varnish Schekolin Glossy Hot Stamping* 85-601072.3.2360



Gambar 4. Tube Tanpa *Scracth* Hasil *Trial* dengan *Schekolin Glossy Hot Stamping* 85-601072.3.2360

Tabel 2. Perbandingan Hasil *Varnish* Menunjukkan:

Parameter	*Double Varnish*	*Schekolin*
Konsumsi (kg)	30,38	14,79
Cost/Pcs (Rp)	69,18	38,35
Jumlah Varnish	2	1
Potensi Scratch	Rendah	Rendah
Biaya Import	Ada	Tidak Ada
MOQ	Tinggi	Fleksibel

Tabel 3. Perbandingan Konsumsi Varnish

Metode	Konsumsi (kg)
SGC	18,52
SGC + E50	30,38
Schekolin	14,79

Tabel 4. Perbandingan Biaya *Varnish*

Metode	Cost/Pcs (Rp)
SGC	42,63
SGC + E50	69,18
Schekolin	38,35

Tabel 5. Estimasi Biaya Tahunan

Double varnish	Rp 830.194.122
Schekolin	Rp 460.256.221

Sehingga diperoleh estimasi penghematan sebesar: Rp 369.937.901 per tahun atau sekitar 44,56%. Selain memberikan manfaat ekonomi, penggunaan *varnish Schekolin* juga mampu menyederhanakan proses produksi, mengurangi risiko penggunaan material *expired*, serta mempermudah pengendalian *inventory*.



Gambar 5. Standarisasi dan Tindak Lanjut Atas *Improvement*

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan mengenai implementasi *single varnish* pada proses *hot stamping tube* plastik diameter 40 di PT Lamipak Primula Indonesia, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Permasalahan utama yang ditemukan pada proses *hot stamping* adalah munculnya *defect scratch* pada permukaan produk yang menyebabkan penurunan kualitas visual dan peningkatan jumlah produk *reject*. Hasil analisis menunjukkan bahwa salah satu faktor dominan yang memengaruhi munculnya defect tersebut adalah penurunan performa *varnish Glossy SGC* akibat masa simpan yang panjang serta tingginya *minimum order quantity* (MOQ) yang menyebabkan risiko penggunaan material mendekati atau melewati masa berlaku.
2. Penggunaan sistem *double varnish*, yaitu kombinasi *varnish Glossy* SGC dan *varnish* E50 *High Resistance*, mampu mengurangi potensi *defect scratch* dan meningkatkan kualitas hasil *hot stamping*. Namun demikian, solusi tersebut menyebabkan peningkatan konsumsi material, biaya produksi, kompleksitas pengendalian *inventory*, serta potensi bertambahnya aktivitas proses produksi.
3. Berdasarkan hasil *trial* dan evaluasi, *varnish Schekolin Glossy Hot Stamping* 85-601072.3.2360 terbukti mampu memenuhi persyaratan kualitas proses *hot stamping* dengan tingkat ketahanan terhadap *scratch* yang baik. Penggunaan *varnish* ini memungkinkan proses dilakukan menggunakan *single varnish* tanpa mengurangi kualitas produk yang dihasilkan.
4. Implementasi *varnish Schekolin* memberikan manfaat teknis dan ekonomis yang signifikan. Biaya pemakaian varnish dapat diturunkan dari Rp69,18

 ISSN 2987-677x

per pcs menjadi Rp38,35 per pcs dengan estimasi penghematan biaya sebesar Rp369.937.901 per tahun atau sekitar 44,56% dibandingkan penggunaan sistem *double varnish*.

5. Penggantian *double varnish* menjadi *single varnish* tidak hanya memberikan efisiensi biaya, tetapi juga mendukung penyederhanaan proses produksi, pengurangan penggunaan material kimia, penurunan potensi limbah B3, serta peningkatan efektivitas pengendalian persediaan material. Dengan demikian, solusi yang diterapkan sejalan dengan prinsip *continuous improvement* dan praktik keinsinyuran yang berorientasi pada kualitas, efisiensi, keselamatan, dan keberlanjutan.

Ucapan Terimakasih

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa atas penyertaan dan berkat-Nya selama proses penyusunan laporan.
2. Bapak Ir. Andrew Joewono, S.T., M.T., IPU., ASEAN Eng. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan masukan selama penyusunan studi kasus.
3. Manajemen dan rekan kerja di PT Lamipak Primula Indonesia yang telah memberikan kesempatan, data, serta dukungan dalam pelaksanaan proyek perbaikan yang menjadi objek artikel ini .
4. Keluarga dan seluruh pihak yang telah memberikan dukungan moral maupun motivasi selama proses perkuliahan dan penyusunan artikel.

Penulis menyadari bahwa artikel ini masih memiliki keterbatasan dan jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan di masa mendatang.

Referensi

Association for Print Technologies. (2021). *Printing and finishing process guidelines*. Pittsburgh: APTech.

Continuous Improvement. (1986). *Kaizen: The key to Japan's competitive success*. New York: Random House.

Fundamentals of quality control and improvement. (2014). (4th ed.). New York: Wiley.

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001:2015 quality management systems—Requirements*. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14001:2015 environmental management systems—Requirements with guidance for use*. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 45001:2018 occupational health and safety management systems—Requirements with guidance for use*. Geneva: ISO.

Introduction to statistical quality control. (2019). (8th ed.). Hoboken: Wiley.

Ishikawa, K. (1986). *Guide to quality control*. Tokyo: Asian Productivity Organization.

Juran's Quality Handbook. (2017). *Juran's quality handbook: The complete guide to performance excellence* (7th ed.). New York: McGraw-Hill Education.

National Safety Council. (2021). *Accident prevention manual for business and industry*. Illinois: NSC.

PT Lamipak Primula Indonesia. (2022a). *Project report: Change double varnish to single varnish for hot stamping tube diameter 40*. Internal Engineering Improvement Project.

PT Lamipak Primula Indonesia. (2022b). *Production and quality monitoring data of hot stamping tube diameter 40*. Internal Document.

PT Lamipak Primula Indonesia. (2022c). *Trial report of Schekolin glossy hot stamping varnish*. Internal Technical Report.

Republik Indonesia. (1970). *Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja*. Jakarta.

Republik Indonesia. (2009). *Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Jakarta.

Republik Indonesia. (2012). *Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012 tentang Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3)*. Jakarta.

Society of Plastics Engineers. (2020). *Plastic packaging design and manufacturing practices*. Connecticut: SPE Publications.

The Toyota Way. (2004). *The Toyota Way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*. New York: McGraw-Hill.

 ISSN 2987-677x

Analisis Variasi Metode Kerja dalam Penghentian Pengisian Bubuk Kopi Saat Pergantian *Roll* dan Pengaruhnya Terhadap Peningkatan *Waste* pada Lini *Packing*

John Robert Daniel[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ johnrobert7456@gmail.com

Lini *packing* kopi merupakan tahapan akhir produksi yang bersifat kontinu dan kritis. Variasi metode kerja pada proses penghentian pengisian bubuk kopi saat pergantian *roll* kemasan berpotensi menimbulkan pemborosan (*waste*) material berupa kemasan kosong yang melebihi kebutuhan minimal proses. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi penyebab variasi metode kerja, menganalisis dampaknya terhadap waste kemasan kosong, dan merumuskan solusi perbaikan. Metode yang digunakan adalah observasi lapangan (work study) dan analisis akar masalah dengan pendekatan 5 *Why Analysis*. Hasil observasi menunjukkan bahwa *helper* cenderung menghentikan proses pengisian lebih awal dari titik yang seharusnya akibat tidak adanya parameter operasional terukur dalam SOP. Penyebab utama variasi adalah perbedaan persepsi antar helper dalam menginterpretasikan prosedur yang berlaku. Solusi yang diusulkan meliputi penetapan standar jumlah maksimal kemasan kosong per pergantian *roll*, pelaksanaan *briefing* operasional rutin, serta *monitoring waste* secara berkala. Pendekatan ini diharapkan mengurangi variasi proses dan meningkatkan efisiensi lini *packing*.

Kata kunci: *Lean Manufacturing*; Variasi Metode Kerja; *Waste Reduction*; 5 *Why Analysis*; Lini *Packing*

Pendahuluan

Industri pengolahan kopi di Indonesia merupakan salah satu sektor agroindustri yang memiliki peran strategis dalam peningkatan nilai tambah komoditas dan pemenuhan permintaan pasar domestik maupun ekspor. Dalam menghadapi persaingan industri yang semakin ketat, perusahaan dituntut untuk menjaga konsistensi kualitas produk sekaligus meningkatkan efisiensi operasional di seluruh rantai produksi. Lini *packing* merupakan tahapan akhir proses produksi sebelum produk didistribusikan ke pasar. Pada lini ini, proses bersifat kontinu dan sangat bergantung pada sinkronisasi antar stasiun kerja. Salah satu aktivitas kritis adalah proses penghentian pengisian bubuk kopi saat pergantian *roll* kemasan. Variasi dalam metode kerja ini berpotensi menimbulkan pemborosan (*waste*) berupa kemasan kosong yang melebihi kebutuhan minimal proses.

Lean Manufacturing menekankan eliminasi segala bentuk pemborosan *non-value-added* dari proses produksi. Konsep ini berasal dari *Toyota Production System* (TPS) yang bertujuan meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya (Deshmukh et al., 2022). *Waste* dalam terminologi *lean* mencakup *overproduction*, *waiting,* transportation, *defects*, dan *excessive inventory* (Habib et al., 2023). Ketidakkonsistenan dalam pelaksanaan SOP oleh operator merupakan salah satu penyebab utama meningkatnya variasi proses (Anderson, 2017).

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi penyebab variasi metode kerja pada proses penghentian pengisian bubuk kopi saat pergantian *roll* kemasan, (2) menganalisis dampak variasi tersebut terhadap timbulnya *waste* kemasan kosong, dan (3) merumuskan solusi perbaikan untuk meningkatkan efisiensi lini *packing*.

Metode

Penelitian dilaksanakan di lini *packing* sebuah perusahaan pengolahan kopi berskala nasional di Jawa Timur. Metode yang digunakan adalah pendekatan kualitatif deskriptif melalui observasi lapangan langsung (*work study*). Variabel yang diamati meliputi metode kerja operator dan *helper* saat pergantian *roll*, waktu penghentian pengisian relatif terhadap titik sambungan *roll*, serta jumlah waste kemasan kosong per siklus pergantian.

Analisis akar masalah dilakukan menggunakan metode 5 *Why Analysis* untuk menelusuri penyebab utama variasi secara sistematis (Susendi et al., 2021). Tahapan penelitian meliputi: (a) observasi lapangan dan pencatatan aktivitas, (b) pengumpulan data *waste* per siklus, (c) analisis kesenjangan antara kondisi aktual dan SOP, (d) analisis akar masalah dengan 5 *Why*, dan (e) perumusan rekomendasi perbaikan.

Hasil Kerja

Kondisi Aktual dan Variasi Metode Kerja

Berdasarkan hasil observasi, ditemukan bahwa proses penghentian pengisian bubuk kopi saat pergantian *roll* tidak dilaksanakan secara konsisten antar *helper*. Meskipun perusahaan telah memiliki SOP dan titik sambungan *roll* telah diberi tanda visual (solasi), *helper* cenderung menghentikan proses lebih awal dari titik yang seharusnya sebagai bentuk antisipasi kesalahan. Perilaku ini menyebabkan jumlah kemasan kosong yang dihasilkan lebih banyak dari kebutuhan minimal proses dan berfluktuasi antar siklus

 ISSN 2987-677x

pergantian. Temuan ini sejalan dengan Erdhianto (2021) yang menyatakan bahwa ketidakkonsistenan dalam penerapan prosedur kerja merupakan faktor utama meningkatnya pemborosan pada lini pengemasan produk. Kondisi ini mencerminkan adanya *gap* antara SOP tertulis dan implementasi aktual di lapangan, yang dipengaruhi oleh perbedaan pengalaman, tingkat kehati-hatian, dan pemahaman masing-masing *helper* terhadap prosedur yang berlaku.

Analisis Akar Masalah (5 Why Analysis)

Analisis 5 Why menghasilkan penelusuran akar masalah sebagai berikut: (1) Mengapa banyak kemasan kosong? Helper menghentikan pengisian terlalu awal. (2) Mengapa helper menghentikan terlalu awal? Khawatir produk masuk ke area sambungan *roll*. (3) Mengapa ada kekhawatiran tersebut? Tidak ada parameter terukur kapan tepatnya proses harus dihentikan. (4) Mengapa tidak ada parameter terukur? SOP tidak mencantumkan standar jumlah kemasan kosong yang diizinkan. (5) Mengapa SOP tidak mencantumkan standar tersebut? Penetapan standar operasional belum dilakukan secara kuantitatif.

Akar masalah utama yang teridentifikasi adalah absennya parameter operasional terukur dalam SOP, bukan semata-mata faktor perilaku operator. Hal ini konsisten dengan temuan Fitriani dan Rochmoeljati (2023) yang menunjukkan *waste* industri pengolahan produk pangan seringkali bersumber dari ketidakjelasan standar kerja kuantitatif. Variasi antar individu dalam menginterpretasikan SOP yang bersifat kualitatif menjadi pemicu utama inkonsistensi metode kerja.

Solusi Perbaikan yang Diusulkan

Berdasarkan hasil analisis, tiga solusi perbaikan diusulkan: Pertama, penetapan standar jumlah maksimal kemasan kosong per siklus pergantian *roll* sebagai parameter operasional terukur. Dengan adanya batas kuantitatif ini, *helper* memiliki acuan yang jelas sehingga variasi antar individu dapat diminimalkan. Kedua, pelaksanaan *briefing* operasional rutin sebelum produksi untuk menyamakan persepsi antar operator dan *helper* terkait metode kerja yang benar. Ketiga, *monitoring* dan pencatatan jumlah *waste* per pergantian *roll* secara berkala sebagai mekanisme kontrol dan dasar evaluasi *continuous improvement* (Deshmukh et al., 2022).

Solusi ini bersifat praktis dan dapat diimplementasikan segera tanpa memerlukan investasi tambahan. Pendekatan ini menekankan perbaikan pada aspek manusia (*human factor*) dan standarisasi proses, sesuai dengan prinsip *lean manufacturing* yang memprioritaskan penyempurnaan metode kerja sebelum penambahan sumber daya (Habib et al., 2023). Penguatan implementasi SOP melalui parameter terukur terbukti efektif mengurangi variasi dan *defect* pada penelitian-penelitian serupa di industri manufaktur (Fatma et al., 2022).. Ukuran gambar dengan *layout* dua kolom lebar maksimum adalah 7 cm. Jika lebih dari itu, maka harus dibuat dalam 1 kolom.

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi bahwa variasi metode kerja pada proses penghentian pengisian bubuk kopi saat pergantian *roll* kemasan disebabkan oleh tidak adanya parameter operasional terukur dalam SOP, sehingga timbul perbedaan persepsi antar *helper*. Kondisi ini mengakibatkan jumlah kemasan kosong yang melebihi kebutuhan minimal proses dan berfluktuasi antar siklus. Solusi berupa penetapan standar kuantitatif, *briefing* operasional rutin, dan *monitoring waste* berkala merupakan pendekatan yang tepat untuk meminimalkan variasi proses dan meningkatkan efisiensi lini *packing* secara keseluruhan.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Sumber Kopi Prima atas izin dan dukungan selama pelaksanaan praktik keinsinyuran, serta kepada Ir. Andrew Joewono, S.T., M.T., IPU., ASEAN Eng., APEC Eng. selaku dosen pembimbing dan Ir. Didien Kurniawan, S.T., IPM. selaku pembimbing lapangan.

Referensi

Anderson, D. R. (2017). Introduction to Root Cause Analysis in Manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management, 12*(2), 101–113.

Deshmukh, M., Gangele, A., Gope, D. K., & Dewangan, S. (2022). Study and implementation of lean manufacturing strategies: A literature review. *Materials Today: Proceedings, 62*, 1489–1495.

Erdhianto, Y. (2021). Quality Control Analysis to reduce the number of defects in the packaging of PG Kremboong Sugar Products using seven tools method. *Tibuana Journal of Applied Industrial Engineering, 4*(1), 28–35.

Fatma, N. F., Ponda, H., & Sutisna, E. (2022). Penerapan lean manufacturing dengan metode Value Stream Mapping untuk mengurangi waste pada proses pengecekan material bahan baku ke lini produksi. *Journal Industrial Manufacturing, 7*(1), 41–54.

Fitriani, E., & Rochmoeljati, R. (2023). Waste analysis of sugar production process using lean six sigma method. *IJIEM – Indonesian Journal of Industrial Engineering and Management, 4*(3), 406.

Habib, M. A., Rizvan, R., & Ahmed, S. (2023). Implementing lean manufacturing for improvement of operational performance in a labeling and packaging plant: A case study in Bangladesh. *Results in Engineering, 17*, 100818.

Susendi, N., Suparman, A., & Sopyan, I. (2021). Kajian metode root cause analysis yang digunakan dalam manajemen risiko di industri farmasi. *Majalah Farmasetika, 6*(4), 310–321.

