



Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

Kampus Kalijudan
Jl Kalijudan no. 37, Surabaya
Telp (031) 3893933 psw : 102
Email : pspipi@ukwms.ac.id



Seminar Praktik Keinsinyuran VII 2026
Peran Insinyur Profesional Dalam Reka Cipta Solusi Keberlanjutan
Berbasis Environmental, Social, and Governance (ESG)

PROSIDING



PROFESI INSINYUR
Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

PROSIDING

SEMINAR PROFESI KEINSINYURAN

SEMINAR PRAKTIK KEINSINYURAN VII
**PERAN INSINYUR PROFESIONAL DALAM REKA CIPTA
SOLUSI KEBERLANJUTAN BERBASIS ENVIRONMENTAL,
SOCIAL, AND GOVERNANCE (ESG)**



PROSIDING SEMINAR PRAKTIK KEINSINYURAN VII

TEMA

PERAN INSINYUR PROFESIONAL DALAM REKA CIPTA SOLUSI BERKELANJUTAN BERBASIS *ENVIRONMENTAL, SOCIAL, AND GOVERNANCE* (ESG)

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. Dr. Ir. Lusiana Permata Sari Hartanti, S.T., M.Eng., CIOMP., IPM., ASEAN Eng.
2. Ir. Andrew Joewono, S.T., M.T., IPU., ASEAN Eng., APEC Eng.
3. Dr. Ir. Suratno Lourentius, MS., IPM.

TIM EDITOR

1. Dra. Ir. Adriana Anteng Anggorowati, M.Si., IPU., ASEAN Eng.
2. Ir. Rasional Sitepu, M.Eng., IPU., ASEAN Eng.

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
3. Dr. Ir. Suratno Lourentius, MS., IPM.

KEYNOTE SPEAKER

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

No. ISSN : 2987-677x

Penyelenggara: Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

Tanggal : 20 Desember 2025



PRAKATA TIM EDITOR

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

PERAN INSINYUR PROFESIONAL DALAM REKA CIPTA SOLUSI BERKELANJUTAN BERBASIS *ENVIRONMENTAL, SOCIAL, AND GOVERNANCE* (ESG)

telah selesai disusun. Proses penyuntingan yang kami lakukan sepenuhnya berfokus pada standarisasi format teknis, meliputi pengaturan tata letak halaman, *margin*, sistem penomoran (isi, tabel, dan gambar), keseragaman *font*, serta perbaikan kesalahan pengetikan. Kami berkomitmen untuk tidak mengintervensi substansi materi. Oleh karena itu, segala aspek terkait orisinalitas ide, keakuratan referensi, hingga tanggung jawab hukum atas potensi plagiarisme sepenuhnya merupakan tanggungjawab penulis yang bersangkutan. Kami memohon pengertian dari seluruh pihak atas waktu yang dibutuhkan dalam proses penyelarasan ini. Apresiasi dan terima kasih kami sampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan moral maupun materiil hingga prosiding Seminar Praktik Keinsinyuran VII ini dapat diterbitkan. Akhir kata, kami memohon maaf atas segala kekurangan yang mungkin ditemukan dalam proses editorial ini.

Surabaya, 20 Desember 2025

TIM EDITOR



SAMBUTAN KETUA PANITIA

Selamat pagi dan salam sejahtera bagi kita semua.

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat-Nya, sehingga Seminar Praktik Keinsinyuran VII dengan tema "PERAN INSINYUR PROFESIONAL DALAM REKA CIPTA SOLUSI BERKELANJUTAN BERBASIS *ENVIRONMENTAL, SOCIAL, AND GOVERNANCE* (ESG)" dapat terselenggara sesuai rencana. Forum ini merupakan agenda wajib bagi Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya yang berfungsi sebagai wadah publikasi serta diseminasi berbagai hasil praktik keinsinyuran para calon insinyur.

Pada kesempatan ini, merupakan suatu kehormatan bagi kami untuk menghadirkan Ir. Hartono Pranjoto, Ph.D., IPU., ASEAN Eng., ACPE. sebagai narasumber utama. Beliau akan membagikan wawasan mendalam mengenai perkembangan *hardware* pendukung *Artificial Intelligence* (AI) yakni semikonduktor, yang menjadi representasi nyata dari implementasi rekayasa berkelanjutan dalam tema seminar kita kali ini.

Kami juga menyampaikan terima kasih yang tulus kepada Dekan Fakultas Teknik beserta jajarannya atas dukungan penuh yang diberikan demi kelancaran acara ini. Apresiasi setinggi-tingginya juga kami tujukan kepada Bapak Hartono Pranjoto, para pemakalah yang telah menyumbangkan karya ilmiah berkualitas, seluruh panitia yang telah bekerja keras, serta seluruh peserta atas antusiasme dan partisipasinya.

Kami menyadari bahwa dalam pelaksanaan seminar ini masih terdapat ruang untuk perbaikan. Oleh karena itu, mewakili seluruh panitia, kami memohon maaf atas segala kekurangan yang ada. Semoga seminar ini mampu memberikan manfaat serta perspektif baru dalam dunia keinsinyuran bagi kita semua. Selamat berseminar!

Surabaya, 20 Desember 2025

Ketua Panitia

SINOPSIS

Seminar Praktik Keinsinyuran merupakan puncak dari integrasi tiga mata kuliah wajib dalam kurikulum Program Studi Profesi Insinyur, yaitu: Studi Kasus; Pemateri pada Seminar, *Workshop*, dan Diskusi; serta Praktik Keinsinyuran. Edisi ketujuh ini mengusung tema "PERAN INSINYUR PROFESIONAL DALAM REKA CIPTA SOLUSI BERKELANJUTAN BERBASIS *ENVIRONMENTAL, SOCIAL, AND GOVERNANCE* (ESG)".