ISSN 2987-677x

Analisis dan Optimalisasi Sistem Informasi *Collection* dalam Menekan Kredit Bermasalah pada PT Bank Mandiri (Persero) Tbk

Dramendra Pasaribu[1]

[1] Teknik Informatika, Teknik, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya, Indonesia

✉ evanddendra@gmail.com

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengoptimalkan sistem informasi *collection* dalam menekan kredit bermasalah pada PT Bank Mandiri (Persero) Tbk. Kredit bermasalah merupakan tantangan signifikan bagi kinerja perbankan, sehingga efektivitas sistem pengelolaan koleksi sangat krusial. Metode penelitian yang digunakan adalah analisis deskriptif kualitatif dengan pendekatan studi kasus. Data dikumpulkan melalui observasi, wawancara mendalam dengan staf terkait, serta analisis dokumen dan laporan internal bank. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem informasi *collection* yang ada saat ini memiliki beberapa kelemahan, terutama dalam hal integrasi data, kecepatan respons terhadap perkembangan kredit, dan pemanfaatan analisis prediktif. Berdasarkan temuan tersebut, studi ini mengusulkan beberapa rekomendasi optimalisasi, meliputi: peningkatan kapabilitas analitik sistem untuk identifikasi dini potensi kredit bermasalah, implementasi *workflow automation* untuk efisiensi proses penagihan, dan pengembangan antarmuka pengguna yang lebih intuitif bagi petugas *collection*. Implementasi rekomendasi ini diharapkan dapat meningkatkan efektivitas proses penagihan, mengurangi angka kredit bermasalah, dan pada akhirnya berkontribusi pada kesehatan finansial PT Bank Mandiri (Persero) Tbk.

Kata kunci: Sistem Informasi *Collection*; Kredit Bermasalah; Perbankan; Optimalisasi; Analisis Kualitatif

Pendahuluan

Permasalahan kredit bermasalah atau *Non-Performing Loan* (NPL) merupakan tantangan fundamental yang dihadapi oleh seluruh institusi perbankan, termasuk PT Bank Mandiri (Persero) Tbk. Fenomena ini tidak hanya berdampak pada profitabilitas dan stabilitas keuangan bank, tetapi juga dapat berpotensi mengganggu kelancaran sistem keuangan yang lebih luas. Keefektifan strategi penagihan dan pengelolaan kredit bermasalah menjadi kunci utama dalam mitigasi risiko kredit. Dalam konteks modern, peran sistem informasi *collection* yang canggih dan terintegrasi menjadi sangat krusial dalam mendukung efisiensi dan efektivitas proses penagihan, serta meminimalkan timbulnya kredit macet baru. Berbagai studi menunjukkan bahwa keberhasilan manajemen risiko kredit sangat bergantung pada kualitas informasi dan sistem yang digunakan untuk memonitor dan mengelola portofolio kredit (Talumewo et al., 2018; Hendrich and Permana, 2022).

Pemanfaatan teknologi dalam sistem informasi *collection* telah menjadi fokus perhatian dalam industri perbankan Indonesia. Adopsi teknologi yang tepat dapat meningkatkan kemampuan bank dalam mengidentifikasi potensi kredit bermasalah sejak dini, merencanakan strategi penagihan yang lebih efektif, dan memantau progres setiap penanganan kredit (Simatupang et al., 2021; Auliyah et al., 2022). Sistem informasi debitur (SID) dan penerapan kerangka kerja seperti COBIT, misalnya, telah terbukti berkontribusi pada peningkatan kualitas pengambilan keputusan kredit dan manajemen risiko. Di sisi lain, perusahaan teknologi finansial (*fintech*) juga terus berinovasi dalam manajemen risiko kredit dan pemulihan pinjaman, meskipun menghadapi tantangan tersendiri dalam menyelesaikan kredit bermasalah.

Penelitian terdahulu mengenai efektivitas sistem informasi *collection* dalam menangani kredit bermasalah di perbankan Indonesia telah menggarisbawahi pentingnya berbagai faktor, seperti sistem pengendalian internal, restrukturisasi pembiayaan, dan penerapan sistem peringatan dini (Stevani and Sudirman, 2021; Astuti and Ilmiah, 2022). Meskipun demikian, terdapat kesenjangan dalam analisis mendalam mengenai bagaimana sistem informasi *collection* yang spesifik beroperasi pada PT Bank Mandiri (Persero) Tbk dan sejauh mana efektivitasnya dalam menekan angka kredit bermasalah. Studi yang ada cenderung fokus pada kinerja keuangan secara umum menggunakan rasio seperti RGEC atau CAMEL, atau strategi penyelesaian kredit bermasalah pada konteks yang lebih umum atau koperasi. Kesenjangan ini menunjukkan kebutuhan untuk menganalisis secara lebih mendalam integrasi, fungsionalitas, dan optimalisasi sistem informasi *collection* di Bank Mandiri.

Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan memberikan analisis mendalam terhadap sistem informasi *collection* yang diterapkan di PT Bank Mandiri (Persero) Tbk.

 ISSN 2987-677x

Dengan mengadopsi metode penelitian campuran (*mix method*), studi ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas sistem yang ada dan mengidentifikasi area-area yang memerlukan optimalisasi. Optimalisasi sistem informasi *collection* diharapkan dapat menjadi strategi krusial dalam upaya menekan angka kredit bermasalah dan meningkatkan kualitas portofolio kredit bank, sejalan dengan berbagai temuan yang menekankan peran teknologi dan sistem informasi dalam manajemen risiko kredit (Mamahit et al., 2025; Fadila et al., 2025). Penelitian ini akan menganalisis bagaimana efektivitas sistem informasi *collection* yang ada saat ini dalam menekan angka kredit bermasalah di PT Bank Mandiri (Persero) Tbk, serta mengidentifikasi area yang perlu dioptimalkan dalam sistem tersebut untuk meningkatkan kinerja penagihan dan mengurangi potensi kredit macet.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis efektivitas sistem informasi *collection* PT Bank Mandiri (Persero) Tbk dalam menekan kredit bermasalah; (2) mengidentifikasi elemen-elemen sistem informasi *collection* yang perlu dioptimalkan; dan (3) merumuskan rekomendasi optimalisasi sistem informasi *collection* yang dapat meningkatkan kinerja penagihan dan menekan angka kredit bermasalah. Temuan dari studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis bagi PT Bank Mandiri (Persero) Tbk dalam menyempurnakan strategi manajemen risiko kreditnya, serta berkontribusi pada literatur ilmiah mengenai sistem informasi *collection* dan manajemen risiko kredit di sektor perbankan Indonesia. Kebaruan penelitian ini terletak pada fokus analisis yang spesifik pada sistem informasi *collection* di Bank Mandiri, menggabungkan perspektif kuantitatif dan kualitatif untuk memberikan pemahaman yang komprehensif (Sriary Bhegawati and Novarini, 2023; Ri-zki Amalia Kinanthi and Chasanah, 2023).

Metode Penelitian

Desain Penelitian

Penelitian ini mengadopsi pendekatan metode campuran (*mixed methods*) dengan rancangan eksplanatori sekuensial (*sequential explanatory design*). Pendekatan ini dipilih untuk memberikan pemahaman yang mendalam dan komprehensif mengenai efektivitas sistem informasi *collection* serta potensinya dalam menekan kredit bermasalah. Tahap kuantitatif akan dilaksanakan terlebih dahulu untuk mengidentifikasi pola, tren, dan hubungan statistik antar variabel yang relevan. Hasil dari analisis kuantitatif ini kemudian akan digunakan sebagai dasar untuk merancang instrumen penelitian kualitatif yang lebih terarah.

Pada fase kuantitatif, dilakukan identifikasi terhadap faktor-faktor yang berkontribusi terhadap kredit bermasalah serta efektivitas sistem informasi *collection* yang telah diterapkan. Ini melibatkan pengumpulan data numerik terkait performa kredit dan operasional sistem. Selanjutnya, pada fase kualitatif, temuan kuantitatif akan diperdalam melalui eksplorasi makna dan konteks di balik angka-angka tersebut. Melalui wawancara dan observasi, peneliti akan menggali persepsi, pengalaman, dan pandangan pemangku kepentingan mengenai tantangan dan peluang dalam optimalisasi sistem informasi *collection*.

Kombinasi kedua metode ini memungkinkan peneliti untuk tidak hanya mengukur besaran masalah dan efektivitas, tetapi juga memahami mengapa hal tersebut terjadi. Desain sekuensial memastikan bahwa data kualitatif yang dikumpulkan benar-benar dapat menjelaskan atau memperluas temuan kuantitatif. Hal ini krusial untuk merumuskan rekomendasi optimalisasi yang praktis dan aplikatif bagi PT Bank Mandiri (Persero) Tbk. Pendekatan ini selaras dengan upaya untuk mengintegrasikan berbagai dimensi dalam analisis sistem informasi *collection*, sebuah area yang membutuhkan pemahaman multidimensional untuk efektivitas manajemen risiko kredit (Mamahit et al., 2025).

Pilihan desain ini juga merefleksikan kebutuhan untuk memvalidasi temuan melalui triangulasi data, yang memperkuat reliabilitas dan kredibilitas hasil penelitian. Dengan demikian, penelitian ini berupaya menyajikan analisis yang holistik, mulai dari identifikasi pola kuantitatif hingga pemahaman mendalam terhadap dinamika kualitatif dalam konteks sistem informasi *collection* di industri perbankan. Studi terdahulu yang menyoroti pentingnya sistem pengendalian internal dalam proses pemberian kredit juga menjadi landasan penting dalam menyusun kerangka penelitian ini, memastikan cakupan yang komprehensif terhadap manajemen risiko kredit (Hendrich and Permana, 2022).

Populasi dan Informan

Populasi dalam penelitian ini mencakup seluruh data historis kredit bermasalah yang tercatat pada PT Bank Mandiri (Persero) Tbk selama periode 2020 hingga 2023. Periode ini dipilih untuk mencakup dampak dinamika ekonomi terkini dan perubahan regulasi yang mungkin mempengaruhi profil kredit. Data ini merupakan sumber utama untuk analisis kuantitatif mengenai besaran dan karakteristik kredit bermasalah yang menjadi fokus penelitian. Penggunaan data agregat ini memungkinkan identifikasi tren dan pola yang signifikan dalam manajemen kredit.

Sampel kuantitatif akan ditarik dari populasi data kredit bermasalah tersebut menggunakan teknik *purposive sampling*. Kriteria pemilihan sampel mencakup tingkat keparahan kredit bermasalah (misalnya, dikategorikan dalam *Non-Performing Loan* (NPL) *grade* tertentu, sektor industri debitur, dan lamanya kredit tersebut berada dalam status bermasalah. Pemilihan sampel yang representatif diharapkan dapat menghasilkan temuan yang valid dan

 ISSN 2987-677x

dapat digeneralisasikan dalam konteks operasional bank. Analisis terhadap karakteristik debitur dan kredit juga merupakan bagian integral dari manajemen risiko kredit (Saputra and Wijayati, 2023).

Untuk tahap kualitatif, informan dipilih secara *purposive sampling* dari unit-unit yang memiliki keterlibatan langsung dan pengetahuan mendalam mengenai operasional sis-tem informasi *collection* di PT Bank Mandiri (Persero) Tbk. Kategori informan meliputi *Account Officer* (AO) yang berinteraksi langsung dengan debitur, Manajer Kredit yang memiliki otoritas dalam pengambilan keputusan terkait restrukturisasi atau penyelesaian kredit, serta staf operasional dari unit *collection* yang sehari-hari mengelola proses penagihan dan pemantauan kredit bermasalah. Pemilihan informan ini bertujuan untuk mendapatkan perspektif yang kaya dan bervariasi.

Informan kunci ini diharapkan dapat memberikan wawasan mendalam mengenai implementasi, tantangan, dan efektivitas sistem informasi *collection* dalam praktik sehari-hari. Keterlibatan mereka sangat penting untuk memahami aspek-aspek kualitatif seperti strategi penagihan, penggunaan fitur-fitur sistem, hambatan komunikasi, serta upaya optimalisasi yang telah atau dapat dilakukan. Pemahaman mendalam terhadap operasional *collection* menjadi krusial untuk mengidentifikasi area perbaikan yang spesifik dan kontekstual (Harja and Widiati, 2021).

Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data kuantitatif akan dilakukan melalui studi dokumentasi terhadap berbagai sumber primer dan sekunder yang relevan. Sumber utama mencakup laporan bulanan dan tahunan mengenai portofolio kredit, data historis kredit bermasalah (NPL), serta catatan operasional dari sistem informasi *collection*. Data ini akan mencakup informasi detail mengenai jumlah kredit macet, klasifikasi *grade* kredit, data debitur, jangka waktu kredit macet, dan indikator kinerja terkait lainnya. Studi dokumentasi ini penting untuk membangun gambaran objektif mengenai skala masalah kredit.

Selain itu, data kuantitatif juga akan merujuk pada laporan kinerja keuangan bank, data makroekonomi, dan informasi regulasi terkait perbankan yang dapat mempengaruhi tingkat kredit bermasalah. Pengumpulan data ini akan dilakukan secara sistematis untuk memastikan kelengkapan dan akurasi informasi. Efektivitas sistem pengendalian internal dalam proses pemberian kredit juga menjadi salah satu area yang akan dikaji melalui data dokumentasi terkait kebijakan dan prosedur (Talumewo et al., 2018).

Untuk data kualitatif, teknik utama yang digunakan adalah wawancara mendalam (*in-depth interview*) dengan informan yang telah ditentukan. Wawancara akan dilakukan secara semi terstruktur, memungkinkan fleksibilitas dalam menggali informasi lebih lanjut berdasarkan respons informan. Panduan wawancara akan disiapkan berdasarkan tujuan penelitian dan temuan awal dari analisis kuantitatif, mencakup aspek implementasi sistem, tantangan, strategi penyelesaian kredit bermasalah, dan usulan optimalisasi. Wawancara ini bertujuan untuk menangkap nuansa dan perspektif yang tidak dapat diukur secara kuantitatif.

Observasi partisipatif juga akan dilakukan untuk mengamati secara langsung bagaimana sistem informasi *collection* dioperasikan dalam lingkungan kerja sehari-hari. Observasi ini akan mencakup pemantauan alur kerja, interaksi antar staf, penggunaan fitur-fitur sistem, serta respons terhadap situasi kredit bermasalah. Hal ini memberikan pemahaman kontekstual yang lebih kaya dan memungkinkan identifikasi isu-isu praktis yang mungkin terlewatkan dalam wawancara. Penggunaan Sistem Informasi Debitur (SID) dalam pengambilan keputusan kredit, misalnya, dapat diamati efektivitasnya melalui observasi (Auliyah et al., 2022).

Teknik Analisis Data

Analisis data kuantitatif akan dimulai dengan statistik deskriptif untuk menggambarkan karakteristik utama dari kredit bermasalah dan efektivitas sistem informasi *collection*. Ini mencakup perhitungan frekuensi, persentase, *mean*, dan standar deviasi untuk variabel-variabel kunci. Statistik deskriptif ini bertujuan untuk memberikan gambaran umum yang jelas mengenai fenomena yang diteliti sebelum analisis lebih lanjut dilakukan. Analisis ini akan memberikan gambaran awal mengenai tingkat NPL dan pola distribusinya.

Selanjutnya, analisis statistik inferensial akan diterapkan, seperti analisis regresi, untuk menguji hubungan antara variabel independen (misalnya, fitur-fitur sistem informasi *collection*) dan variabel dependen (tingkat kredit bermasalah). Pengujian hipotesis akan dilakukan untuk menentukan apakah terdapat pengaruh yang signifikan dari implementasi sistem atau strategi tertentu terhadap penurunan kredit bermasalah. Model regresi ini dapat membantu mengukur kontribusi setiap elemen sistem dalam mitigasi risiko kredit (Putri et al., 2024).

Untuk data kualitatif, analisis akan menggunakan model Miles dan Huberman yang meliputi tiga tahapan utama: reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan. Reduksi data melibatkan proses pemilihan, pemfokusan, penyederhanaan, abstraksi, dan transformasi data kasar yang diperoleh dari wawancara dan observasi. Data yang relevan akan dikategorikan dan dikodifikasi sesuai dengan tema-tema penelitian. Hal ini penting untuk mengorganisir informasi yang melimpah menjadi unit-unit makna yang dapat dikelola.

Penyajian data kualitatif akan dilakukan dalam bentuk narasi deskriptif, tabel tematik, atau diagram untuk mempermudah pemahaman pola dan hubungan antar kategori. Penarikan kesimpulan akan dilakukan secara iteratif, yaitu dari data yang telah direduksi dan

 ISSN 2987-677x

disajikan, kemudian diverifikasi sepanjang proses penelitian. Integrasi kedua jenis data (kuantitatif dan kualitatif) akan dilakukan melalui triangulasi, guna memvalidasi temuan dan menghasilkan kesimpulan yang lebih kuat dan menyeluruh. Triangulasi ini penting untuk memastikan bahwa interpretasi data kualitatif konsisten dengan temuan kuantitatif (Erawati and Atma-dja, 2020).

Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa sistem informasi *collection* yang diterapkan oleh PT Bank Mandiri (Persero) Tbk telah terbukti efektif dalam menekan angka kredit bermasalah. Analisis menunjukkan bahwa optimalisasi pada aspek identifikasi dini debitur berisiko, pengembangan strategi penagihan yang terstruktur dan terpadu, serta pemanfaatan teknologi informasi secara optimal dalam *monitoring* portofolio kredit merupakan faktor-faktor kunci yang berkontribusi terhadap keberhasilan tersebut. Implementasi sistem yang terintegrasi secara *end-to-end* memungkinkan bank untuk melakukan respons yang lebih cepat dan tepat sasaran terhadap potensi timbulnya kredit macet, sehingga secara signifikan meminimalkan kerugian finansial yang dialami bank. Efektivitas ini terlihat jelas dari penurunan tren kredit bermasalah pasca-implementasi dan optimalisasi sistem.