Materi utama berjudul "*The Brains behind the AI (Semiconductor): From Basic Gadgets to Superintelligence*" yang dipaparkan oleh Ir. Hartono Pranjoto, Ph.D., IPU., ASEAN Eng., ACPE. menjadi landasan pembahasan mengenai peran krusial insinyur dalam menciptakan inovasi teknologi hijau. Industri semikonduktor telah berevolusi dari sekadar komponen elektronik menjadi "darah" bagi peradaban digital sekaligus pusat gravitasi geopolitik modern. Perkembangannya bermula dari penemuan transistor di Bell Labs pada tahun 1947 yang menggantikan tabung vakum, lalu dipacu oleh Hukum Moore yang mendorong penggandaan jumlah transistor setiap dua tahun. Saat ini, kita telah memasuki era *Extreme Ultraviolet* (EUV), di mana mesin litografi tercanggih buatan ASML dari Belanda mampu mencetak sirkuit pada skala nanometer yang hampir mustahil secara fisika. Tanpa teknologi ini, lompatan besar dalam kecerdasan buatan (AI) tidak akan pernah terwujud, menjadikan segelintir perusahaan di rantai pasok ini sebagai pemegang kunci kemajuan manusia.

Dalam peta persaingan global, industri ini terbagi menjadi ekosistem yang sangat spesifik. Perusahaan Fabless seperti Nvidia, Apple, dan AMD fokus pada desain *chip* yang jenius, namun produksinya diserahkan kepada Foundry seperti TSMC yang mendominasi lebih dari separuh pangsa pasar dunia. Di sisi lain, raksasa IDM seperti Intel dan Samsung terus berjuang mempertahankan model bisnis terintegrasi dengan mendesain sekaligus memproduksi *chip* di fasilitas mereka sendiri. Namun, keajaiban ini berdiri di atas rantai pasok yang sangat rapuh; melibatkan perangkat lunak dari AS, bahan kimia dari Jepang, hingga tahap perakitan dan pengujian (ATP) di Asia Tenggara seperti Malaysia dan Vietnam.

Kerumitan rantai pasok ini diperparah oleh dinamika geopolitik yang menempatkan semikonduktor sebagai jantung keamanan nasional. Dominasi TSMC di Taiwan memicu kekhawatiran global akan ketergantungan pada satu titik koordinat rawan konflik, mendorong negara-negara Barat meluncurkan kebijakan *reshoring* seperti CHIPS Act. Perang dagang antara AS dan Tiongkok pun semakin meruncing pada tahun 2026 ini, ditandai dengan pembatasan ketat akses ke *chip* AI kelas atas. Semikonduktor bukan lagi sekadar komoditas, melainkan instrumen kekuasaan yang menentukan siapa yang memimpin masa depan.

Di tengah persaingan tersebut, peran etika dan profesionalisme insinyur menjadi jangkar penyeimbang. Para pengembang teknologi ini memiliki tanggung jawab etis untuk memastikan setiap inovasi tidak hanya mengejar performa, tetapi juga memprioritaskan keberlanjutan lingkungan melalui ekonomi sirkular, seperti daur ulang limbah kimia fabrikasi dan pengurangan limbah elektronik (*e-waste*). Dengan mengintegrasikan nilai-nilai *sustainability* ke dalam desain *chip*, komunitas insinyur global berupaya memastikan bahwa kemajuan teknologi AI dan digitalisasi tidak dibayar dengan kerusakan permanen pada planet bumi.



DAFTAR ISI

DEWAN REDAKSI	i
PRAKATA TIM EDITOR	ii
SAMBUTAN KETUA PANITIA	iii
SINOPSIS	iv
DAFTAR ISI	v

Peningkatan Efisiensi Manufaktur Melalui <i>Dashboard</i> MES Berbasis Google Sheets: Studi Kasus Transformasi Digital Terjangkau di UKM Furnitur Indonesia	1-5
Analisis Potensi Bahaya dan Resiko Aktivitas Praktikum di Laboratorium Fakultas Teknik Studi Kasus : Laboratorium Teknik Industri dan Teknik Kimia	6-10
Proses Instalasi Diesel Genset 50 KVA Sebagaimana SDG's 10 (Industri Inovasi dan Infrastruktur)	11-15
Penerapan <i>Early Start-Up Option</i> pada Proyek EPCI Fasilitas Baru Gas <i>Plant Modification for New Delivery Point of Gas Sales to PT PLN</i> (PLTGU Tenayan)	16-21
Analisa Penyebab Nilai <i>California Bearing Ratio</i> (CBR) pada Lapisan Tanah Atas (<i>Base Course</i>) yang Tidak Memenuhi Syarat dalam Pekerjaan <i>Access Road</i>	22-26
Sistem Informasi <i>Monitoring</i> Pengoperasian <i>Leasing Marine Vessel Power Plant</i> dan <i>Independent Power Producer (Simple Plant)</i> untuk Peningkatan Akurasi Perhitungan <i>Take or Pay</i> di PT PLN (Persero) AP2B Sistem Minahasa	27-31
Peran ISO 9001 dan ISO 27001 dalam Meningkatkan <i>Customer Satisfaction & Trust</i> di Perusahaan IT PT XYZ	32-36
Pembuatan Desain Set Alat <i>Screw Conveyor Refill Hopper</i> Resin pada Salah Satu <i>Line</i> Produksi	37-40
Penerapan Sistem Pendataan dan Pelacakan Material Berbasis IoT (<i>Internet of Thing</i>) dengan Teknologi RFID (<i>Radio Frequency Identification</i>) di PT PAL Indonesia (Persero)	41-45
Pembuatan Desain Set Alat <i>Screw Conveyor Refill Hopper</i> Resin pada Salah Satu <i>Line</i> Produksi	37-40
Penerapan Sistem Pendataan dan Pelacakan Material Berbasis IoT (<i>Internet of Thing</i>) dengan Teknologi RFID (<i>Radio Frequency Identification</i>) di PT PAL Indonesia (Persero)	41-45
Produksi Perencanaan Instalasi Penerangan pada Gedung Produksi Pabrik Rokok	46-49
Optimalisasi Pengelolaan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Sampah melalui Perubahan Tata Kelola dari <i>Open Dumping</i> menjadi <i>Sanitary Landfill</i> pada TPA Belaw Kabupaten Kutai Barat, Kalimantan Timur	50-54