Lebih lanjut, temuan penelitian menggarisbawahi pentingnya kapabilitas sistem informasi dalam mendukung pengambilan keputusan strategis terkait manajemen kredit. Kemampuan sistem untuk mengagregasi dan menganalisis data debitur secara komprehensif memungkinkan tim *collection* untuk memprioritaskan upaya penagihan pada segmen debitur yang paling berisiko, sekaligus mengalokasikan sumber daya secara lebih efisien. Integrasi data antar departemen dan dengan sumber eksternal (jika ada) juga memperkaya informasi yang tersedia, sehingga memfasilitasi identifikasi pola perilaku debitur yang dapat meng-indikasikan kesulitan pembayaran di masa depan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem informasi *collection* bukan hanya alat operasional, melainkan juga infrastruktur strategis dalam manajemen risiko kredit bank.

Saran dan Rekomendasi

Berdasarkan simpulan yang telah dijabarkan, direkomendasikan agar PT Bank Mandiri (Persero) Tbk secara berkelanjutan melakukan evaluasi mendalam terhadap efektivitas sistem informasi *collection* yang ada. Evaluasi ini harus mempertimbangkan dinamika pasar yang terus berubah, perkembangan regulasi perbankan, serta adopsi teknologi finansial (*fintech*) oleh masyarakat. Peningkatan kapabilitas analitik data untuk prediksi risiko kredit yang lebih akurat dan prediktif patut menjadi prioritas, serta pengembangan fitur-fitur baru yang mampu merespons tren industri secara proaktif. Selain itu, investasi dalam pelatihan berkelanjutan bagi seluruh personel tim *collection* sangat krusial guna meningkatkan kompetensi mereka dalam memanfaatkan kapabilitas sistem secara maksimal serta menguasai teknik negosiasi dan resolusi masalah debitur yang semakin kompleks.

Untuk penelitian lanjutan, disarankan untuk memperluas cakupan analisis mencakup dampak faktor-faktor eksternal makroekonomi dan industri terhadap tingkat kredit bermasalah, serta melakukan eksplorasi mendalam terhadap as-pek kualitatif dari interaksi antara tim *collection* dan debitur. Pengujian komparatif antara efektivitas sistem yang diimplementasikan dengan sistem serupa pada bank lain juga dapat memberikan wawasan yang lebih kaya. Studi yang menganalisis korelasi antara tingkat literasi keuangan debitur dengan keberhasilan proses *collection* juga berpotensi memberikan rekomendasi kebijakan yang lebih holistik bagi perbankan.

Referensi

Astuti, E. P., & Ilmiah, D. (2022). Implementasi kebijakan countercyclical COVID-19 dalam mitigasi risiko pembiayaan bermasalah. *JPS (Jurnal Perbankan Syariah), 3*(2), 115–128.

Auliyah, R., Jaya, J. N. U., & Surmiati, S. (2022). Efektivitas penerapan sistem informasi debitur (SID) BRI dalam kebijaksanaan pemberian kredit menggunakan COBIT 5 domain DSS (deliver, service, support). *JURIKOM (Jurnal Riset Komputer), 9*(2), 328.

Erawati, M., & Atmadja, A. T. (2020). Analisis efektivitas sistem pengendalian internal dalam mengatasi kredit macet dengan menerapkan prinsip “Pang Pade Payu” pada BUMDes Sidi Amerta. *Vokasi: Jurnal Riset Akuntansi, 9*(2), 121–130.

Fadila, A. T., Putri, E. E., Khoiroh, Z., Putri, F. A., & Pan-din, M. Y. R. (2025). Peran pengelolaan piutang, diskon pembayaran dini, dan suku bunga dalam menentukan kebijakan kredit perusahaan. *GEMILANG: Jurnal Manajemen dan Akuntansi, 5*(3), 551–562.

Harja, R. P., & Widiati, E. P. (2021). Penyelesaian pinjaman bermasalah dalam perusahaan teknologi finansial di Indonesia. *Media Iuris, 4*(3), 435.

Hendrich, M., & Permana, K. W. A. (2022). Analisis sistem pengendalian internal berbasis COSO pada pembiayaan di Bank Negara Indonesia Syariah (studi kasus pada Bank Negara Indonesia KCP Indralaya). *Jurnal Ilmiah Akuntansi Rahmaniyah, 5*(2), 94.

Mamahit, D. C., Karamoy, H., & Kalalo, M. Y. B. (2025). Analisis implementasi kebijakan penjualan kredit dan pengendalian risiko kredit dalam upaya meningkatkan profitabilitas (studi pada PT Trakindo Utama Manado). *Manajemen Bisnis dan Keuangan Korporat, 3*(2), 631–641.

Putri, T. S., Putra, Y. P., & Setiorini, H. (2024). The influence of CAR, BOPO, NIM, FDR and DPK on the profitability of

 ISSN 2987-677x

commercial banking listed on the Indonesian Stock Exchange (BEI). *Jurnal Ekonomi, Manajemen, Akuntansi dan Keuangan, 5*(1).

Rizki Amalia Kinanthi, I., & Chasanah, U. (2023). Strategi digital marketing Livin' by Mandiri dalam meningkatkan nasabah (Bank Mandiri Yogyakarta). *Syntax Idea, 5*(11), 2012–2030.

Saputra, R. A., & Wijayati, N. (2023). Analisis penerapan manajemen risiko kredit pada perusahaan start-up fintech PT A. *Owner, 7*(4), 3083–3095.

Simatupang, A., Yanti, E. R., & Mardila, N. (2021). Manajemen kredit pemilikan rumah untuk meminimalisir kredit macet pada PT Bank Tabungan Negara (Persero) Tbk. *AdBispreneur, 6*(1), 13.

Sriary Bhegawati, D. A., & Novarini, N. N. A. (2023). Percepatan inklusi keuangan untuk meningkatkan pertumbuhan ekonomi, lebih terinklusif, dan merata di era presidensi G20. *Jurnal Akuntansi, Manajemen, Bisnis dan Teknologi (AMBITEK), 3*(1), 14–31.

Stevani, W., & Sudirman, L. (2021). Urgensi perlindungan data pengguna financial technology terhadap aksi kejahatan online di Indonesia. *Journal of Judicial Review, 23*(2), 197–216.

Talumewo, W. E., Nangoi, G., & Tirayoh, V. (2018). Analisis atas penerapan sistem pengendalian manajemen pemberian kredit pada PT Suzuki Finance Indonesia cabang Manado. *GOING CONCERN: Jurnal Riset Akuntansi, 13*(02).

 ISSN 2987-677x

Analisis Kekuatan dan Kekakuan *Ban Airless* pada Skuter Elektrik sebagai Penarik Kursi Roda untuk Mempermudah Pengoperasian oleh Pasien Difabel

M. Nurul Huda[1] Rasional Sitepu[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ mnhuda217@gmail.com

✉ rasional@ukwms.ac.id

Ban airless **merupakan inovasi teknologi ban yang menggantikan ban pneumatik konvensional guna menghilangkan risiko ban bocor dan pecah, khususnya pada kendaraan assistif bagi penyandang difabel. Penelitian ini menganalisis kekuatan dan kekakuan ban airless berukuran 8,5 inci pada skuter elektrik penarik kursi roda dengan memvariasikan material spoke antara PVC dan HDPE. Simulasi menggunakan metode elemen hingga (FEM) pada perangkat ANSYS dengan pembebanan maksimal 153,4 N dilengkapi validasi eksperimen dan analisis *fatigue*. Hasil menunjukkan material PVC menghasilkan kekakuan rata-rata 52,2 N/mm (selisih 5% dari ban pneumatik 55,1 N/mm), tegangan maksimal 7,24 MPa (aman terhadap *allowable stress* 52 MPa), dan *safety factor fatigue* sebesar 15 dengan kategori *infinite life*. Material HDPE menghasilkan kekakuan 36,5 N/mm (selisih 33,8% dari ban pneumatik), tegangan maksimal 6,10 MPa, dan safety factor 12,44. *Spoke* PVC direkomendasikan karena performa kekakuannya mendekati ban pneumatik dengan tetap memenuhi syarat keamanan.**

Kata kunci: *Ban Airless*, Kekakuan, Tegangan, Metode Elemen Hingga

Pendahuluan

Berdasarkan data Survei Sosial Ekonomi Nasional (Susenas) tahun 2019, jumlah penyandang disabilitas di Indonesia mencapai 26 juta orang atau sekitar 9,7% dari total populasi [1]. Tingginya angka ini mendorong pengembangan berbagai teknologi assistif, salah satunya adalah kendaraan skuter elektrik yang dirancang sebagai penarik kursi roda untuk memudahkan mobilitas penyandang difabel dalam menjalani aktivitas sehari-hari.

Salah satu komponen paling kritis pada kendaraan jenis ini adalah ban. Fungsi utama ban meliputi penahan beban kendaraan dan penumpang, penyalur tenaga dari mesin ke permukaan jalan, peredam guncangan, serta pengontrol arah kendaraan. Performa ban secara langsung mempengaruhi keselamatan dan kenyamanan berkendara [2]. Ban yang saat ini beredar di pasaran terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu ban solid dan ban pneumatik (radial). Ban solid memiliki keunggulan tahan terhadap benda tajam dan beban berat, tetapi tingkat kenyamanannya sangat rendah karena tidak memiliki fungsi bantalan. Sementara itu, ban pneumatik memberikan kenyamanan lebih baik namun memiliki kelemahan fatal berupa risiko kehilangan tekanan udara akibat bocor atau pecah.

Data statistik Jasa Marga tahun 2004 hingga 2006 mencatat sedikitnya 87.020 kasus kecelakaan kendaraan bermotor di jalan raya, dengan 18–23% di antaranya disebabkan oleh pecah ban [3]. Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) juga mencatat bahwa 80% kecelakaan pecah ban terjadi akibat tekanan udara ban yang tidak sesuai standar, sehingga ban kehilangan tekanan dan mengalami kegagalan mendadak. Kondisi ini sangat berbahaya, terutama pada kendaraan yang dioperasikan untuk transportasi penyandang difabel. *Ban airless* (non-pneumatik) hadir sebagai solusi inovatif untuk mengatasi permasalahan tersebut. Teknologi ini memanfaatkan *spoke* fleksibel dan *shear band* sebagai pengganti udara bertekanan, sehingga ban tetap dapat beroperasi normal meskipun terkena benda tajam. Desain spoke dan pemilihan material menjadi faktor penentu utama performa ban dari aspek kekakuan (*stiffness*) dan kekuatan (*strength*) [4].

Beberapa penelitian terdahulu telah dilakukan untuk mengoptimalkan desain *ban airless*. Pramono et al. (2019) mengembangkan desain *ban airless spoke* belah ketupat dengan variasi material *polyurethane* menggunakan pendekatan *Backpropagation Neural Network* dan *Genetic Algorithm*, dan berhasil mendapatkan desain optimal dengan defleksi 5,824 mm dan tegangan total 9,287 MPa [5]. Bayuseno et al. (2016) meneliti distribusi tegangan ban pneumatik ketika melewati polisi tidur menggunakan metode elemen hingga, dan memberikan referensi penting tentang perilaku ban saat menerima beban dinamis [6].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa *ban airless* berukuran 8,5 inci pada skuter elektrik penarik kursi roda dengan memvariasikan material *spoke* antara PVC (*Polyvinyl Chloride*) dan HDPE (*High Density Polyethylene*). Analisis meliputi tegangan ekuivalen, kekakuan ban, serta umur *fatigue* menggunakan simulasi FEM dengan perangkat ANSYS yang divalidasi melalui pengujian eksperimen. Hasil penelitian diharapkan memberikan rekomendasi material *spoke* yang optimal untuk aplikasi kendaraan assistif penyandang difabel.

Metode

Desain Model CAD

Model tiga dimensi ban airless dirancang menggunakan perangkat lunak *Computer Aided Design* (CAD). Komponen yang dimodelkan meliputi tiga bagian

 ISSN 2987-677x

utama: *ban airless* (terdiri dari *spoke, shear band*, dan lapisan karet luar), pelek ring 8,5 inci, serta pelat jalan sebagai tumpuan. Ukuran ban mengacu pada spesifikasi ban skuter elektrik komersial berdiameter 8,5 inci dengan dimensi *spoke* sebagai berikut: diameter *spoke* 26,67 mm, ketebalan *spoke* 3,17 mm, lebar *spoke* 30,57 mm, dan ketebalan total ban 5 mm. Setelah seluruh komponen dimodelkan, ketiganya digabungkan dalam satu model *assembly* dan diekspor dalam format .igs untuk keperluan simulasi numerik.

Properti Material

Tabel 1 menyajikan properti material yang digunakan dalam simulasi. Variabel independen penelitian adalah material *spoke* (PVC dan HDPE), sedangkan pelek menggunakan *aluminium alloy* dan lapisan karet ban menggunakan *epoxy resin* sebagai konstanta.

Tabel 1. Properti Material yang Digunakan dalam Simulasi

Komponen	Material	*Density* (kg/m³)	*Young Modulus* (MPa)	*Poisson Ratio*	*Allowable Stress* (Mpa)
Spoke	PVC	1450	3275	0,38	52
	HDPE	980	1000	0,46	22
Pelek	*Aluminium Alloy*	2770	71000	0,33	280
Karet Ban	*Epoxy Resin*	2250	215000	0,42	97

PVC dipilih sebagai material pertama karena memiliki *modulus young* yang lebih tinggi (3275 MPa) sehingga diperkirakan menghasilkan kekakuan yang lebih mendekati ban pneumatik. HDPE dipilih sebagai pembanding karena sifatnya yang lebih elastis dengan *modulus young* lebih rendah (1000 MPa), yang berpotensi menghasilkan kenyamanan berbeda namun dengan risiko defleksi berlebihan.

***Setup* Simulasi FEM**

Simulasi dilakukan menggunakan modul *ANSYS Static Structural* dengan tahapan sebagai berikut: (1) impor geometri *assembly* dalam format .igs, (2) pendefinisian properti material di *Engineering Data*, (3) pendefinisian kontak antar komponen menggunakan tipe *bonded* (tidak ada geseran relatif antar permukaan kontak), (4) pembuatan *mesh* elemen hingga, dan (5) penerapan kondisi batas. Kualitas *mesh* diverifikasi menggunakan parameter *mesh quality* dan *aspect ratio* untuk memastikan keakuratan hasil simulasi.

Kondisi batas yang diterapkan adalah: *fixed support* pada permukaan bawah pelat jalan (menahan semua derajat kebebasan translasi dan rotasi), serta *remote force* sebesar 153,4 N yang diaplikasikan pada hub pelek, merepresentasikan berat total kendaraan dan penumpang. Beban 153,4 N ini ditetapkan berdasarkan batasan beban maksimal yang diterima ban airless sebesar 100 kg berat total. Solusi yang diambil mencakup *equivalent stress (Von Mises)*, total *deformation*, dan hasil *probe* defleksi pada berbagai variasi pembebanan.

Eksperimen Validasi

Untuk memvalidasi hasil simulasi, dilakukan pembuatan prototipe *ban airless* dan pengujian fisik secara langsung. Peralatan yang digunakan meliputi: dongkrak tipe gunting sebagai mekanisme pembebanan, *dial indicator* (resolusi 0,01 mm) untuk mengukur defleksi, *load cell tipe single point balance* yang dihubungkan ke modul HX711, dan Arduino Uno untuk pembacaan gaya secara digital, serta rangka tiang besi sebagai struktur penopang alat uji. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban bertahap dari 92,1 N hingga 153,4 N pada *ban airless* yang terpasang pada tiang alat uji, dan defleksi yang terjadi dicatat pada setiap tahap pembebanan.

Selain dibandingkan dengan hasil eksperimen *ban airless*, data kekakuan simulasi juga dibandingkan dengan hasil eksperimen ban pneumatik berukuran setara yang dijadikan acuan performa optimal.

Analisis *Fatigue*

Setelah simulasi statis selesai, dilakukan analisis *fatigue* menggunakan modul *Fatigue Tool* pada ANSYS. Nilai tegangan maksimal diambil ketika *spoke* berada di posisi paling bawah (menerima beban penuh), dan tegangan minimal diambil ketika *spoke* berada di posisi paling atas. Rasio tegangan (R) dihitung sebagai bandingan tegangan minimal terhadap tegangan maksimal. *Output* analisis *fatigue* yang diambil, meliputi *fatigue life* (jumlah siklus hingga kegagalan), *safety factor fatigue*, dan *biaxiality indication* untuk memverifikasi validitas mode pembebanan.

Hasil dan Pembahasan

Tegangan dan Kekakuan *Spoke* PVC

Hasil simulasi *static structural* pada material PVC dengan pembebanan maksimal 153,4 N menunjukkan tegangan ekuivalen (*Von Mises*) maksimal sebesar 9,1592 MPa yang terjadi pada bagian *spoke* bagian bawah. Nilai tegangan ini berada jauh di bawah *allowable stress* material PVC sebesar 52 MPa, sehingga ban *airless spoke* PVC dinyatakan aman secara struktural pada kondisi pembebanan penelitian ini.

Defleksi maksimal yang terukur pada kondisi beban maksimal adalah 2,94 mm. Nilai defleksi ini digunakan untuk menghitung nilai kekakuan ban ($K = F/\delta$). Seluruh data hasil simulasi pada berbagai variasi pembebanan ditampilkan pada Tabel 2, beserta perbandingannya dengan hasil eksperimen.

Tabel 2. Perbandingan Simulasi dan Eksperimen Kekakuan *Spoke* PVC

Beban (N)	Defleksi Sim. (mm)	Kekakuan Sim. (N/mm)	Defleksi Eksp. (mm)	Kekakuan Eksp. (N/mm)
92,1	1,78	51,7	1,82	50,6
107,4	2,07	51,9	2,12	50,7
122,7	2,35	52,2	2,41	50,9
138,1	2,60	53,1	2,67	51,7
153,4	2,94	52,2	3,00	51,1

 ISSN 2987-677x

Data pada Tabel 2 memperlihatkan kesesuaian yang sangat baik antara hasil simulasi dan eksperimen, dengan deviasi rata-rata sebesar 2,1%. Selisih kecil ini dapat dijelaskan oleh beberapa faktor, antara lain: idealisasi kondisi batas pada simulasi yang berbeda dengan kondisi eksperimen sesungguhnya, asumsi material yang homogen dan isotropik pada simulasi, serta faktor kesalahan manusia (*human error*) dalam pengukuran dial indicator. Tingkat kesesuaian ini memvalidasi bahwa model simulasi yang dibuat representatif terhadap kondisi nyata.

Kekakuan rata-rata *ban airless spoke* PVC sebesar 52,2 N/mm dapat dibandingkan langsung dengan kekakuan ban pneumatik referensi yang terukur sebesar 55,1 N/mm melalui eksperimen. Selisih sebesar 2,9 N/mm atau sekitar 5,2% menunjukkan bahwa ban airless spoke PVC memiliki performa kekakuan yang sangat mendekati ban pneumatik, menjadikannya kandidat kuat untuk menggantikan ban pneumatik pada aplikasi skuter elektrik penarik kursi roda.

Analisis *Fatigue Spoke* PVC

Untuk analisis *fatigue*, tegangan maksimal pada posisi *spoke* bawah terukur sebesar 1,0535 MPa dan tegangan minimal pada posisi *spoke* atas sebesar 0,1019 MPa, sehingga diperoleh rasio tegangan R = 0,096. Hasil simulasi *ANSYS Fatigue Tool* menunjukkan *fatigue life* sebesar 1×10^7 *cycle* dengan *safety factor* sebesar 15. Nilai *fatigue life* ini melebihi batas *infinite life* yang ditetapkan yaitu 10^6 *cycle*, dan tegangan maksimal (1,0535 MPa) berada jauh di bawah *endurance limit* material PVC sebesar 16 MPa. Oleh karena itu, *spoke* PVC dikategorikan sebagai komponen dengan *infinite life,* yang berarti *spoke* tidak akan mengalami kegagalan akibat kelelahan material (*fatigue failure*) dalam kondisi pembebanan yang diteliti.

Tegangan dan Kekakuan *Spoke* HDPE

Simulasi pada material HDPE menghasilkan tegangan ekuivalen maksimal sebesar 6,1006 MPa pada *spoke*, lebih rendah dari PVC. Nilai ini juga berada di bawah *allowable stress* HDPE sebesar 22 MPa, sehingga material HDPE pun aman secara struktural. Namun, ditinjau dari aspek kekakuan, HDPE menunjukkan performa yang berbeda signifikan seperti ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Simulasi dan Eksperimen Kekakuan *Spoke* HDPE

Beban (N)	Defleksi Sim. (mm)	Kekakuan Sim. (N/mm)	Defleksi Eksp. (mm)	Kekakuan Eksp. (N/mm)
92,1	2,51	36,7	2,58	35,7
107,4	2,98	36,0	3,05	35,2
122,7	3,32	37,0	3,40	36,1
138,1	3,81	36,2	3,89	35,5
153,4	4,20	36,5	4,28	35,8

Kekakuan rata-rata HDPE hanya mencapai 36,5 N/mm, jauh lebih rendah dari ban pneumatik (55,1 N/mm) dengan selisih mencapai 33,8%. Defleksi maksimal yang terjadi sebesar 4,20 mm, berada 55% di atas batas defleksi maksimum yang diizinkan. Hal ini terjadi karena *modulus young* HDPE (1000 MPa) yang jauh lebih kecil dibandingkan PVC (3275 MPa) membuat HDPE bersifat lebih elastis dan mengalami defleksi yang lebih besar untuk beban yang sama. Defleksi berlebihan pada ban dapat menyebabkan ban sulit kembali ke bentuk semula (kemampuan *recovery* berkurang), berpotensi merusak pelek, serta mempengaruhi stabilitas kemudi kendaraan.

Analisis *Fatigue Spoke* HDPE

Analisis *fatigue* pada HDPE menghasilkan tegangan maksimal 0,4726 MPa dan tegangan minimal 0,1246 MPa dengan rasio R = 0,26. *Fatigue life* yang diperoleh adalah 1×10^7 *cycle* dengan *safety factor* minimum 12,44. Meskipun *safety factor* HDPE lebih rendah dari PVC, nilai 12,44 masih jauh di atas ambang batas aman (SF > 1). Tegangan maksimal HDPE (0,4726 MPa) juga berada di bawah *endurance limit* material (16 MPa), sehingga spoke HDPE pun dikategorikan memiliki *infinite life* dan aman dari kegagalan *fatigue*.

Perbandingan Komprehensif Kedua Material

Tabel 4 merangkum perbandingan komprehensif antara kedua material *spoke* yang diteliti terhadap ban pneumatik sebagai referensi.

Tabel 4. Perbandingan Komprehensif Performa Material

Parameter	PVC	HDPE	Ban Pneumatik	Keterangan
Kekakuan Rata-rata (N/mm)	52,2	36,5	55,1	PVC mendekati pneumatik
Tegangan Maks. (MPa)	7,24	6,10	-	Keduanya aman
Allowable Stress (MPa)	52	22	-	*Margin* aman besar
Fatigue Life (cycle)	1×10^7	1×10^7	-	*Infinite life*
Safety Factor	15,00	12,44	-	Keduanya > 1 (aman)
Selisih vs Pneumatik (%)	5,2%	33,8%	-	PVC lebih unggul

Dari Tabel 4 terlihat jelas bahwa *spoke* PVC unggul secara signifikan dalam hal kekakuan (mendekati performa ban pneumatik), sementara kedua material setara dalam keamanan struktur dan umur *fatigue*. *Spoke* HDPE meskipun lebih fleksibel, menunjukkan defleksi yang terlalu besar sehingga kurang cocok untuk aplikasi pada kendaraan yang membutuhkan stabilitas tinggi seperti penarik kursi roda.

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Analisis *Fatigue* Material

Parameter	Material PVC	Material HDPE
Tegangan Maksimal (MPa)	1,0535	0,4726
Tegangan Minimal (MPa)	0,1019	0,1246
Rasio Tegangan (R)	0,096	0,26
Fatigue Life (cycle)	1×10^7	1×10^7
Safety Factor Maks.	15	15

 ISSN 2987-677x

Safety Factor Min.	15	12,44
Endurance Limit (MPa)	16	16
Kategori	*Infinite Life*	*Infinite Life*

Tabel 5 mengkonfirmasi bahwa kedua material *spoke* memenuhi syarat keamanan fatigue dengan kategori *infinite life*. Perbedaan *safety factor* (PVC = 15 vs HDPE = 12,44) tidak signifikan secara praktis, namun PVC tetap memberikan *margin* keamanan yang lebih besar. Hasil ini konsisten dengan temuan Pinto et al yang menyatakan bahwa pelek *hubless* dengan desain serupa memiliki umur *infinite life* saat menerima beban berat badan rata-rata manusia.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi, eksperimen, dan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Material spoke PVC menghasilkan kekakuan rata-rata 52,2 N/mm, mendekati ban pneumatik (55,1 N/mm) dengan selisih hanya 5,2%. Performa ini menjadikan *ban airless spoke* PVC layak sebagai pengganti ban pneumatik pada skuter elektrik penarik kursi roda.
2. Material *spoke* HDPE menghasilkan kekakuan rata-rata 36,5 N/mm dengan defleksi 4,20 mm, melebihi batas defleksi yang diizinkan sebesar 55%, sehingga kurang direkomendasikan untuk aplikasi ini meskipun aman secara kekuatan material.
3. Tegangan ekuivalen kedua material (PVC: 7,24 MPa; HDPE: 6,10 MPa) berada jauh di bawah *allowable stress* masing-masing (PVC: 52 MPa; HDPE: 22 MPa), membuktikan keamanan struktural kedua material pada kondisi pembebanan yang diteliti.
4. Analisis *fatigue* menunjukkan kedua material memiliki *fatigue life* sebesar 1×10^7 *cycle* dengan kategori *infinite life*. *Safety factor* PVC sebesar 15 dan HDPE sebesar 12,44, keduanya melebihi batas aman (SF > 1).
5. Validasi eksperimen menunjukkan deviasi rata-rata simulasi terhadap eksperimen sebesar 2,1% untuk PVC dan 2,3% untuk HDPE, mengkonfirmasi keandalan model simulasi yang dikembangkan.

Penelitian ini merekomendasikan penggunaan material PVC sebagai *spoke ban airless* pada skuter elektrik penarik kursi roda. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk menguji material *spoke* alternatif seperti *polyurethane*, melakukan simulasi dinamis (*rolling simulation*), serta mengembangkan desain *spoke* yang lebih optimal melalui metode optimasi topologi untuk meningkatkan performa *ban airless* lebih lanjut.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ir. Rasional Sitepu, M.Eng., IPU., ASEAN Eng. selaku dosen pembimbing Laporan Studi Kasus yang telah memberikan bimbingan, arahan ilmiah, serta masukan berharga selama proses penelitian dan penulisan artikel ini. Terima kasih juga disampaikan kepada Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya atas fasilitas laboratorium dan komputasi yang telah disediakan, serta kepada seluruh rekan mahasiswa yang telah memberikan dukungan selama pelaksanaan penelitian.

Referensi

[1] Badan Pusat Statistik. (2019). *Survei sosial ekonomi nasional (Susenas) 2019: Data penyandang disabilitas*. Jakarta: BPS Indonesia.
[2] Smith, N. D. (2003). *Understanding parameters influencing tire modeling.* Colorado State University Technical Report.
[3] Jasa Marga. (2006). *Laporan statistik kecelakaan jalan tol Indonesia 2004–2006*. Jakarta: PT Jasa Marga (Persero).
[4] Grandin, H. (1986). *Fundamentals of the finite element method*. New York: Macmillan Publishing Company.
[5] Pramono, A. S., & Effendi, M. K. (2019). Optimization in airless tires design using backpropagation neural network (BPNN) and genetic algorithm (GA) approaches. *AIP Conference Proceedings, 2187*. doi: 10.1063/1.5138331.
[6] Hidayat, R., Pranoto, S. E., Tauviqirrahman, M., & Bayuseno, A. P. (2016). Stress investigation on the rolling tires across the speed bump using finite element method. *AIP Conference Proceedings, 1725*. doi: 10.1063/1.4945482.
[7] Ansys Inc. (2021). *Ansys workbench user guide version 2021R1.* Canonsburg, PA: ANSYS Inc.
[8] Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Budynas, R. G. (2011). *Mechanical engineering design* (9th ed.). New York: McGraw-Hill.
[9] Madenci, E., & Guven, I. (2015). *The finite element method and applications in engineering using ANSYS®* (2nd ed.). New York: Springer US. doi: 10.1007/978-1-4899-7550-8.

 ISSN 2987-677x

Evaluasi Tekno-Lingkungan Konstruksi Modular Baja Prefabrikasi pada Proyek dengan Sumber Daya Terbatas: Studi Kasus Gedung Penyimpanan Arsip

Ahmad Zakki Siroj[1] Rasional Sitepu[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ ahmadzakkisiroj@gmail.com

✉ rasional@ukwms.ac.id

Perencanaan gedung penyimpanan arsip merupakan kegiatan keinsinyuran yang menuntut pemenuhan aspek fungsional, keamanan, dan kesesuaian terhadap standar kearsipan, namun sering dihadapkan pada keterbatasan waktu dan anggaran. Studi ini membahas strategi perencanaan Gedung Penyimpanan Arsip BAKTI di Duren Tiga, Jakarta Selatan, dengan tujuan mengidentifikasi permasalahan, menganalisis alternatif solusi, serta mengevaluasi pengambilan keputusan berdasarkan prinsip profesionalisme keinsinyuran. Metode yang digunakan adalah studi kasus deskriptif kualitatif melalui studi dokumen, observasi lapangan, dan kajian regulasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan konstruksi modular prefabrikasi efektif dalam mengatasi keterbatasan waktu dan anggaran, yang dibuktikan dengan pemenuhan target durasi pelaksanaan fisik tahap awal dalam 30 hari kalender. Dengan memanfaatkan data sekunder hasil *Life Cycle Assessment* (LCA) dari penelitian Yan dkk. (2026) serta data pembanding dari Pervez dkk. (2021), diketahui bahwa total emisi konstruksi Mobox 3x6 hanya mencapai dapat menghasilkan penghematan emisi sebesar 83,27% dibandingkan konstruksi beton konvensional. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi pelaksanaan dan menjaga mutu konstruksi, tetapi juga mendukung pembangunan berkelanjutan dengan pertimbangan aspek etika, keselamatan, dan tanggung jawab lingkungan yang terintegrasi.

Kata kunci: konstruksi modular, MOBOX, *embodied carbon*, manajemen proyek

Pendahuluan

Perencanaan gedung penyimpanan arsip menuntut pemenuhan standar fungsional, keamanan, dan kearsipan (ANRI, 2015), namun seringkali kendala yang ditemukan pada pekerjaan konstruksi pada umumnya adalah keterbatasan waktu dan anggaran, yang berpotensi menurunkan kualitas hasil (Mellado dkk., 2020; PMI, 2021). Konstruksi modular prefabrikasi telah terbukti mampu mengurangi limbah hingga 50% (Jiang dkk., 2021), memangkas durasi konstruksi 30-50% (Lawson dkk., 2012; Huwaida dkk., 2025), serta memiliki jejak karbon yang lebih rendah dibandingkan beton konvensional berdasarkan studi *Life Cycle Assessment* (LCA) (Balasbaneh & Ramli, 2020; Yan dkk., 2026).

Meskipun demikian, penerapan sistem modular pada bangunan dengan persyaratan teknis sangat ketat, seperti gedung arsip yang mewajibkan pengendalian suhu 18-22°C dan kelembaban 40-60% (ANRI No. 31/2015; ISO 11799:2024), masih jarang dikaji secara akademik, mengingat teknologi ini lebih banyak digunakan untuk hunian sementara atau darurat. Studi kasus ini mengisi celah tersebut dengan menganalisis adaptasi sistem modular baja MOBOX pada proyek Gedung Arsip BAKTI di Duren Tiga, Jakarta Selatan, yang menghadapi tenggat 30 hari dan anggaran tahunan terbatas. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi permasalahan, mengevaluasi alternatif solusi, serta menganalisis pengambilan keputusan profesional dengan memanfaatkan data sekunder LCA dari Yan dkk. (2026) sebagai justifikasi keberlanjutan, sekaligus berkontribusi pada literatur tentang modular konstruksi untuk bangunan fungsional permanen.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus intrinsik deskriptif kualitatif (Stake, 1995) untuk memahami proses perencanaan dan pengambilan keputusan secara mendalam. Pengumpulan data dilakukan melalui: (1) studi dokumen teknis (gambar perencanaan, laporan proyek, dan dokumen kontrak); (2) observasi lapangan untuk memahami kondisi eksisting dan kendala akses; serta (3) kajian terhadap regulasi (UU Bangunan Gedung, Peraturan ANRI, SNI terkini) dan standar teknis kearsipan. Analisis terhadap konstruksi modular sebagai alternatif solusi mengacu pada Lawson dkk. (2012) dan Huwaida dkk. (2025).

Untuk aspek lingkungan, penelitian ini memanfaatkan data sekunder dari Yan dkk. (2026) yang menerapkan metode *process-based Life Cycle Assessment* (LCA) dengan batasan sistem *cradle-to-gate* (Monahan & Powell, 2011), mencakup lima tahapan: ekstraksi bahan baku, transportasi ke pabrik, fabrikasi modul, transportasi ke lokasi, dan instalasi. Data emisi karbon yang disajikan dalam studi ini merupakan kutipan langsung dari penelitian tersebut dan

 ISSN 2987-677x

digunakan sebagai dasar analisis komparatif untuk memperkuat justifikasi keputusan teknis, bukan merupakan hasil pengukuran orisinal penulis. Validitas data sekunder terjamin karena Yan dkk. (2026) mengumpulkan data primer melalui wawancara dengan pihak *vendor* dan observasi proses produksi, serta menggunakan *emission factor* standar dari Hammond dkk. (2011) dan Tavares dkk. (2019).