Analisis Kebutuhan Perjalanan Kereta Api Bengawan Relasi Purwosari – Pasarsenen Berdasarkan Permintaan Pengguna Jasa	55-59
Optimalisasi Kadar FFA pada PFAD pada Proses <i>Deodorization</i> di Proses <i>Refinery</i> CPO	60-64
Evaluasi dan <i>Re-Mapping</i> APAR di Bangunan 2 (Gudang Bahan Baku & Barang Jadi) di PT Sumber Lancar Cemerlang	65-69
Implementasi Kode Etik dan Profesionalisme Keinsinyuran dalam Kegiatan Pengawasan Infrastruktur di Lingkungan Pemerintah Kabupaten Sumenep	70-74
Implementasi Algoritma <i>Best-Fit Decreasing</i> pada <i>One-Dimensional Cutting Stock Problem</i> untuk Produksi Tower BTS	75-80
Evaluasi Risiko Operasional Proyek Jalan Masing CPP Senoro Melalui Pendekatan FMEA dan Mitigasi Berbasis Hor 2 pada PT Banggai Sentral Sulawesi (PT BSS)	81-84
H2S Scavenger.....	85-88
<i>Scoring-Weighting Based Power Transformer Health Index for Diagnosis as a Step Towards Sustainable Asset Maintenance</i>	89-93
Mencegah <i>Unplanned Shutdown</i> pada <i>Recovery Boiler</i> dengan Menghilangkan Penumpukan Kerak (<i>Deposit</i>) pada Aliran Gas Buang	94-96
Energi Berkelanjutan Melalui Integrasi <i>System Zero Liquid Discharge</i> dan <i>Process Water Treatment</i> sebagai Implementasi <i>Sustainable Development Goals</i> (SDG-9) pada Industri Kimia	97-101
Pembuatan SOP Praktek di Laboratorium Konstruksi Jurusan Teknik Sipil	102-105
Evaluasi Program <i>Safety Talk</i> Sebagai Upaya Peningkatan Budaya K3 di Lingkungan Kerja KIP (Kapal Isap Produksi).....	106-108
Optimalisasi Peralatan Laboratorium Hidrolika untuk Meningkatkan Kualitas Pembelajaran Mahasiswa pada Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang	109-113
Pengaruh Penggunaan Hipoklorit Konsentrasi 5% pada Alat Hematologi Dymind DH-76 yang Sering Muncul <i>Error Tersumbat/Clog</i> di RS. POLRI Kramat Jati	114-118
Perbaikan Longsor Saluran Makro Perumahan Taman Telaga Kecamatan Cikupa Kabupaten Tangerang dengan Memasang <i>Washed Boring Pile</i>	119-124
Iradiasi Sinar Gamma Untuk Mengurangi Laju Keausan Material UHMWPE pada Sendi Panggul Buatan	125-129
Alternatif Penyediaan Sumber Air di PLTMG Tanjung Selor 15 MW di Tengah Keterbatasan Sumber Air untuk Proses dan Domestik	130-134
Mengurangi <i>Six Big Losses Idling and Minor Stoppages</i> Hopper Kosong Tidak Ada WIP Mix pada Produk Kopiko Blanca <i>Twinpack</i> Sebesar 100% dengan Modifikasi Proses dan Mesin	135-139



Optimalisasi Proses Pembuatan Pigmen <i>Masterbatch</i> untuk Menurunkan Persentase <i>Yarn Waste</i> Poliester	140-143
Implementasi <i>GIROBO BIOFECT</i> Metode <i>Rapid Smell Test</i> Berbasis IoT Untuk Minimasi Biaya <i>Reject</i> Galon AMDK	144-147
<i>Furniture Stool Eco-Friendly</i>	148-151
Kegagalan <i>Lifting Air Compressor</i> di Proyek Pembangunan Fasilitas Produksi Gas Matindok	152-155
Penerapan Prinsip Keinsinyuran dalam Pengembangan Media Pembelajaran Digital untuk Meningkatkan Keselamatan dan Efisiensi Praktikum Laboratorium Konstruksi	156-160
Analisis Dampak dan Penyebab Kebocoran <i>Condenser</i> pada Sistem <i>Degasser</i> di PT Asia Pacific Rayon Dalam Perspektif Keinsinyuran	161-164
<i>Sensitivity Grouping Based on Grammage of Paper at PM3 Web Inspection System</i>	165-169
Peningkatan <i>Gross Weight Acceptance</i> di Pabrik Pulp Dryer 1 dengan Mengimplementasikan Sistem Kendali Adaptif Menggunakan PLC (<i>Programmable Logic Controller</i>).....	170-174
Peran Arsitek dalam Pengelolaan Desain dan Pengawasan Pembangunan Masterplan Rumah Sakit Islam Jakarta Pondok Kopi Berbasis Keberlanjutan	175-179
Penerapan <i>Job Safety Analysis</i> (JSA) pada Praktikum Instalasi Listrik Rumah di SMK St. Louis Surabaya	180-183
Analisis SWOT dalam Menentukan Strategi Pengelolaan TPS3R Randuboto, Kabupaten Gresik	184-189
Pemanfaatan Gas CO ₂ Sebagai Bahan Baku Dalam Produksi PCC (<i>Precipitated Calcium Carbonate</i>): Solusi Industri terhadap Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca	190-194
Analisis Penambahan 1 Unit <i>Vacuum Pump</i> Cadangan untuk Mendukung <i>Overhaul</i> Bergiliran pada <i>Paper Machine 2</i>	195-196
Pemanfaatan Limbah Keramik Sebagai Pengganti Sebagian Agregat Halus Terhadap Karakteristik Campuran Aspal Beton (AC–WC)	197-201
Studi Kasus Pelaksanaan Survei, Investigasi, dan Desain (SID) Daerah Irigasi (D.I) Satar Lenda Sub D.I. Wae Laru Kabupaten Manggarai	202-206
Implementasi Monitoring Kadar Ozon untuk Meningkatkan Kualitas Air Minum Dalam Kemasan Berbasis <i>Internet Of Things</i>	207-210
Analisis Ekspansi Kernel Crushing Plant Kapasitas 600 Ton per Hari pada Perusahaan Ivo Mas Tunggal <i>Site</i> Lubuk Gaung Provinsi Riau – Indonesia	211-215
Penentuan Dosis PAC dan Flokulan pada Proses Koagulasi–Flokulasi Limbah Cair Industri Karton Menggunakan Metode <i>Jar Test</i>	216-219