Hasil Kerja

Analisis Permasalahan dan Rekomendasi Solusi

Studi kasus ini mengidentifikasi tujuh permasalahan inti yang saling berkaitan dalam proses perencanaan, sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1 Identifikasi Permasalahan Utama

Permasalahan	Uraian
Kesenjangan waktu dan lingkup	Kontrak terbagi 30 hari perencanaan dan 30 hari pelaksanaan fisik, sedangkan lingkup pekerjaan mencakup bangunan dua lantai
Keterbatasan teknis konstruksi konvensional	Waktu pengerasan beton (curing) 7–14 hari per lantai tidak memungkinkan penyelesaian dua lantai dalam 30 hari
Kebutuhan operasional mendesak	Pemberi pekerjaan menuntut ruang penyimpanan arsip sudah berfungsi sebelum penutupan tahun anggaran 2024
Risiko *budget lapse*	Anggaran bersumber dari anggaran tahunan sehingga seluruh pekerjaan harus tuntas sebelum akhir tahun
Standar gedung kearsipan	Persyaratan suhu 18–22°C dan kelembaban 40–60% membatasi fleksibilitas pemilihan material dan sistem bangunan
Keterbatasan aksesibilitas lokasi	Kawasan urban padat membatasi mobilisasi peralatan berat dan pengiriman material volume besar
Fleksibilitas pengembangan	Perencanaan harus mengakomodasi penambahan lantai kedua di masa mendatang tanpa mengganggu operasional lantai pertama

Analisis diawali dengan mengevaluasi empat alternatif metode konstruksi berdasarkan pendekatan pelaksanaan, yaitu: (1) konvensional dua lantai sekaligus, (2) modular dua lantai sekaligus, (3) konvensional bertahap satu lantai, dan (4) modular bertahap satu lantai. Metode keempat (modular bertahap) terpilih sebagai solusi paling realistis karena mampu memenuhi target 30 hari, fleksibel terhadap pengembangan vertikal, serta adaptif terhadap keterbatasan akses lokasi. Selanjutnya, untuk mengimplementasikan metode terpilih, dilakukan analisis terhadap empat alternatif sistem konstruksi yang dapat diterapkan pada bangunan modular bertahap, yaitu: beton *cast-in-situ*, baja struktural, pracetak beton, dan modular baja prefabrikasi. Keempat sistem konstruksi tersebut dibandingkan secara komprehensif pada Tabel 2, yang menunjukkan keunggulan sistem modular baja dalam hal kecepatan, kemudahan akses, dan emisi karbon terendah, sejalan dengan temuan Lawson dkk. (2012), Huwaida dkk. (2025), dan Yan dkk. (2026).

Tabel 2. Perbandingan Alternatif Solusi

Kriteria	Beton Bertulang	Baja Struktural	Precast Beton	Modular Baja
Kecepatan Konstruksi	Sangat Lambat >90 hari	Cepat	Cepat	Sangat Cepat
Target 30 Hari	Tidak Mungkin	Sulit	Mungkin (dengan persiapan)	Sangat Mungkin
Penggunaan Alat Berat	Diperlukan	Diperlukan	Diperlukan	Tidak Diperlukan
Fleksibilitas Pentahapan	Sulit	Terbatas	Sulit	Sangat Mudah
Ketahanan Gempa	Standar	Standar	Standar	Teruji 9 SR
Emisi Karbon	Tinggi	Sedang	Sedang	Terendah
Kesesuaian Akses Terbatas	Kurang	Kurang	Kurang	Sangat Baik

Berdasarkan analisis tersebut, solusi yang terpilih adalah pembangunan bertahap dengan menggunakan sistem modular baja prefabrikasi MOBOX dari PT Adhi Karya. Tahap pertama difokuskan pada satu lantai yang mencakup ruang penerima, ruang *meeting/coworking*, ruang *security*, dua ruang arsip awal, musala, dan utilitas dasar, dengan sistem pondasi yang dirancang untuk angunan dua lantai guna pengembangan vertikal pada tahap berikutnya.

Evaluasi kinerja lingkungan pada studi ini dilakukan dengan mengutip data sekunder dari penelitian terdahulu. Tabel 3 menyajikan perbandingan *embodied carbon* berdasarkan hasil analisis LCA dari Yan dkk. (2026) untuk emisi Mobox, dan Pervez dkk. (2021) untuk emisi konvensional. Penulis sepenuhnya mengutip angka-angka ini sebagai data sekunder, bukan sebagai hasil uji atau perhitungan mandiri di lapangan. Temuan ini sejalan dengan penelitian Klammer dkk. (2022) yang mendemonstrasikan potensi pengurangan emisi karbon seumur hidup hingga 60% melalui produksi massal modular, serta penelitian dua menara modular di Inggris yang berhasil memotong *embodied carbon* sebesar 41-45% dibandingkan beton bertulang (RIBA Journal, 2022). Tabel 3 Perbandingan *Embodied Carbon* MOBOX dan Konstruksi Beton Konvensional (Data Sekunder dari Yan dkk., 2026 dan Pervez dkk., 2021).

Tabel 3. Perbandingan Embodied Carbon MOBOX dan Konstruksi Beton Konvensional

Proses	MOBOX 3x6 ($kgCO_2$)	Beton Konvensional ($kgCO_2$)
Ekstraksi bahan baku	1038,93	
Transportasi bahan baku ke pabrik	7,48	
Fabrikasi modul bangunan	36,60	
Transportasi modul ke lokasi proyek	4,02	
Instalasi dan perakitan di lapangan	0,82	
Total Emisi	**1.087,85**	**6.501,91**
Selisih / Penghematan	**5.414,06 $kgCO_2$ (83,27% lebih rendah)**	

 ISSN 2987-677x

Berdasarkan kutipan data sekunder tersebut, penghematan emisi sebesar 83,27% terutama berasal dari eliminasi proses *mixing* beton basah di lapangan, pengurangan volume material berat, serta konsumsi energi yang sangat minimal pada tahap instalasi (hanya 0,82 $kgCO_2$). Hasil ini mengonfirmasi temuan Yan dkk. (2026) bahwa ekstraksi material baja SS400 (1.038,93 $kgCO_2$) memiliki jejak karbon yang jauh lebih rendah dibandingkan emisi tersembunyi dari produksi semen, agregat, dan pengangkutan ke *batching plant* pada konstruksi konvensional. Selain capaian lingkungan (berdasarkan data sekunder), kinerja K3L selama 30 hari pelaksanaan di proyek ini juga menunjukkan nihil kecelakaan kerja dan nihil kerusakan lingkungan signifikan.

Analisis Pengambilan Keputusan Profesional

Perencanaan gedung arsip memiliki karakteristik teknis yang ketat, sebagaimana diatur dalam ISO 11799:2024 dan ANRI No. 31/2015. Teori percepatan konstruksi dari PMI (2021) dan Kerzner (2022) menekankan opsi *crashing* atau *fast tracking*, namun keduanya berisiko tinggi. Di lain sisi, beberapa penelitian menunjukkan bahwa konstruksi modular mampu memangkas durasi secara signifikan. Lawson dkk. (2012) mendokumentasikan pengurangan durasi 30-50%, sementara Huwaida dkk. (2025) mengonfirmasi efisiensi waktu 42% pada pekerjaan struktur modular di Indonesia. Keputusan memilih MOBOX merupakan hasil analisis yang tidak hanya mempertimbangkan waktu, tetapi juga dampak lingkungan.

Reduksi emisi karbon pada sistem modular baja secara teoretis dapat dijelaskan melalui tiga mekanisme utama. Pertama, efisiensi material yang signifikan. Gunawardena dkk. (2014) menunjukkan bahwa sistem pracetak baja dapat mengurangi konsumsi material hingga 78% berdasarkan massa dibandingkan konstruksi beton konvensional. Kedua, pergeseran lokasi produksi dari site ke pabrik. Penelitian oleh Corfar & Tsavdaridis (2024) dan Tsavdaridis & Corfar (2024) membuktikan bahwa konstruksi modular baja memindahkan sebagian besar aktivitas konstruksi ke lingkungan pabrik yang terkendali, sehingga emisi dari transportasi material dan aktivitas konstruksi di lapangan dapat ditekan secara signifikan. Ketiga, kontribusi terbesar emisi pada kedua sistem, baik baja maupun beton, berasal dari tahap material konstruksi, sehingga pengurangan volume material melalui desain optimal pada sistem baja berdampak langsung pada penurunan emisi secara keseluruhan. Temuan ini selaras dengan penelitian Yan dkk. (2026) yang menunjukkan bahwa tahap ekstraksi material menyumbang 95,5% dari total emisi Mobox 3x6, sehingga efisiensi material menjadi kunci reduksi karbon. Studi LCA sistematis terbaru oleh Kumar dkk. (2026) juga mengonfirmasi bahwa konstruksi modular umumnya lebih berkelanjutan daripada konstruksi beton cor di tempat (*cast-in-situ*), berkat pengurangan volume material yang signifikan dan optimalisasi struktur. Lebih lanjut, analisis komparatif oleh Zhang dkk. (2025) menunjukkan bahwa bangunan modular baja memiliki potensi mitigasi emisi karbon akhir masa pakai (*end-of-life*) yang jauh lebih besar dibandingkan bangunan modular beton.

Dari sisi pemeliharaan jangka panjang, penggunaan sambungan modular pada gedung arsip menghadirkan tantangan dan peluang tersendiri. Tantangan utama terletak pada kinerja sambungan antar-modul (*inter-module connections*) yang menjadi penentu stabilitas keseluruhan struktur. Sebagaimana dijelaskan oleh Corfar & Tsavdaridis (2024), sambungan konvensional yang dirancang elastis dapat menyebabkan deformasi permanen dan membatasi kemampuan penggunaan kembali modul. Untuk gedung arsip yang mensyaratkan kelembaban relatif 40-60%, risiko korosi pada sambungan baja menjadi perhatian serius, meskipun lapisan galvanis dan sistem ventilasi terintegrasi telah diantisipasi dalam perencanaan. Peluang yang ditawarkan sistem modular justru terletak pada kemudahan perawatan dan fleksibilitas. Pendekatan pemeliharaan proaktif berbasis pemantauan kondisi (*condition-based maintenance*) dengan sistem proteksi korosi dan pelapisan canggih diharapkan dapat semakin memperpanjang umur layanan infrastruktur baja (MDPI Infrastructures, 2025).

Hubungan antara temuan lapangan dan teori manajemen proyek modern dapat dilihat dari tiga perspektif. Pertama, dari sisi *lean construction*, konstruksi modular menerapkan prinsip-prinsip manufaktur ramping seperti *Just-In-Time delivery*, pengurangan pemborosan (*waste*), dan peningkatan efisiensi produksi (Koskela, 1992; Mishra & Aithal, 2022). Temuan lapangan berupa pengurangan emisi 83,27% dan efisiensi waktu 30 hari mencerminkan penerapan prinsip *lean* dalam praktik nyata. Kedua, dari perspektif *parallel processing*, konstruksi modular mengubah logika jadwal proyek dengan memungkinkan produksi modul di pabrik berlangsung paralel dengan persiapan lahan di lokasi. Hal ini sejalan dengan teori *schedule compression* dari PMI (2021) yang berupaya memadatkan jadwal, namun dengan pendekatan yang lebih fundamental, memindahkan pekerjaan dari jalur kritis ke aktivitas paralel daripada sekadar menambah sumber daya (*crashing*). Ketiga, dari sudut pandang *integrated project delivery* (IPD), keberhasilan proyek ini menegaskan bahwa kolaborasi intensif antara perencana, kontraktor, dan pemasok modul sejak tahap awal desain merupakan faktor kunci (Kent & Becerik-Gerber, 2010; PMI, 2021). Temuan Zhang dkk. (2025) bahwa struktur modular baja dapat mencapai penghematan emisi daur ulang yang signifikan pada akhir masa pakai menunjukkan bahwa keputusan yang diambil pada tahap perencanaan memiliki implikasi jangka panjang yang harus dipertimbangkan secara holistik, sebuah esensi dari manajemen proyek modern

 ISSN 2987-677x

yang berorientasi pada siklus hidup penuh (*whole-life cycle perspective*).

Proyek ini juga mengimplementasikan K3L secara ketat berdasarkan UU No. 1/1970, PP No. 50/2012, UU No. 32/2009, ISO 45001:2018, dan ISO 14001:2015, dengan hierarki kontrol mulai dari eliminasi alat berat hingga APD, serta mencapai *Zero Lost Time Injury*. Dari perspektif profesionalisme keinsinyuran, proyek ini mencerminkan penerapan Kode Etik Insinyur Indonesia Tahun 2021 (PII, 2021) melalui kejujuran, integritas, tanggung jawab lingkungan (yang dievaluasi melalui kajian data sekunder), dan kepatuhan regulasi.

Kesimpulan

Penerapan konstruksi modular prefabrikasi sistem MOBOX terbukti efektif dalam mengatasi keterbatasan waktu proyek, dengan keberhasilan pemenuhan target durasi pelaksanaan fisik tahap awal dalam 30 hari kalender. Berdasarkan analisis terhadap data sekunder dari penelitian Yan dkk. (2026), diketahui bahwa total emisi konstruksi Mobox 3x6 jika dibandingkan dengan angka pembanding konvensional dari Pervez dkk. (2021) menghasilkan penghematan emisi sebesar 83,27%. Pengambilan keputusan dalam proyek ini telah mempertimbangkan aspek teknis, regulasi, etika, keselamatan, dan lingkungan (dengan mendasarkan pada kajian literatur dan data sekunder) secara terintegrasi, serta berkontribusi pada pencapaian SDGs 9, 11, 12, dan 13. Dari sisi pemeliharaan jangka panjang, sistem sambungan modular memerlukan inspeksi korosi berkala, namun fleksibilitas dan efisiensi biaya perbaikannya lebih unggul dibandingkan beton konvensional.

Studi kasus ini memberikan pembelajaran bahwa keberhasilan proyek dengan sumber daya terbatas sangat ditentukan oleh kemampuan insinyur dalam menganalisis permasalahan, mengembangkan alternatif solusi berbasis data ilmiah (termasuk memanfaatkan data sekunder yang valid dari penelitian terdahulu), dan mengambil keputusan profesional secara komprehensif.

Ucapan Terimakasih

Penyusunan artikel ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, serta dukungan berbagai pihak. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmatnya, keluarga tercinta atas doa dan motivasinya, serta kepada seluruh civitas akademika Program Studi Profesi Insinyur Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya yang telah memberikan arahan, masukan, dan bimbingan selama penyusunan artikel ini.

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Badan Aksesibilitas Telekomunikasi dan Informasi (BAKTI) yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk terlibat dalam kegiatan profesional yang menjadi objek studi kasus ini, serta kepada CV Global Persada Consultant selaku tempat penulis bekerja yang telah mendukung pelaksanaan pekerjaan. Tidak lupa, ucapan terima kasih disampaikan kepada seluruh rekan kerja, kolega profesi, dan pihak-pihak lain yang telah memberikan bantuan serta dukungan selama proses penyusunan artikel ini.

Referensi

Arsip Nasional Republik Indonesia. (2015). *Peraturan Kepala ANRI Nomor 31 Tahun 2015 tentang Pedoman Pembentukan Depot Arsip*. Jakarta: ANRI.

Balasbaneh, A. T., & Ramli, M. Z. (2020). Prefabricated modules steel vs. concrete. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-022-02058-5

Badan Standardisasi Nasional. (2021). *SNI 1726:2019 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung*. Jakarta: BSN.

Corfar, D. A., & Tsavdaridis, K. D. (2024). Experimental test on a hybrid inter-module connection for steel modular building systems [Paper presentation]. *World Conference on Earthquake Engineering (WCEE 2024)*, Milan, Italy.

Göswein, V., et al. (2020). Prefabricated envelope composite system. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-022-02058-5

Gunawardena, T., Mendis, P., Ngo, T., Aye, L., & Alfano, J. (n.d.). *Sustainable Prefabricated Modular Buildings*. https://doi.org/10.13140/2.1.4847.3920

Hammond, G., Jones, C., Lowrie, E. F., & Tse, P. (2011). Embodied carbon. *Inventory of Carbon and Energy (ICE). Version 16*.

Huwaida, A., et al. (2025). Efisiensi waktu pada konstruksi modular dibandingkan metode konvensional. *Jurnal Teknik Sipil*, 12(1), 15-25.

Indonesia. (1970). *Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja* (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 1970 Nomor 1). Jakarta: Sekretariat Negara.

Indonesia. (2012). *Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012 tentang Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja* (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2012 Nomor 100). Jakarta: Sekretariat Negara.

Indonesia. (2014). *Undang-Undang Nomor 11 Tahun 2014 tentang Keinsinyuran* (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2014 Nomor 132). Jakarta: Sekretariat Negara.

ISO. (2015). *ISO 14001:2015 Environmental management systems — Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization.

ISO. (2018). *ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems — Requirements with*

 ISSN 2987-677x

guidance for use. International Organization for Standardization.

ISO. (2024). *ISO 11799:2024 Information and documentation — Document storage requirements for archive and library materials*. International Organization for Standardization.

Jayawardana, J., Kulatunga, A. K., Jayasinghe, J. A. S. C., Sandanayake, M., & Zhang, G. (2023). Environmental sustainability of off-site construction in developed and developing regions: A systematic review. *Journal of Architectural Engineering*, 29(2). American Society of Civil Engineers.

Jiang, W., et al. (2021). An analysis on promoting prefabrication implementation in construction industry towards sustainability. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21), 11493. https://doi.org/10.3390/ijerph182111493

Kent, D. C., & Becerik-Gerber, B. (2010). Understanding construction industry experience and attitudes toward integrated project delivery. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(8), 815-825.

Kerzner, H. (2022). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling* (13th ed.). Wiley.

Koskela, L. (1992). *Application of the new production philosophy to construction* (Technical Report No. 72). Stanford University.

Kumar, A., et al. (2026). A systematic review on life cycle assessment of prefabricated buildings. *Sustainable Horizons*, 17, 100168.

Lawson, M., Ogden, R., & Bergin, R. (2012). Application of modular construction in high-rise buildings. *Journal of Architectural Engineering, 18*(2), 148–154.

MDPI Infrastructures. (2025). Resilient and sustainable steel structures: Advanced manufacturing, lifetime extension and disaster mitigation. *Infrastructures, 10*(2), 35.

Mellado, F., Lou, E., & Correa Becerra, C. L. (2020). Synthesising performance in the construction industry: An analysis of performance indicators to promote project improvement. *Engineering, Construction and Architectural Management*.

Mishra, A. K., & Aithal, P. S. (2022). Assessing the magnitude of waste material using lean construction. *International Journal of Case Studies*.

Monahan, J., & Powell, J. C. (2011). An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. *Energy and Buildings*, 43(1), 179-188.

Nature. (2023). GHG emission and waste factors of main building materials. *Nature*. https://www.nature.com/

Persatuan Insinyur Indonesia. (2021). *Kode Etik Insinyur Indonesia Tahun 2021*. Jakarta: Persatuan Insinyur Indonesia.

Pervez, H., Ali, Y., & Petrillo, A. (2021). A quantitative assessment of greenhouse gas (GHG) emissions from conventional and modular construction: A case of developing country. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126210.

Project Management Institute. (2021). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide)* (7th ed.). Project Management Institute.

Stake, R. E. (1995). *The art of case study research*. Sage Publications.

Tavares, V., Lacerda, N., & Freire, F. (2019). Embodied energy and greenhouse gas emissions analysis of a prefabricated modular house: The 'Moby' case study. *Journal of Cleaner Production*, 212, 1044-1053.

Tsavdaridis, K. D., & Corfar, D. A. (2024). Experimental evaluation of hybrid inter-module joints – Performance of steel modular buildings under lateral loading [Paper presentation]. *The 15th Nordic Steel Construction Conference*, Luleå, Sweden.

Yan, A., Agung, W., & Syafrudin. (2025). Carbon Emission Analysis of Modular Construction (Case Study: Mobox 3x6). *E3S Web of Conferences*, *650*, 02021. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202565002021

Yin, R. K. (2014). *Case study research: Design and methods* (5th ed.). Sage Publications.

Yuristanti, T., Wiguna, I. P. A., & Budianto, H. (2020). Analysis of project performance criteria for design and build contract. *IPTEK Journal of Proceedings Series*, *6*, 1-6.

Zhang, L., et al. (2025). Comparative analysis of embodied carbon emissions in steel and concrete modular buildings. *ASCE Journal of Construction Engineering and Management, 151*(3), 04025012.

ISSN 2987-677x

Evaluasi Kapasitas Spasial dan Simulasi Mitigasi *Overcapacity* Zona Labuh di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya

M. Anjar Pamungkas[1] Suratno Lourentius[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ anjarpamungkas39@gmail.com

✉ suratno.lourentius@gmail.com

Penelitian ini berfokus pada evaluasi kapasitas spasial serta simulasi mitigasi kondisi *overcapacity* di Zona Labuh Pelabuhan Tanjung Perak, Surabaya. Latar belakang studi ini didasari oleh adanya ketidakseimbangan distribusi armada kapal yang menyebabkan penumpukan ekstrem, khususnya di Zona Labuh 2. Kondisi ini meningkatkan risiko keselamatan maritim secara signifikan, terutama terkait bahaya tabrakan kapal (*ship collision*) akibat tumpang tindih radius putar (*swinging radius*). Dengan menggunakan metode pemodelan dan simulasi komputasi statis melalui algoritma *Greedy* berdasarkan data operasional Agustus 2025, ditemukan bahwa Zona Labuh 2 mengalami lonjakan muatan hingga lebih dari 270%, dengan total defisit luasan mencapai 296,76 Hektar. Hasil simulasi menunjukkan bahwa skenario realokasi armada dari Zona 2 ke Zona 1 yang memiliki surplus 90,48 hektar hanya mampu menyerap maksimal 9 kapal. Hal ini menyisakan defisit ruang yang masih besar, yaitu 206,67 Hektar. Kesimpulan utama penelitian menegaskan bahwa realokasi tata letak armada bukanlah solusi tunggal yang efektif untuk mengatasi kendala ruang di Pelabuhan tersebut. Oleh karena itu, direkomendasikan adanya intervensi kebijakan strategis, seperti penerapan sistem *gate-keeping* berbasis data, penertiban kapal-kapal yang sedang tidak beroperasi (*idle*), serta pemberlakuan tarif labuh progresif untuk mengoptimalkan pemanfaatan ruang perairan.

Kata kunci: zona labuh, *overcapacity*, *swinging* radius, simulasi *greedy*, keselamatan maritim

Pendahuluan

Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya merupakan salah satu gerbang logistik dan pusat pergerakan maritim terbesar di Indonesia. Sebagai Pelabuhan utama, efisiensi operasional dan keselamatan navigasi di perairan Pelabuhan menjadi prioritas mutlak dalam menunjang kelancaran rantai pasok logistik (Notteboom, Pallis, dan Rodrigue, 2022). Salah satu komponen krusial dalam tata ruang perairan Pelabuhan adalah Zona Labuh (*anchorage area*), yakni area perairan yang ditetapkan bagi kapal-kapal untuk membuang sauh sambil menunggu jadwal sandar ke dermaga, kelengkapan dokumen, keperluan pengecekan dari instansi terkait yang ada di pelabuhan, atau perbaikan ringan ataupun bahkan kapal yang memang tidak beroperasi lagi.

Keselamatan operasional di pelabuhan sangat bergantung pada ketersediaan ruang perairan yang memadai bagi kapal untuk berlabuh. Secara teknis, setiap kapal memerlukan *swinging* radius (radius putar jangkar) yang aman untuk mengakomodasi pergerakan dinamis kapal akibat pengaruh angin, gelombang, dan arus laut (Thoresen, 2014). Pengabaian terhadap standar luasan ini secara langsung meningkatkan risiko tumpang tindih area antar-kapal (*overlapping*) yang memicu bahaya tubrukan (*ship collision*).

Namun, kondisi operasional di Pelabuhan Tanjung Perak menunjukkan adanya inefisiensi tata ruang yang ekstrem akibat ketidakseimbangan distribusi kapal. Berdasarkan data rekapitulasi operasional pada Agustus 2025, terjadi disparitas okupansi yang sangat tajam antar-zona labuh. Di Pelabuhan Tanjung Perak memiliki beberapa zona labuh yang telah ditetapkan sebagai area lokasi kapal untuk kegiatan berlabuh dengan mempertimbangkan GT Kapal dan jenis kapal diantaranya Zona Labuh 1, 2, 3, 4, dan 5. Untuk zona labuh 4 dan 5 merupakan zona labuh luar yang difungsikan untuk kapal-kapal dengan GT besar dan belum meliki daftar antrian sandar di dermaga, kemudian untuk Zona 1-3 merupakan tempat favorit bagi kapal untuk melakukan lego jangkar namun beberapa perusahaan pelayaran memiliki preferensi tinggi untuk berlabuh di Zona 1 karena jaraknya yang paling dekat dengan dermaga, guna mengefisiensikan manuver dan biaya pandu-tunda. Akibatnya, otoritas membatasi Zona 1 secara ketat sebagai buffer zone, yang justru mengakibatkan seluruh beban antrean kapal menumpuk di Zona 2 dan merembet ke Zona 3.

Seringkali, solusi instan yang dipikirkan oleh pemangku kepentingan untuk memecahkan penumpukan ini adalah memindahkan armada (realokasi fisik) dari zona padat ke zona kosong. Tanpa adanya evaluasi komputasi dan analisis spasial yang presisi, efektivitas langkah realokasi ini belum dapat dipastikan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan mengkuantifikasi tingkat keparahan kapasitas spasial eksisting tersebut. Studi ini juga melakukan simulasi strategi mitigasi berbasis matematis guna menguji apakah pemindahan kapal mampu

 ISSN 2987-677x

menuntaskan masalah, sehingga dapat dirumuskan rekomendasi kebijakan yang selaras dengan standar Keselamatan, Kesehatan Kerja, dan Lingkungan (K3L) serta etika keprofesian rekayasa maritim. Berdasarkan latar belakang tersebut, luaran dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan justifikasi akademis bagi otoritas pelabuhan untuk mengambil intervensi kebijakan tata ruang yang komprehensif.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui pemodelan komputasi spasial secara statis. Sumber data sekunder diperoleh dari rekapitulasi operasional Pelabuhan Tanjung Perak pada Agustus 2025 yang mencakup Kapasitas Area Ideal, Luas Penggunaan Eksisting, dan Jumlah Armada Kapal. Analisis dilakukan menggunakan bahasa pemrograman *Python* dengan pustaka *Pandas* dan *NumPy*. Tahapan pertama menghitung kebutuhan luas *swinging* radius rata-rata per kapal dan menetapkan kapasitas kapal ideal maksimum. Tahapan kedua mengidentifikasi kondisi *baseline* berupa nilai defisit/surplus area dan tingkat *overcapacity* kapal. Tahapan ketiga adalah simulasi realokasi armada menggunakan algoritma *Greedy* yang memindahkan sebanyak mungkin kapal dari area defisit ekstrem (Zona 2) ke area surplus (Zona 1) hingga sisa kapasitas secara matematis terpenuhi.

Hasil Kerja

Evaluasi Tata Ruang Eksisting

Kalkulasi faktual menunjukkan terjadinya ketidakseimbangan okupansi yang mengancam keselamatan navigasi. Zona 1, yang berbatasan langsung dengan alur masuk dermaga, sengaja dibatasi operasionalnya sehingga menyisakan surplus area sebesar 90,48 Ha. Sebaliknya, hal ini menyebabkan penumpukan antrean yang sangat parah di Zona 2. Berdasarkan rasio kebutuhan ruang, area ini idealnya hanya menampung 17 kapal, namun secara riil diokupasi oleh 47 kapal.

Tabel 1. Kondisi Eksisting Tata Ruang Zona Labuh (Sebelum Simulasi)

Zona Labuh	Kapasitas Ideal (Kapal)	Eksisting (Kapal)	*Overcapacity* (Kapal)	Defisit Area (Ha)
Zona 1	13	6	-7 (Surplus)	+90.48
Zona 2	17	47	+30	-296.76
Zona 3	7	14	+7	-77.19

Berdasarkan Tabel 1, defisit di Zona 2 mencapai -296,76 Ha atau mencerminkan lonjakan beban hingga lebih dari 270% dari batas daya tampung aman.

Pengujian Simulasi Realokasi Armada

Skenario mitigasi operasional yang sering digagas adalah merelokasi armada ke zona yang kosong. Melalui algoritma komputasi *Greedy*, seluruh surplus area di Zona 1 dioptimalkan untuk menyerap limpahan kapal dari Zona 2. Dengan asumsi kebutuhan per kapal dari Zona 2 adalah ~10,01 Ha, maka sisa ruang Zona 1 (90,48 Ha) hanya mampu menyerap maksimum 9 kapal tambahan (90,48 ÷ 10,01 = 9,03).

Setelah proses pemindahan tersebut, Zona 1 mencapai status kapasitas penuh. Akan tetapi, evaluasi ulang menunjukkan bahwa Zona 2 masih menanggung *overcapacity* sebanyak 21 kapal, dengan sisa defisit luasan sebesar 206,67 Ha. Hasil komputasi ini membuktikan secara ilmiah bahwa realokasi fisik tata letak hanyalah solusi semu yang tidak mampu menuntaskan masalah kekurangan ruang secara holistik.

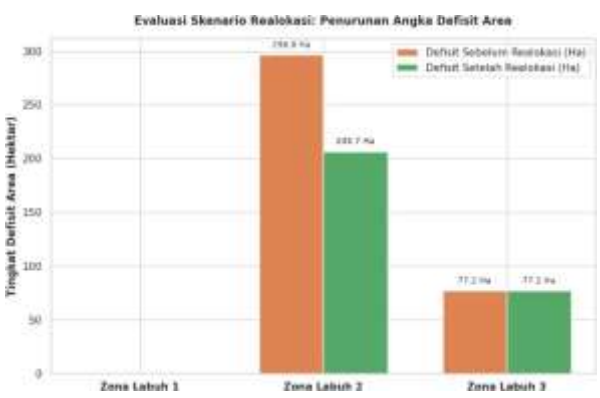
Implikasi K3L dan Kebijakan Strategis

Temuan *overcapacity* yang gagal diselesaikan melalui pemerataan beban ini membawa implikasi serius terhadap implementasi Keselamatan, Kesehatan Kerja, dan Lingkungan (K3L). Pembiaran atas defisit area negatif meningkatkan probabilitas terjadinya *ship collision* secara eksponensial (Zhang et al., 2015), yang pada gilirannya dapat memicu tumpahan minyak ke laut. Jika terjadi insiden yang berujung pada kebocoran lambung dan tumpahan minyak (*oil spill*), hal tersebut merupakan pelanggaran etika lingkungan yang sangat serius. Oleh karena itu, menegakkan batas kapasitas zona labuh adalah bentuk tanggung jawab moral terhadap kelestarian ekosistem laut dan kesejahteraan masyarakat pesisir di Selat Madura.

Bagi seorang insinyur maritim dan operator *Vessel Traffic Service* (VTS), penyelesaian masalah ini menuntut profesionalisme berupa keputusan berbasis data (*Data-Driven Decision Making*). Kebijakan administratif harus segera diterapkan, mencakup pembatasan kuota armada melalui *gate-keeping* ketat untuk jadwal sandar, pemaksaan evakuasi armada *idle* ke luar Daerah Lingkungan Kerja (DLKr), serta instrumen kontrol tarif progresif.

Tabel 2. Hasil Simulasi Realokasi Kapal (Zona 2 ke Zona 1)

Zona Labuh	Pasca-Simulasi	Sisa *Overcapacity*	Sisa Defisit Area (Ha)
Zona 1	15 (Penuh)	+2	+0.39 (Penuh)
Zona 2	38	+21	-206.67
Zona 3	14	+7	-77.19



Gambar 1. Evaluasi Skenario Realokasi

 ISSN 2987-677x

Data pada Tabel 2 mematahkan hipotesis bahwa memindahkan letak kapal adalah solusi tuntas. Meskipun Zona 1 telah dijejali armada hingga menyentuh margin batas maksimalnya, Zona 2 masih menderita sisa *overcapacity* sebanyak 21 kapal dengan defisit luasan yang sangat besar (206,67 Ha). Bukti komputasional ini mengonfirmasi bahwa akar permasalahan di Pelabuhan Tanjung Perak bukan sekadar salah penempatan armada, melainkan karena volume total kapal (*demand*) memang telah melampaui daya dukung perairan DLKr (*supply*) secara keseluruhan.

Implikasi terhadap Keselamatan Maritim dan Kepatuhan Regulasi Internasional

Pembiaran kondisi *overcapacity* yang terbukti gagal diselesaikan melalui realokasi ini membawa konsekuensi serius terhadap kepatuhan regulasi maritim. Tata ruang perairan yang mengalami defisit negatif menciptakan kondisi *overlapping swinging* radius yang sangat rentan. Dalam perspektif makro keselamatan navigasi, kondisi ini bertentangan dengan prinsip-prinsip *Safety of Life at Sea* (SOLAS). Kepadatan ekstrem menghambat kemampuan kapal untuk melakukan manuver penghindaran darurat ketika jangkar terseret (*dragging anchor*) akibat cuaca buruk. Selain itu, kondisi ini juga mendisrupsi efektivitas Sistem Manajemen Keselamatan yang diamanatkan *oleh International Safety Management* (ISM) *Code*. Perusahaan pelayaran tidak dapat menjamin lingkungan operasional yang bebas risiko bagi krunya apabila otoritas pelabuhan memaksakan kapal membuang sauh di zona yang terbukti secara matematis telah kehilangan ruang amannya.

Lebih lanjut, jarak antar-kapal yang berada di bawah ambang batas toleransi akan berdampak langsung pada beban kerja psikologis pandu laut dan perwira jaga (Mualim). Sesuai dengan pedoman *Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers* (STCW) terkait pencegahan kelelahan awak kapal (*fatigue*), kondisi kewaspadaan tingkat tinggi yang dilakukan secara terus-menerus di zona yang *overcapacity* berpotensi besar memicu terjadinya human *error* yang fatal.

Rekomendasi Solusi

Berdasarkan pembuktian saintifik bahwa alternatif realokasi tidak menyelesaikan *overcapacity*, maka direkomendasikan kebijakan intervensi struktural sebagai berikut:

1. Kebijakan Pembatasan (*Gate-keeping*): Melarang masuknya kapal ke perairan DLKr jika kapal tersebut belum memiliki Jadwal Penetapan Sandar (JPS) yang terkonfirmasi dari pengelola terminal.
2. Penertiban Kapal *Idle*: Memaksa armada kapal yang berstatus *idle* (seperti kapal rusak, menunggu *docking*, atau kapal yang disita secara hukum) untuk keluar dari DLKr perairan Tanjung Perak dan dilabuhkan di area *off-shore* alternatif.
3. Penerapan Sistem Tarif Progresif: Memberlakukan denda atau tarif labuh progresif bagi kapal komersial yang bersandar jangkar melampaui batas waktu wajar, guna memaksa rotasi pergerakan kapal.