Analisis Waktu dan Beban CPU SSH Server dengan Algoritma Kriptografi Berbeda (RSA, DSA, dan ECDSA)	220-223
Analisis Penentuan Skala Prioritas Pembangunan Jalan Kabupaten di Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) Mandalika Menggunakan ANP	224-228
Dinamika Konflik antara Masyarakat dan Perusahaan Tambang: Studi Kasus Penolakan Tambang di Kecamatan Sampaga, Kabupaten Mamuju	229-234
Analisis SWOT Sederhana sebagai Kajian Strategis Penanganan Kerusakan Jalan Berdasarkan Data Sekunder	235-238
Bahaya Risiko Drainase pada Jembatan Kembar Liliba	239-242
Reformulasi Material Beton U-Ditch Untuk Efisiensi Biaya Produksi di Departemen Jasa dan Properti K3PG	243-246
Perancangan Sistem Kepatuhan <i>Timeline</i> Antar Departemen untuk Meningkatkan Keandalan Rantai Pasok pada Industri FMCG	247-251
Evaluasi dan Koreksi Sistem Ventilasi pada Ruangan <i>Workshop</i> Fabrikasi	252-255
Analisis Kesesuaian Model MOOC Nasional untuk Implementasi MOOC Institusional: Rekomendasi Model Ideal untuk ITB Yadika Pasuruan	256-260



Peningkatan Efisiensi Manufaktur Melalui *Dashboard* MES Berbasis Google Sheets: Studi Kasus Transformasi Digital Terjangkau di UKM Furnitur Indonesia

Soni Hary Santoso¹ Andrew Joewono¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ sonnyhs77@gmail.com
✉ andrew_sby@ukwms.ac.id

Usaha kecil dan menengah (UKM) di negara berkembang menghadapi hambatan signifikan dalam mengadopsi teknologi Industri 4.0, terutama karena keterbatasan sumber daya dan mahalnya biaya implementasi. Studi ini memperkenalkan pendekatan transformasi digital yang ramah biaya menggunakan *dashboard Manufacturing Execution System* (MES) berbasis Google Sheets untuk meningkatkan efisiensi operasional pada satu UKM manufaktur furnitur di Indonesia. Penelitian menggunakan metode perbandingan sebelum-sesudah selama 12 bulan pada PT Cahaya Bintang Olympic, produsen furnitur *knock-down* di Indonesia. Pengumpulan data dilakukan melalui observasi langsung, analisis dokumen historis, wawancara terstruktur dengan para pemangku kepentingan, serta *input operator* secara *real-time*. Implementasinya menghasilkan peningkatan signifikan: *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) naik dari 69% menjadi 82% (kenaikan 13 poin), total *downtime* turun 32%, dan waktu pelaporan membaik dari 1-2 hari menjadi *real-time*. Komponen *availability* mengalami peningkatan tertinggi dari 78% menjadi 88%, *performance* naik dari 85% ke 90%, dan *quality* tetap stabil pada 96-97%. Analisis Pareto menunjukkan bahwa *breakdown losses* dan *setup losses* menyumbang 80% dari total *downtime*, sehingga inisiatif perbaikan dapat difokuskan secara efektif. Solusi MES berbiaya rendah ini membuktikan bahwa UKM mampu meraih perbaikan operasional signifikan melalui digitalisasi bertahap menggunakan alat yang mudah didapatkan, serta menyediakan model yang dapat direplikasi untuk konteks manufaktur serupa di negara berkembang.

Kata kunci: Transformasi Digital, Sistem Eksekusi Manufaktur, *Overall Equipment Effectiveness*, Industri 4.0, Manufaktur UKM

Pendahuluan

Revolusi Industri 4.0 secara mendasar telah mengubah paradigma manufaktur global melalui integrasi sistem siber-fisik, *Internet of Things* (IoT), komputasi awan, dan analitik *big data*. Transformasi ini menuntut ketersediaan data operasional secara *real-time* guna mengoptimalkan efisiensi, produktivitas, dan daya saing di pasar global yang semakin kompetitif. Industri furnitur Indonesia berkontribusi signifikan terhadap ekonomi nasional dengan nilai ekspor mencapai USD 1,3 miliar pada tahun 2023 dan menyerap tenaga kerja lebih dari 700.000 orang. Namun, mayoritas pelaku industri ini adalah UKM yang menghadapi tantangan finansial, infrastruktur yang belum memadai, serta keterbatasan keahlian teknis dalam mengadopsi teknologi Industri 4.0.

PT Cahaya Bintang Olympic, produsen furnitur *knock-down* terkemuka di Lamongan, Indonesia, dengan kapasitas produksi 200 kontainer per bulan, merupakan contoh nyata tantangan tersebut. Perusahaan ini sebelumnya masih mengandalkan pencatatan manual yang terfragmentasi, menyebabkan keterlambatan pemrosesan data hingga 1-2 hari, sulit mengidentifikasi akar masalah *downtime*, dan menghambat pengambilan keputusan berbasis data.

Asesmen awal menunjukkan OEE hanya sebesar 69%, tergolong "*typical*" menurut klasifikasi Hansen, jauh dari standar kelas dunia sebesar 85%. Penelitian ini menjawab kesenjangan solusi digitalisasi terjangkau bagi UKM dengan menerapkan prinsip Industri 4.0 melalui *dashboard* MES berbasis Google Sheets.

Tinjauan Pustaka

Manufacturing Execution System (MES) dalam Konteks UKM

Manufacturing Execution System (MES) merupakan sistem informasi yang menghubungkan perencanaan produksi dengan operasi lantai produksi, memberikan visibilitas *real-time* terhadap aktivitas manufaktur (McClellan, 2001). Sistem ini berfungsi sebagai jembatan antara *Enterprise Resource Planning* (ERP) dan sistem kontrol lantai produksi, memungkinkan pengumpulan, analisis, dan pelaporan data operasional secara terintegrasi. Dalam konteks UKM, implementasi MES tradisional seringkali terhambat oleh kompleksitas sistem dan investasi yang diperlukan.

Bianchini et al (2024) menekankan pentingnya solusi MES berbiaya rendah untuk lingkungan manufaktur UKM, mengidentifikasi kebutuhan akan pendekatan yang sederhana namun efektif. Penelitian mereka

menunjukkan bahwa UKM memerlukan solusi yang dapat diimplementasikan secara bertahap dengan investasi minimal, namun tetap mampu memberikan fungsi inti MES seperti pelacakan produksi, manajemen kualitas, dan analisis kinerja.

Industri 4.0 dan Transformasi Digital UKM

Konsep Industri 4.0 yang diperkenalkan di Jerman pada tahun 2011 menekankan empat prinsip desain utama, yaitu interoperabilitas, transparansi informasi, asistensi teknis, dan pengambilan keputusan yang terdesentralisasi (Hermann et al, 2016). Namun, implementasi prinsip-prinsip ini pada UKM menghadapi tantangan unik, terutama terkait keterbatasan sumber daya dan kapabilitas teknologi.

Müller et al (2018) dalam studi komprehensif terhadap 92 UKM manufaktur di Jerman menemukan bahwa hambatan utama adopsi Industri 4.0 adalah keterbatasan investasi (78%), kurangnya standar (69%), dan ketidakpastian manfaat ekonomi (68%). Studi serupa oleh Raj et al (2020) pada UKM India menunjukkan bahwa pendekatan transformasi digital bertahap dengan teknologi terjangkau dapat memberikan hasil yang signifikan meskipun dengan investasi terbatas.

Overall Equipment Effectiveness (OEE) sebagai Metrik Kinerja

Overall Equipment Effectiveness (OEE) dikembangkan oleh Nakajima (1988) sebagai bagian dari *Total Productive Maintenance* (TPM) dan telah menjadi standar industri untuk mengukur efektivitas peralatan manufaktur. OEE menggabungkan tiga komponen utama, yaitu *Availability* (ketersediaan), *Performance* (kinerja), dan *Quality* (kualitas), memberikan gambaran holistik tentang utilisasi peralatan. Hansen (2001) mengklasifikasikan tingkat OEE menjadi kelas dunia (>85%), *good* (65-84%), *typical* (40-64%), dan *low* (<40%). Penelitian Sumasto et al (2024) pada UKM otomotif Indonesia mendemonstrasikan peningkatan OEE dari 67,42% menjadi 77,80% melalui implementasi sistem pemantauan berbasis digital, mengonfirmasi potensi perbaikan signifikan pada sektor UKM.

Cloud-Based Tools dalam Manufaktur

Adopsi *cloud computing* dalam manufaktur telah membuka peluang bagi UKM untuk mengakses teknologi canggih tanpa investasi infrastruktur yang besar. Google Workspace, khususnya Google Sheets, menawarkan kemampuan komputasi kolaboratif dengan fitur-fitur yang dapat diadaptasi untuk kebutuhan manufaktur (Kumar & Singh, 2019). Platform ini menyediakan akses *real-time*, kemampuan otomatisasi melalui formula dan *script*, serta integrasi dengan berbagai *tools* lainnya. Penelitian Wang et al (2021) menunjukkan bahwa implementasi sistem monitoring berbasis *cloud* pada UKM tekstil China menghasilkan peningkatan efisiensi operasional sebesar 23% dan pengurangan biaya operasional sebesar 18%. Studi ini menekankan pentingnya *user-friendly interface* dan minimal *learning curve* dalam adopsi teknologi baru pada lingkungan UKM.

Gap Penelitian

Meskipun terdapat berbagai penelitian tentang MES dan digitalisasi UKM, masih terdapat kesenjangan dalam literatur terkait implementasi praktis sistem *monitoring* produksi menggunakan *tools* yang mudah diakses seperti Google Sheets. Kebanyakan studi fokus pada solusi *proprietary* atau *custom-built system* yang memerlukan investasi signifikan. Penelitian ini mengisi *gap* tersebut dengan menyediakan model implementasi yang praktis, terjangkau, dan dapat direplikasi untuk konteks UKM di negara berkembang.

Metode

Lokasi dan Durasi Penelitian

Penelitian dilakukan di PT Cahaya Bintang Olympic, fasilitas manufaktur furnitur *knock-down* di Lamongan, Jawa Timur. Perusahaan ini memproduksi berbagai jenis furnitur *knock-down* untuk pasar domestik dan ekspor dengan kapasitas 200 kontainer per bulan. Fasilitas produksi meliputi enam lini utama, yaitu *Cutting*, *Edging*, *Drilling*, *Body Shaping*, *Finishing*, dan *Packing*, dengan total 45 mesin dan 120 operator yang bekerja dalam tiga *shift*.

Studi menggunakan metode perbandingan sebelum-sesudah selama 12 bulan, yaitu fase pra-implementasi (Juli-Desember 2024) untuk pengumpulan data dasar dan desain sistem, dilanjutkan fase pasca-implementasi (Januari-Juni 2025) untuk penerapan sistem dan evaluasi dampak. Pendekatan ini dipilih untuk memastikan perbandingan yang valid dengan mengontrol variabel eksternal seperti kondisi pasar dan seasonal variations.

Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data mengombinasikan metode kualitatif dan kuantitatif untuk memastikan kelengkapan dan akurasi:

- **Observasi Langsung:** Observasi sistematis selama 8 jam per hari pada setiap *shift* terhadap alur kerja produksi, kejadian *downtime* mesin, serta aktivitas pencatatan manual. Data *downtime* dikategorikan berdasarkan *six big losses*, yaitu *breakdown losses*, *setup losses*, *small stoppage losses*, *reduced speed losses*, *quality defects*, dan *reduced yield*.
- **Analisis Dokumentasi:** *Review* komprehensif terhadap laporan produksi historis, *log downtime* manual, dan catatan *maintenance* selama 12 bulan sebelum implementasi untuk menetapkan *baseline performance metrics*.
- **Wawancara Terstruktur:** Wawancara mendalam dengan 15 *stakeholder* kunci (3 manajer produksi, 6 *supervisor*, 6 operator senior) menggunakan kuesioner terstandarisasi untuk memahami kebutuhan informasi, tantangan operasional, dan ekspektasi sistem.

Pengembangan Dashboard MES

Dashboard MES berbasis Google Sheets didesain dengan arsitektur modular meliputi:

- **Modul Input Data:** *Interface user-friendly* dengan *dropdown validation* untuk memastikan konsistensi

input data *downtime*, produksi, dan kualitas per mesin dan *shift*.

- **Engine Kalkulasi:** Sistem perhitungan otomatis menggunakan formula Google Sheets untuk menghitung $Availability = (Total\ Time - Downtime) / Total\ Time$, $Performance = (Total\ Production \times Ideal\ Cycle\ Time) / Operating\ Time$, $Quality = Good\ Production / Total\ Production$, dan $OEE = Availability \times Performance \times Quality$.
- **Dashboard Visualisasi:** Grafik interaktif *real-time* menampilkan tren OEE, distribusi *downtime* berdasarkan kategori *six big losses*, dan perbandingan kinerja antar lini produksi.
- **Sistem Alert:** *Conditional formatting* dengan color coding (merah <70%, kuning 70-80%, hijau >80%) dan notifikasi email otomatis untuk nilai OEE di bawah target.

Validasi Data dan Quality Control

Protokol validasi data multi-layer diterapkan untuk memastikan integritas:

- **Verifikasi Real-time:** *Cross-check entry* operator dengan supervisor di setiap akhir *shift* terhadap backup manual log.
- **Audit Sampling:** Audit acak mingguan pada 20% data dengan triangulasi menggunakan CCTV *timestamp* dan *maintenance records*.
- **Statistical Validation:** Uji *outlier* menggunakan *Interquartile Range* (IQR) method dan validasi *trend* menggunakan *control charts*.

Hasil audit menunjukkan tingkat akurasi data 94,2% dengan *margin of error* $\pm 2,1\%$.

Framework Analisis

Analisis data menggunakan pendekatan *mixed-method*:

- **Analisis Deskriptif:** Perbandingan *mean*, median, dan *standard deviation* OEE sebelum-sesudah implementasi menggunakan *descriptive statistics* dan *visualization tools*.
- **Analisis Inferensial:** Uji signifikansi menggunakan *paired t-test* untuk mengevaluasi perbedaan OEE sebelum dan sesudah implementasi dengan *confidence level* 95%.
- **Root Cause Analysis:** Kombinasi *fishbone diagram* untuk identifikasi faktor penyebab (4M: *Man, Machine, Method, Material*) dan analisis Pareto untuk *prioritas improvement* berdasarkan prinsip 80/20.

Hasil Kerja

Peningkatan Overall Equipment Effectiveness (OEE)

Implementasi *dashboard* MES berbasis Google Sheets memberikan peningkatan OEE yang substansial dan terukur. Data menunjukkan peningkatan rata-rata OEE dari 69,2% ($\pm 4,1\%$) menjadi 82,1% ($\pm 2,8\%$) setelah implementasi, menghasilkan *net improvement* sebesar 12,9 poin persentase. Uji *paired t-test* mengonfirmasi signifikansi statistik peningkatan ini ($p < 0,001$, CI 95%). Peningkatan ini mengubah status kinerja perusahaan dari kategori "*typical*" menjadi "*good*" menurut klasifikasi Hansen (2001).

Analisis per Komponen OEE:

- **Availability** mengalami peningkatan tertinggi dari 78,3% menjadi 88,1% (+9,8 poin)
- **Performance** naik dari 84,7% menjadi 90,3% (+5,6 poin)
- **Quality** menunjukkan stabilitas tinggi dari 96,2% menjadi 96,4% (+0,2 poin)

Data bulanan menunjukkan tren peningkatan konsisten dengan *coefficient of variation* yang menurun dari 5,9% menjadi 3,4%, mengindikasikan peningkatan stabilitas proses produksi.

Analisis Pareto dan Penurunan Downtime

Total *downtime* mengalami penurunan signifikan sebesar 32,4% dari rata-rata 180 menit/*shift* menjadi 121 menit/*shift*. Analisis Pareto mengidentifikasi dua faktor dominan yang berkontribusi 79,3% terhadap *total downtime*:

- **Breakdown Losses:** Turun 33,1% dari 45,2% menjadi 30,2% dari *total downtime*, terutama karena implementasi *predictive maintenance alerts* dan standarisasi prosedur *troubleshooting*.
- **Setup Losses:** Penurunan dramatis 42,7% dari 34,8% menjadi 19,9%, hasil dari standarisasi *changeover procedures* dan *real-time monitoring setup time*.

Kategori lain menunjukkan perbaikan moderat: *small stoppage losses* turun 18,3%, *reduced speed losses* turun 15,7%, sementara *quality defects* dan *reduced yield* relatif stabil karena sudah berada pada level yang baik sebelum implementasi.

Peningkatan Responsivitas Operasional

Transformasi dari sistem pelaporan manual dengan *delay* 24-48 jam menjadi *monitoring real-time* menghasilkan peningkatan dramatis dalam responsivitas operasional. *Mean Time to Response* (MTTR) untuk *issue critical* turun dari 127 menit menjadi 23 menit. *Dashboard alert system* memungkinkan identifikasi dan eskalasi masalah dalam waktu kurang dari 5 menit, memfasilitasi pengambilan keputusan proaktif dan pencegahan *loss* yang lebih besar.