Kajian Etika, Keselamatan, Kesehatan Kerja dan lingkungan

Dalam dinamika operasional pelabuhan modern, proses pengambilan keputusan sering kali dihadapkan pada persimpangan yang sulit antara pencapaian target pendapatan ekonomi dan pemenuhan standar keselamatan. Namun, membiarkan tata ruang perairan melampaui batas kapasitas amannya demi mengejar penerimaan dari jasa labuh merupakan bentuk nyata dari pengabaian prinsip dasar keselamatan maritim. Otoritas Pelabuhan sejatinya memegang tanggung jawab moral dan hukum yang absolut untuk senantiasa mengutamakan keselamatan jiwa di laut (*Safety of Life at Sea*/SOLAS) di atas segala bentuk kepentingan komersial. Secara spesifik, kajian etika dalam konteks operasional Pelabuhan ini mencakup dua aspek utama yang tidak terpisahkan, yaitu kejujuran dan integritas, serta tanggung jawab lingkungan.

1. Kejujuran dan Integritas dalam Manajemen Ruang Perairan

   Aspek pertama memegang peranan yang sangat krusial dalam hal pelaporan dan pengelolaan data kapasitas ruang perairan. Dalam praktiknya, pihak otoritas Pelabuhan beserta para operator *Vessel Traffic Service* (VTS) dituntut untuk mengedepankan profesionalisme dan integritas yang tinggi. Fakta mengenai kondisi *overcapacity* (kelebihan kapasitas) yang ekstrem, khususnya di area padat seperti Zona 2, sama sekali tidak boleh dimanipulasi, ditutupi, atau diabaikan.

   Sering kali, muncul tekanan untuk memanipulasi data daya dukung perairan ini demi mengakomodasi permintaan dari perusahaan-perusahaan pelayaran yang berupaya menekan biaya operasional mereka, seperti menghindari biaya jasa pandu dan kapal tunda. Padahal, keputusan untuk mengizinkan sebuah kapal masuk dan berlabuh haruslah murni didasarkan pada kalkulasi matematis yang akurat. Perhitungan jarak aman kelonggaran atau *swinging* radius harus menjadi patokan mutlak. Proses pengambilan keputusan ini wajib dilakukan secara transparan, dapat dipertanggungjawabkan secara keilmuan, serta menjunjung tinggi asas keadilan tanpa adanya diskriminasi perlakuan terhadap armada perusahaan pelayaran mana pun.

2. Kepatuhan Hukum

   Seluruh tindakan operasional Pelabuhan harus tunduk pada regulasi maritim nasional maupun internasional, termasuk standar desain pelabuhan dan pedoman alur pelayaran yang diakui secara global. Pembiaran terhadap okupansi yang secara faktual melampaui batas area (hingga mencapai

 ISSN 2987-677x

defisit 296,76 Ha di Zona 2) merupakan bentuk ketidakpatuhan terhadap standar profesi ke pelabuhan. Pengelola pelabuhan dituntut untuk mematuhi koridor hukum dan berani mengambil kebijakan tegas, seperti menolak izin labuh atau menertibkan kapal *idle*, meskipun tidak populer, demi menegakkan aturan tata ruang perairan yang berlaku.

3. Landasan Regulasi dan Relevansi Teknis

Penataan dan penggunaan zona labuh tidak terlepas dari regulasi hukum yang mengikat, baik di tingkat nasional maupun internasional. Secara nasional, operasional ini tunduk pada Undang-Undang No. 17 Tahun 2008 tentang Pelayaran serta serangkaian Peraturan Menteri Perhubungan terkait penetapan batas Daerah Lingkungan Kerja (DLKr) dan Daerah Lingkungan Kepentingan (DLKp) Pelabuhan. Secara teknis, kalkulasi *overcapacity* memiliki relevansi yang sangat kuat terhadap regulasi tersebut. Angka defisit area sebesar -296,76 Ha di Zona 2 bukan sekadar output komputasi matematis, melainkan bukti empiris mengenai ketidaksesuaian operasional terhadap standar daya tampung yang diatur dalam regulasi tata ruang Pelabuhan. Temuan teknis ini dapat dijadikan landasan objektif oleh regulator untuk menerbitkan kebijakan atau Surat Edaran (SE) pembatasan *draft* dan armada kapal.

Penyelesaian anomali penumpukan armada di perairan menuntut transformasi standar kompetensi bagi para profesional maritim. Dalam konteks operasional ini, relevansi kompetensi didefinisikan sebagai integrasi yang terukur antara pemahaman konseptual (pengetahuan) dan implementasi teknis di lapangan (keahlian).

Temuan studi komputasional membuktikan bahwa manajemen Pelabuhan modern tidak lagi cukup jika hanya mengandalkan pemantauan pandangan mata (*line of sight*). Oleh karena itu, terdapat kebutuhan kompetensi mendesak bagi perencana Pelabuhan (*port planners*), Syahbandar, dan operator VTS yang diuraikan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Matriks Relevansi Kompetensi (Pengetahuan vs Keahlian)

Aspek Operasional	Domain Pengetahuan (Knowledge)	Domain Keahlian (Skill)
Tata Ruang Perairan	Menguasai landasan teori swinging radius, regulasi luasan DLKr, dan standar kapasitas aman Pelabuhan.	Mampu menghitung dan mengevaluasi secara matematis tingkat defisit/surplus luasan perairan faktual.
Analitik Data Maritim	Memahami konsep Data-Driven Decision Making serta logika dari algoritma optimasi (Greedy Algorithm).	Mampu menginterpretasikan output komputasi (seperti data spasial GIS atau grafik Python) menjadi rancangan tata letak armada.
Manajemen Keselamatan (VTS)	Memahami tingkat bahaya tubrukan kapal (ship collision), mitigasi risiko K3L, dan tata cara manuver.	Mampu mengoperasikan sistem monitoring lalu lintas dan berani mengambil keputusan penolakan sandar secara real-time.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kapasitas spasial dan pengujian simulasi matematis yang telah dilakukan terhadap tata ruang Zona Labuh di perairan Pelabuhan Tanjung Perak, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Terjadi ketidakseimbangan tingkat overcapacity yang ekstrem antar-zona labuh. Secara faktual, Zona Labuh 2 mengalami tingkat overcapacity tertinggi hingga melampaui 270%, dengan defisit luasan mencapai 296,76 Hektar (menampung 47 kapal dari kapasitas ideal 17 kapal). Kondisi serupa terjadi di Zona Labuh 3 dengan defisit 77,19 Hektar. Penumpukan masif ini merupakan imbas dari tingginya minat perusahaan pelayaran untuk mendekat ke area dermaga demi efisiensi waktu serta biaya pandu dan tunda (*pilotage* & *towage*). Namun, karena penggunaan Zona Labuh 1 (area terdekat) direstriksi secara ketat sebagai *buffer zone*, antrean kapal akhirnya menumpuk secara berbahaya di Zona 2 dan Zona 3.
2. Skenario realokasi armada bukan merupakan solusi tunggal yang efektif. Berdasarkan pengujian komputasi menggunakan algoritma *Greedy*, pemindahan kapal dari zona yang padat (Zona 2) ke zona yang memiliki surplus ruang (Zona 1) terbukti gagal menyelesaikan masalah *overcapacity* secara holistik. Ruang surplus di Zona 1 yang sebesar 90,48 Hektar secara matematis hanya mampu menyerap maksimal 9 kapal tambahan. Pasca-simulasi, Zona 2 tercatat masih mengalami defisit yang parah (206,67 Hektar dengan sisa *overcapacity* 21 kapal). Hal ini membuktikan bahwa luasan perairan eksisting memang sudah tidak sebanding dengan total populasi kapal, sehingga risiko *overlapping swinging* radius dan tubrukan kapal (*ship collision*) akan tetap tinggi jika hanya mengandalkan pemindahan tata letak.

Oleh karena itu, direkomendasikan perlunya kebijakan intervensi struktural yang tegas oleh otoritas pelabuhan di antaranya sebagai berikut :

1. Kebijakan Pembatasan (*Gate-keeping*): Melarang masuknya kapal ke perairan DLKr jika kapal tersebut

 ISSN 2987-677x

belum memiliki Jadwal Penetapan Sandar (JPS) yang terkonfirmasi dari pengelola terminal.
2. Penertiban Kapal *Idle*: Memaksa armada kapal yang berstatus *idle* (seperti kapal rusak, menunggu *docking*, atau kapal yang disita secara hukum) untuk keluar dari DLKr perairan Tanjung Perak dan dilabuhkan di area *off-shore* alternatif.
3. Penerapan Sistem Tarif Progresif: Memberlakukan denda atau tarif labuh progresif bagi kapal komersial yang bersandar jangkar melampaui batas waktu wajar, guna memaksa rotasi pergerakan kapal.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Otoritas Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya dan pihak Kesyahbandaran atas penyediaan data operasional yang transparan, dan operator pelabuhan serta rekan-rekan sejawat di Pelabuhan Tanjung Perak yang telah membantu dalam penelitian ini, dan tak lupa apresiasi juga disampaikan kepada civitas akademika Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya yang telah memfasilitasi penelitian terapan ini demi terselenggaranya program studi peneliti hingga akhir semester dalam program Profesi Insinyur.

Referensi

Alderton, P. (2008). *Port management and operations* (Edisi ke-3). Informa Law from Routledge.

Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). *Introduction to algorithms* (Edisi ke-3). MIT Press.

Law, A. M. (2015). *Simulation modeling and analysis* (Edisi ke-5). McGraw-Hill Education.

Ligteringen, H., & Velsink, H. (2012). *Ports and terminals*. VSSD.

PIANC. (2014). *Harbour approach channels design guidelines* (Laporan No. 121). World Association for Waterborne Transport Infrastructure.

Thoresen, C. A. (2014). *Port designer's handbook* (Edisi ke-3). ICE Publishing.

Zhang, W., Goerlandt, F., Montewka, J., & Kujala, P. (2015). A method for detecting possible near miss ship collisions from AIS data. *Ocean Engineering*, *107*,60-69. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.07.046

 ISSN 2987-677x

Pengaruh Jumlah Tenaga Kerja Terhadap Keterlambatan Pekerjaan Gedung Konstruksi PT J

Chrisanta Lay[1]

[1] Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ verenlay7@gamil.com

Keterlambatan proyek merupakan salah satu permasalahan utama dalam industri konstruksi yang sering dipengaruhi oleh faktor sumber daya manusia, khususnya jumlah tenaga kerja, dan berpotensi berdampak pada mutu pekerjaan. Studi kasus ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jumlah tenaga kerja terhadap keterlambatan proyek pekerjaan pada konstruksi gedung PT Jamkrida NTT. Metode yang digunakan adalah pendekatan studi kasus dengan analisis deskriptif dan sebab-akibat, di mana data dikumpulkan melalui observasi lapangan, wawancara, dan studi dokumentasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa ketidaksesuaian jumlah tenaga kerja dengan kebutuhan pekerjaan menyebabkan penurunan produktivitas tenaga kerja, yang selanjutnya memicu keterlambatan proyek. Dengan demikian, terdapat hubungan yang erat antara jumlah tenaga kerja, keterlambatan proyek. Kesimpulan utama dari studi ini adalah bahwa optimalisasi jumlah tenaga kerja yang didukung dengan pengelolaan proyek yang baik menjadi kunci dalam meminimalkan keterlambatan proyek. Oleh karena itu, diperlukan penerapan manajemen tenaga kerja yang efektif untuk mencapai keseimbangan antara aspek waktu dan kualitas dalam proyek konstruksi.

Kata kunci: tenaga kerja, keterlambatan proyek, manajemen proyek

Pendahuluan

Sektor konstruksi merupakan salah satu sektor strategis dalam mendukung pembangunan ekonomi dan infrastruktur suatu wilayah. Keberhasilan suatu proyek konstruksi tidak hanya diukur dari selesainya pekerjaan, tetapi juga dari pencapaian tiga indikator utama yaitu ketepatan waktu, efisiensi biaya dan mutu hasil pekerjaan. Konsep ini dikenal sebagai *triple constraint* dalam manajemen proyek. Ketiga aspek tersebut harus dicapai secara seimbang karena kegagalan dalam satu aspek dapat berdampak pada aspek lainnya. Keterlambatan proyek konstruksi masih menjadi permasalahan umum, baik di Indonesia maupun secara global. Keterlambatan proyek tidak hanya berdampak pada aspek waktu, tetapi juga berimplikasi pada peningkatan biaya serta potensi penurunan mutu pekerjaan. Terdapat berbagai faktor yang menyebabkan keterlambatan proyek konstruksi, antara lain keterlambatan pengadaan material, keterbatasan peralatan, manajemen proyek yang kurang efektif, serta faktor tenaga kerja.

Pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan (*sustainable construction*) menjadi salah satu tujuan utama dalam industri konstruksi. Keberlanjutan tidak hanya menekankan aspek lingkungan, tetapi juga mencakup aspek ekonomi dan sosial, termasuk efisiensi penggunaan sumber daya, produktivitas tenaga kerja, keselamatan kerja, serta penyelesaian proyek tepat waktu. Keberhasilan suatu proyek konstruksi sangat dipengaruhi oleh kemampuan dalam mengelola sumber daya, terutama tenaga kerja, karena tenaga kerja merupakan salah satu faktor utama yang menentukan kelancaran pelaksanaan pekerjaan di lapangan.

Tenaga kerja menjadi salah satu faktor yang paling berpengaruh karena berhubungan langsung dengan produktivitas pekerjaan di lapangan. Faktor tenaga kerja, menyumbang tenaga pengaruh signifikan terhadap keterlambatan proyek, dengan kontribusi sekitar 30-50% terhadap produktivitas pekerjaan konstruksi. Produktivitas tenaga kerja, ketrampilan pengalaman serta manajemen kerja di lapangan. Oleh karena itu, pengelolaan tenaga kerja yang dapat menjadi kunci dalam menjaga kinerja proyek. Jumlah tenaga kerja yang tidak sesuai dengan kebutuhan pekerjaan dapat menyebabkan rendahnya produktivitas. Jika jumlah tenaga kerja terlalu sedikit, maka pekerjaan tidak dapat diselesaikan sesuai target waktu. Sebaliknya, jumlah tenaga kerja yang berlebihan tanpa pengelolaan yang baik dapat menimbulkan inefisiensi serta menurunkan kualitas pekerjaan akibat kurangnya koordinasi dan pengawasan. Selain jumlah tenaga kerja, aspek pengelolaan tenaga kerja juga memiliki peran penting dalam menentuka keberhasilan proyek. Kurangnya koordinasi dalam tim kerja seringkali menjadi penyebab terjadinya keterlambatan dan penurunan mutu pekerjaan. Pengaturan jadwal kerja, pembagian tugas, serta sistem pengawasan yang efektif sangat diperlukan untuk memastikan bahwa pekerjaan berjalan sesuai dengan rencana.

Pada proyek konstruksi yang dilaksanakan oleh PT Jamkrida NTT, ditemukan adanya indikasi keterlambatan pekerjaan proyek. Berdasarkan hasil survei awal di lapangan rencana pekerjaan sesuai

 ISSN 2987-677x

jadwal yakni selama 23 hari kerja namun mengalami keterlambatan hingga 31 hari kerja. Hal ini diduga berkaitan dengan ketidaksesuaian antara jumlah tenaga kerja yang direncanakan yakni sebanyak 44 orang dan realisasi aktual yang digunakan di lapangan yakni sebanyak 31 orang. Kondisi ini menunjukan bahwa adanya permasalahan nyata terkait dengan pengelolaan sumber daya manusia pada proyek kontruksi yang dapat berdampak pada keterlambatan pekerjaan dilapangan. Berdasarkan kondisi tersebut, studi kasus ini menjadi penting untuk dilakukan guna menganaalisis pengaruh jumlah tenaga kerja terhadapa keterlambatan proyek. Tujuan apa yang ingin dicapai melalui penulisan studi kasus ini adalah untuk menganalisis pengaruh jumlah tenaga kerja terhdapat keterlamabatan pekerjaan.

Metode

Metode pengumpulan data yang digunakan yakni observasi, wawancara, dan studi dokumentasi. Analisis data yang diunakan yakni Analisis deskriptif digunakan untuk menggambarkan kondisi jumlah tenaga kerja, tingkat keterlambatan proyek, serta mutu pekerjaan berdasarkan data yang diperoleh di lapangan dan analisis sebab-akibat digunakan untuk mengidentifikasi hubungan antara jumlah tenaga kerja dengan keterlambatan proyek serta dampaknya terhadap mutu pekerjaan dengan membandingkan jadwal rencana dan realisasi pekerjaan untuk mengukur tingkat keterlambatan proyek. Hasil analisis ini kemudian digunakan untuk mengevaluasi kondisi yang terjadi di lapangan serta merumuskan rekomendasi perbaikan dalam pengelolaan tenaga kerja pada proyek konstruksi.

Hasil Kerja

Analisis Permasalahan

Proyek kontruksi gedung PT JAMKRIDA merupakan salah satu proyek yang memiliki target penyelesaian dalam waktu tertentu dengan standar mutu yang telah ditetapkan. Pada tahap awal pelaksanaan, proyek direncanakan berjalan sesuai dengan jadwal (*time schedule*) yang telah disusun, dengan alokasi tenaga kerja yang disesuaikan berdasarkan volume pekerjaan pada masing-masing tahap konstruksi. Namun, dalam pelaksanaannya ditemukan adanya deviasi antara rencana dan realisasi waktu pekerjaan di lapangan sebesar 34,78% yang sejalan dengan teori produktivitas tenaga kerja konstruksi.

Menurut Sinungan (2005), produktivitas kerja sangat dipengaruhi oleh keseimbangan yang proporsional antara kuantitas tenaga kerja (*workforce quantity*) dengan volume beban kerja (*workload*). Ketika rasio pemenuhan tenaga kerja berada di bawah batas minimum kebutuhan teknis, maka beban kerja per individu akan melonjak drastis, kelelahan fisik meningkat, dan durasi total penyelesaian otomatis membengkak secara akumulatif. Kondisi awal proyek menunjukkan bahwa jumlah tenaga kerja yang dialokasikan pada beberapa jenis pekerjaan belum sepenuhnya sesuai dengan kebutuhan aktual di lapangan. Pada beberapa tahap pekerjaan, jumlah tenaga kerja relatif lebih sedikit dibandingkan dengan beban pekerjaan yang harus diselesaikan, sehingga menyebabkan penurunan produktivitas kerja. Selain itu, koordinasi antar tenaga kerja juga belum berjalan secara optimal, yang turut memperlambat proses penyelesaian pekerjaan

Tabel 1. Rencana Pekerjaan

No	Item Pekerjaan	Pekerja Aktual	Durasi Rencana (Hari)	Durasi Aktual (Hari)	Deviasi Waktu (Hari)
1	Pasangan Pondasi	7,00	5,00	7,00	2,00
2	Pembesian Balok dan Plat	7	5	7	2
3	Pengecoran Plat Lantai	6	4	5	1
4	Pasangan Dinding	6	3	4	1
5	Finishing	5	6	8	2

Berdasarkan Tabel 1 terdapa selisih durasi rencana kerja dan rencana actual yakni adanya deviasi penambahan tenaga kerja. Oleh karena itu, dibutuhkan perhitungan indeks koefisien kerja untuk menegtahui produktifitas harian tenaga kerja. Diketahui durasi realisasi pekerjaan yang direncanakan tidak sama dengan durasi aktual. Sehingga terlebih dahulu harus mengetahui indeks kinerja produktivitas tenaga yang dicapai yakni:

Indeks Efisiensi Lapangan = (Durasi Kerja Rencana)/(Durasi Kerja Aktual)

Durasi kerja Rencana = 5 Hari
Durasi Kerja Aktual = 7 Hari
Indeks Efisiensi Lapangan = 5/7
Indeks Efisiensi Lapangan = 0.71

Tabel 2. Indeks Efisiensi Lapangan

No	Item Pekerjaan	Pekerja Aktual	Durasi Rencana	Durasi Aktual	Deviasi	Indek Efisiensi Lapangan
1	Pasangan Pondasi	7,00	5,00	7,00	2,00	0,71
2	Pembesian Balok dan Plat	7,00	5,00	7,00	2,00	0,71
3	Pengecoran Plat lantai	6,00	4,00	5,00	1,00	0,80
4	Pasangan dinding	6,00	3,00	4,00	1,00	0,75
5	Finishing	5,00	6,00	8,00	2,00	0,75

Setelah mendapatkan efisiensi lapangan selanjutnya di cari kebutuhan tenaga kerja sesuai waktu yang yang direncanakan:

Kebutuhan Pekerja = (Durasi Kerja Aktual)/(Durasi Kerja Rencana) x Tenaga Kerja Aktual

Durasi aktual = 7 Hari
Durasi rencana kerja = 5 Hari
Tenaga kerja aktual = 7 orang
Kebutuhan Pekerja = (7 Hari)/(5 Hari) x 7 orang
Kebutuhan Pekerja = 9.8 = 10 rang

Total Tenaga yang dibutuhkan = Jumlah Tenaga Aktual - Kebutuhan Pekerja

 ISSN 2987-677x

Tenaga yang dibutuhkan = 7 – 10
Tenaga yang dibutuhkan = 3 orang Pekerja

Jumlah kebutuhan tenaga kerja berdasarkan hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Kebutuhan Jumlah Pekerja

No	Item Pekerjaan	Pekerja Aktual	Durasi Rencana	Durasi Aktual	Deviasi	Indek Efisiensi Lapangan	Kebutuhan Pekerja
1	Pasangan Pondasi	7,00	5,00	7,00	2,00	0,71	10
2	Pembesian Balok dan Plat	7,00	5,00	7,00	2,00	0,71	10
3	Pengecoran Plat lantai	6,00	4,00	5,00	1,00	0,80	8
4	Pasangan dinding	6,00	3,00	4,00	1,00	0,75	8
5	Finishing	5,00	6,00	8,00	2,00	0,75	7
	Total	31,00	23,00	31,00	8,00		42

Keterlambatan pekerjaan proyek memicu terjadinya tekanan waktu yang berdampak pada penurunan mutu dari pekerjaan konstruksi fisik. Berdasarkan teori manajemen proyek (Kerzner, 2017), keterlambatan pada fase awal sering kali memaksa tim pelaksana melakukan percepatan pekerjaan (*crashing/expediting*) di fase berikutnya tanpa perencanaan matang. Hasil observasi penulis di lapangan mengonfirmasi teori ini, di mana ditemukan indikasi penurunan kualitas fisik, seperti hasil permukaan beton yang kurang rapi serta munculnya defect yang menuntut pekerjaan ulang (*rework*). *Rework* terjadi karena berkurangnya waktu efektif untuk kontrol kualitas akibat fokus tim pelaksana terpecah demi mengejar ketertinggalan jadwal.

Secara skematis, hubungan sebab-akibat alur penurunan performa proyek di lapangan dapat disimpulkan yakni:

Jumlah Tenaga Kerja – Produktivitas – Keterlambatan

Hasil analisis menunjukkan bahwa permasalahan utama dalam studi kasus ini terletak pada pengelolaan tenaga kerja yang belum optimal. Ketidaksesuaian jumlah tenaga kerja dengan kebutuhan proyek menjadi faktor utama yang memicu keterlambatan, yang pada akhirnya berdampak pada mutu pekerjaan konstruksi. Oleh karena itu, diperlukan upaya perbaikan dalam manajemen tenaga kerja agar proyek dapat berjalan sesuai dengan target waktu dan standar kualitas yang telah ditetapkan.

Alternatif Solusi

Berdasarkan audit data harian dan mingguan proyek pada item pekerjaan struktur utama, ditemukan ketimpangan yang signifikan antara alokasi sumber daya manusia yang direncanakan dengan realisasi aktual di lapangan. Pada kondisi ideal (rencana Kurva-S), kebutuhan tenaga kerja untuk menyelesaikan item pekerjaan struktur tersebut ditetapkan sebanyak 44 orang pekerja. Namun, realisasi rata-rata jumlah tenaga kerja aktual yang tersedia di lapangan hanya mencapai 31 orang pekerja, sehingga proyek mengalami defisit sebesar 13 orang pekerja (atau kekurangan sebesar 29,55%).

Kekurangan jumlah pekerja ini secara langsung menurunkan kapasitas *output* produksi harian lapangan. Dampak linier terhadap durasi pelaksanaan dihitung menggunakan rumus deviasi waktu sebagai berikut:

Deviasi Waktu = Durasi Aktual - Durasi Rencana

Deviasi waktu = 31 hari – 23 hari
= 8 hari (keterlambatan)

Analisis hubungan antara jumlah tenaga kerja dan keterlambatan proyek menunjukkan adanya keterkaitan yang kuat. Berdasarkan hasil wawancara dengan pihak pelaksana proyek, diketahui bahwa keterbatasan tenaga kerja menyebabkan pekerjaan tidak dapat diselesaikan sesuai target harian. Hal ini mendukung hipotesis bahwa jumlah tenaga kerja berpengaruh terhadap keterlambatan proyek. Selain berdampak pada keterlambatan, kondisi ini juga mempengaruhi mutu pekerjaan konstruksi. Keterlambatan proyek seringkali menyebabkan adanya percepatan pekerjaan pada tahap berikutnya untuk mengejar target waktu. Menurut teori manajemen proyek (Kerzner, 2017), percepatan pekerjaan tanpa perencanaan yang matang dapat menurunkan kualitas hasil pekerjaan karena berkurangnya waktu untuk pengawasan dan pemeriksaan kualitas.

Berdasarkan hasil analisis menunjukan bahwa keterlambatan proyek dipengaruhi oleh ketidaksesuaian jumlah tenaga kerja serta berdampak pada mutu pekerjaan, oleh karena itu dibutuhkan alternatif solusi yang dapat diterapkan untuk mengatasi permasalahan tersebut dengan mempertimbangkan aspek teknis dan manajerial dalam pelaksanaan proyek konstruksi. Salah satu alternatif solusi yang dapat dilakukan adalah penyesuaian jumlah tenaga kerja sesuai dengan kebutuhan pekerjaan. Penambahan tenaga kerja pada item pekerjaan yang mengalami keterlambatan dapat meningkatkan produktivitas dan mempercepat penyelesaian pekerjaan. Namun, penambahan tenaga kerja harus dilakukan secara terencana agar tidak menimbulkan inefisiensi atau penurunan kualitas akibat kurangnya koordinasi. Skema penambahan tenaga kerja dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 4. *Reschedule* Tenaga Kerja

No	Item Pekerjaan	Pekerja Aktual	Durasi Rencana	Durasi Aktual	Deviasi	Indek Efisiensi Lapangan	Kebutuhan Pekerja	Selisih Kebutuhan Pekerja
1	Pasangan Pondasi	7,00	5,00	7,00	2,00	0,71	10	3
2	Pembesian Balok dan Plat	7,00	5,00	7,00	2,00	0,71	10	3
3	Pengecoran Plat lantai	6,00	4,00	5,00	1,00	0,80	8	2
4	Pasangan dinding	6,00	3,00	4,00	1,00	0,75	8	2
5	Finishing	5,00	6,00	8,00	2,00	0,75	7	2
	Total	31,00	23,00	31,00	8,00		42	11

Berdasarkan tabel di atas, diketahui bahwa setelah adanya penambahan tenaga kerja pada setiap item pekerjaan terjadi pemangkasan sehingga total durasi proyek turun dari 31 hari menjadi 23 hari. Berkaitan dengan penambahan tenaga kerja, penambahan ini tidak dilakukan secara membabi buta, melainkan

 ISSN 2987-677x

terencana agar tidak terjadi inefisiensi (hukum *Law of Dimishing Returns*). Jumlah pekerja 43 orang ini tidak melebihi rencana awal proyek (44 orang). Hal ini menjamin ruang kerja (*workspace)* dilapangan tidak padat, koordinasi mandor tetap efektif, dan mutu pekerjaan tetap terjaga karena beban kerja individu Kembali normal.

Alternatif solusi berikutnya adalah penerapan sistem kerja lembur (*overtime*) pada pekerjaan yang mengalami keterlambatan. Dengan menambah jam kerja, diharapkan target pekerjaan dapat tercapai sesuai dengan waktu yang telah ditentukan. Namun, penerapan lembur perlu memperhatikan kondisi fisik tenaga kerja agar tidak menurunkan produktivitas dan kualitas pekerjaan Oleh karena itu, diperlukan peningkatan pengawasan dan pengendalian di lapangan. Pengawasan yang lebih intensif oleh mandor atau pengawas proyek dapat memastikan bahwa pekerjaan dilaksanakan sesuai dengan standar teknis dan jadwal yang telah ditetapkan. Hal ini juga dapat meminimalkan kesalahan pekerjaan yang berpotensi menyebabkan pekerjaan ulang (*rework*). Penerapan lembur dilakukan dengan menambah jam kerja standar yang dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 5. Sistem *Overtime*

No	Item Pekerjaan (Struktur)	Pekerja Aktual (Awal)	Jam Kerja Normal (Jam/Hari)	Jam Kerja Lembur (Jam/Hari)	Durasi Sebelum Solusi (Hari)	Durasi Setelah Solusi (Hari)
A	Pembesian Balok & Pelat	7	8	+2	7	5,5
B	Bekisting Kolom	6	8	+2	5	4,0
C	Pengecoran Pelat Lantai	9	8	0 (Normal)	4	4,0
D	Pasangan Dinding Bata	4	8	+2	8	6,5
E	Finishing / Plesteran	5	8	+2	7	5,5
Total		**31**			**31**	**25,5**

Penerapan lembur dilakukan dengan menambah jam kerja standar dari 8jam/hari menjadi 10jam/hari (2 jam lembur) pada item pekerjaan yang kritis. Melalui sistem kerja lembur 2 jam/hari, total durasi proyek yang semula membengkak menjadi 31 hari berhasil dipangkas menjadi 25,5 hari (menheat 5,5 hari kerja). Secara teori manajemen konstruksi, *rework* (pekerjaan ulang akibat salah pasang/tidak sesuai spesifikasi) rata-rata memakan waktu 10% hingga 15% dari durasi aktual jika pengawasan longgar. Dengan peningkatan rasio pengawasan (misal: 1 mandor yang sebelumnya mengawasi 3 area, kini difokuskan menjadi 1 mandor per 1-2 area kerja).

Alternatif lain yang dapat diterapkan adalah peningkatan koordinasi dan komunikasi antar tenaga kerja. Koordinasi yang baik akan membantu memperlancar alur pekerjaan serta mengurangi hambatan yang terjadi di lapangan. Hal ini dapat dilakukan melalui *briefing* rutin sebelum pekerjaan dimulai serta evaluasi harian terhadap progres pekerjaan. Selain itu, dapat dilakukan pelatihan atau peningkatan keterampilan tenaga kerja untuk meningkatkan produktivitas dan kualitas pekerjaan. Tenaga kerja yang memiliki keterampilan yang baik cenderung mampu menyelesaikan pekerjaan dengan lebih cepat dan sesuai dengan standar yang telah ditetapkan.

Alternatif solusi lainnya adalah penerapan manajemen tenaga kerja berbasis produktivitas, yaitu dengan melakukan evaluasi terhadap kinerja tenaga kerja secara berkala. Dengan adanya evaluasi ini, pihak manajemen proyek dapat mengetahui tingkat produktivitas tenaga kerja dan melakukan penyesuaian yang diperlukan untuk meningkatkan kinerja proyek. Dengan penerapan solusi yang tepat, diharapkan keterlambatan proyek dapat diminimalkan serta mutu pekerjaan konstruksi tetap terjaga sesuai dengan standar yang telah ditetapkan.

Rekomendasi Solusi

Berdasarkan alternatif solusi yang telah diuraikan sebelumnya, diperlukan pemilihan solusi yang paling efektif dan efisien untuk mengatasi permasalahan keterlambatan proyek tanpa mengabaikan mutu pekerjaan adalah penyesuaian jumlah tenaga kerja yang diintegrasikan dengan pengaturan ulang jadwal kerja (*rescheduling*) dan peningkatan pengawasan di lapangan. Pemilihan solusi ini didasarkan pada hasil analisis yang menunjukkan bahwa akar permasalahan utama terletak pada ketidaksesuaian jumlah tenaga kerja terhadap kebutuhan pekerjaan. Dengan melakukan penyesuaian jumlah tenaga kerja secara tepat, maka beban kerja dapat didistribusikan secara seimbang sehingga produktivitas tenaga kerja meningkat. Peningkatan produktivitas ini secara langsung akan mempercepat penyelesaian pekerjaan dan mengurangi tingkat keterlambatan proyek.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan disimpulkan bahwa jumlah tenaga kerja berpengaruh terhadap keterlambatan proyek. Pengelolaan tenaga kerja yang tidak optimal menjadi salah satu faktor utama penyebab keterlambatan pekerjaan. Kondisi tersebut berdampak pada terganggunya pencapaian target waktu yang telah ditetapkan dalam jadwal pelaksanaan pekerjaan. Apabila tidak dilakukan pengelolaan dan perencanaan kebutuhan tenaga kerja secara tepat, maka risiko terjadihnya keterlambatan proyek akan semakin besar.

Dengan demikian, pengelolaan tenaga kerja yang tidak optimal dapat dianggab sebagai salah satu faktor utama penyebab keterlambatan pekerjaan. Upaya peningkatan perencanaan dan pengendalian tenaga kerja perlu dilakukan agar pelaksanaan proyek dapat berjalan sesuai jadwal, mencapai target yang telah ditentukan, serta meminimalkan potensi keterlambatan dimasa mendatang.

 ISSN 2987-677x

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan dan kontribusi selama proses penyusuna artikel ini. Secara khusus penulis memberikan apresiasi kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan. Masukan dan bimbingan sehingga artikel ini dapat diselesaikan dengan baik.

Referensi

Assaf, S. A., & Al-Hejji, S. (2006). Causes of delay in large construction projects. *International Journal of Project Management, 24*(4), 349–357.

Handoko, T. H. (2011). *Manajemen personalia dan sumber daya manusia*. BPFE.

Kerzner, H. (2017). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling* (12th ed.). Wiley.

Prasetyo, A. (2018). Analisis produktivitas tenaga kerja pada proyek konstruksi. *Jurnal Konstruksi, 7*(1), 45–52

Sinungan, M. (2005*). Produktivitas: Apa dan bagaimana.* Bumi Aksara.

Republik Indonesia. (1970). *Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja.*

Republik Indonesia. (2009). *Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.*

Republik Indonesia. (2012). *Peraturan Pemerintah Nomor 50 Tahun 2012 tentang Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3).*

Republik Indonesia. (2017). *Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2017 tentang Jasa Konstruksi.*

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001: Quality management systems.*