Cost-Benefit Analysis

Analisis ekonomi menunjukkan *Return on Investment* (ROI) yang sangat menarik. Total investasi implementasi hanya Rp 15,2 juta (terutama untuk pelatihan dan *setup*), sementara benefit tahunan diestimasi Rp 847 juta dari peningkatan *output* (+3,8%), pengurangan *waste* (-32,4%), dan efisiensi operasional. Hal ini menghasilkan *payback period* hanya 0,22 tahun atau sekitar 2,6 bulan, sangat berbeda dengan solusi MES konvensional yang memerlukan *payback period* 3-5 tahun.

Validasi Stakeholder dan Faktor Keberhasilan

Evaluasi *post-implementation* melalui *structured interview* mengonfirmasi hasil kuantitatif:

- **Management Level (n=3):** 100% menyatakan peningkatan *visibility* dan *decision-making capability*, dengan *particular appreciation* terhadap *real-time OEE dashboard* dan *automated reporting*.
- **Supervisor Level (n=6):** 83% melaporkan *improvement* dalam *crew coordination* dan *issue*

resolution time, meskipun 17% masih mengalami *adaptation challenges*.

- **Operator Level (n=6):** 67% merasa lebih *engaged* dalam *continuous improvement process*, namun 33% memerlukan *additional training* untuk optimal utilization.

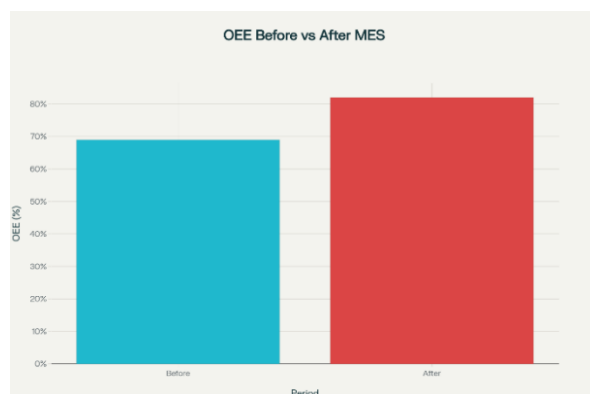
Tantangan dan Lesson Learned

Implementasi menghadapi beberapa tantangan teknis dan organisasional:

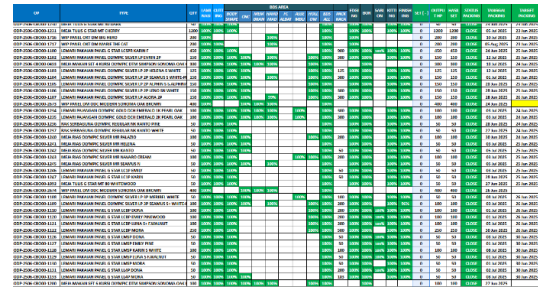
- **Konektivitas Internet:** *Intermittent connectivity* (downtime 3-4 jam/bulan) diatasi dengan *offline input capability* dan *batch synchronization*, namun masih memerlukan *backup procedures*.
- **Change Management:** *Initial resistance* dari 28% operator diatasi melalui *intensive training program* dan *incentive alignment*, menunjukkan pentingnya *people-centric approach* dalam *digital transformation*.
- **Data Quality:** *Manual input errors* (5,8% dari total entries) diminimalisir dengan *input validation* dan *cross-verification protocols*, namun *future improvement* perlu mempertimbangkan *sensor integration* untuk *automated data capture*.

Tabel 1. OEE Component Analysis: Pre vs. Post Implementation

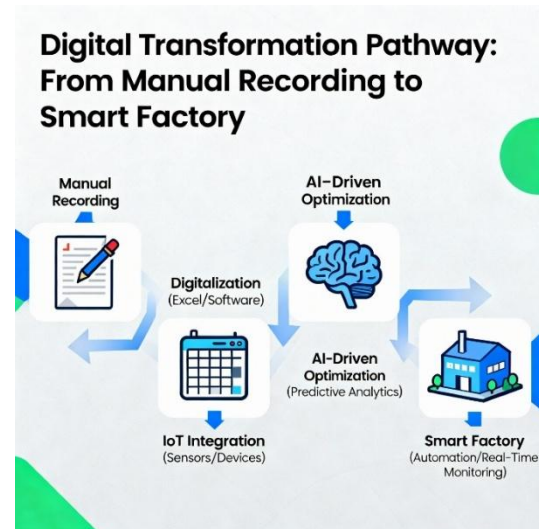
Metric	Pre-Implementation (Jul-Dec 2024)	Post-Implementation (Jan-Jun 2025)	Improvement
OEE (%)	69.0	82.0	+13.0 points
Availability (%)	78.0	88.0	+10.0 points
Performance (%)	85.0	90.0	+5.0 points
Quality (%)	96.2	96.5	+0.3 points
Monthly Output (units)	18,133	18,825	+3.8%



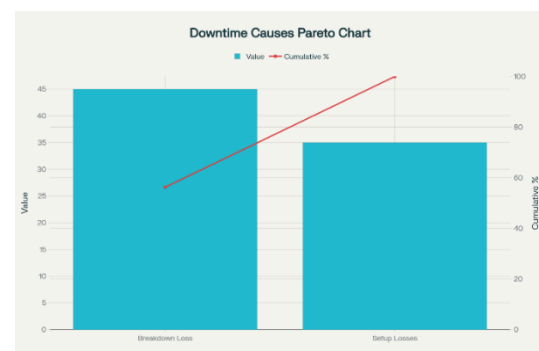
Gambar 1. Overall Equipment Effectiveness (OEE) Improvement: Before vs. After MES Dashboard Implementation



Gambar 2. Google Sheets-based MES Dashboard Interface Design



Gambar 3. Digital Transformation Pathway: From Manual Recording to Smart Factory



Gambar 4. Pareto Analysis of Downtime Causes (80-20 Rule Application)

Kesimpulan

Kesimpulan Utama

Penelitian ini membuktikan bahwa transformasi digital terjangkau dapat dicapai UKM manufaktur melalui pemanfaatan teknologi *cloud-based* yang mudah diakses. Implementasi *dashboard MES* berbasis Google Sheets di PT Cahaya Bintang Olympic menghasilkan peningkatan kinerja operasional yang signifikan dan terukur: kenaikan OEE sebesar 12,9 poin (dari 69,2% menjadi 82,1%), penurunan *total downtime* 32,4%, dan transformasi pelaporan dari *delay* 1-2 hari menjadi *real-time monitoring*.

Model ini mendemonstrasikan bahwa prinsip-prinsip Industri 4.0, khususnya transparansi informasi



dan asistensi teknis, dapat diimplementasikan efektif menggunakan teknologi sederhana dan terjangkau. *Cost-benefit analysis* menunjukkan ROI yang sangat *attractive* dengan *payback period* hanya 2,6 bulan, membuktikan viabilitas ekonomis solusi ini untuk konteks UKM.

Implikasi Manajerial

Temuan penelitian ini memberikan *roadmap* praktis bagi UKM manufaktur untuk memulai *journey* digitalisasi tanpa investasi besar. *Framework* implementasi yang dikembangkan dapat diadaptasi untuk berbagai sektor manufaktur dengan *customization* minimal, menawarkan *alternative pathway* menuju *industry 4.0 readiness*.

Kontribusi Teoritis

Studi ini memperkaya literatur *digital transformation* dengan membuktikan bahwa *sophisticated manufacturing concepts* seperti MES dapat diimplementasikan menggunakan *consumer-grade cloud tools*. Penelitian ini juga mengonfirmasi *applicability OEE framework* pada konteks UKM Indonesia dan memberikan *empirical evidence* tentang efektivitas *incremental digitalization approach*.

Keterbatasan dan Penelitian Selanjutnya

Periode evaluasi 6 bulan *post-implementation* belum mencakup *seasonal variations* dan *sustainability* jangka panjang. Penelitian selanjutnya disarankan untuk: (1) *longitudinal study* dengan durasi minimal 2 tahun, (2) *multi-site validation across different manufacturing sectors*, (3) *integration dengan IoT sensors* untuk *automated data capture*, dan (4) *development of standardized implementation framework* untuk *scaling up*.

Ucapan Terimakasih

Penulis berterima kasih kepada PT Cahaya Bintang Olympic atas akses fasilitas dan data operasional, juga pada manajer produksi, supervisor, serta operator yang terlibat. Penelitian ini didukung oleh Program Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya.

Referensi

- Hansen, R.C. (2001). *Overall equipment effectiveness: A powerful production/maintenance tool for increased profits*. Industrial Press Inc.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for Industrie 4.0 scenarios. *Proceedings of the 49th Hawaii International Conference on System Sciences*, 3928-3937.
- Bianchini, A., Rossi, D., & Pellegrini, M. (2024). Methodology for MES implementation in budget-constrained SME manufacturing environments. *Journal of Manufacturing Systems*, 73, 128-141.
- McClellan, M. (2001). *Applying manufacturing execution systems*. CRC Press.
- Müller, J.M., Kiel, D., & Voigt, K.I. (2018). What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability*, 10(1), 247.
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Productivity Press.

Kumar, A., & Singh, R.K. (2019). Cloud computing adoption in manufacturing SMEs: A framework development. *International Journal of Production Research*, 57(22), 7135-7154.

Raj, A., Dwivedi, G., Sharma, A., Lopes de Sousa Jabbour, A.B., & Rajak, S. (2020). Barriers to the adoption of industry 4.0 technologies in the manufacturing sector. *Computers & Industrial Engineering*, 148, 106726.

Sumasto, D., Kumar, A., & Sharma, P. (2024). Lean integration of MES solutions in Indian automotive SMEs. *Journal of Manufacturing Processes*, 63, 257-270.

Wang, L., Zhang, Y., & Liu, H. (2021). Cloud-based manufacturing execution system implementation in Chinese textile SMEs. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115, 2847-2861.



Analisis Potensi Bahaya dan Resiko Aktivitas Praktikum di Laboratorium Fakultas Teknik Studi Kasus : Laboratoirum Teknik Industri dan Teknik Kimia

Arif Nuryono¹ Muhammad Hafiizh¹ Lusia
Permata Sari Hartanti¹ Hartono Pranjoto¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ arif.nuryono@dsn.ubharajaya.ac.id

Pendahuluan

Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan aspek mendasar yang perlu mendapat perhatian serius dalam setiap aktivitas, baik di dunia industri maupun di lingkungan pendidikan tinggi. K3 berfungsi melindungi tenaga kerja dan mahasiswa dari risiko kecelakaan dan penyakit akibat kerja yang mengganggu keselamatan dan keberlangsungan proses pembelajaran (Kusuma & Bima, 2022). Landasan hukum penerapan K3 diatur dalam Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja yang menetapkan persyaratan keselamatan di berbagai tempat kerja, termasuk laboratorium, serta diperkuat melalui Permenaker Nomor 5 Tahun 2018 mengenai standar keselamatan, kesehatan, dan lingkungan kerja.

Dalam konteks pendidikan tinggi, penerapan K3 di laboratorium tidak hanya bertujuan menciptakan lingkungan kerja yang aman dan sehat, tetapi juga selaras dengan prinsip keberlanjutan (*sustainability*). Konsep ini menekankan efisiensi penggunaan sumber daya, pengelolaan limbah berbahaya secara bertanggung jawab, serta upaya menjaga keseimbangan antara keselamatan kerja dan pelestarian lingkungan. Integrasi nilai-nilai *sustainability* dalam pengelolaan laboratorium diharapkan mampu membangun budaya kerja yang berorientasi pada keselamatan jangka panjang, efisiensi energi, dan kepedulian terhadap lingkungan.

Laboratorium di Fakultas Teknik merupakan salah satu sarana utama dalam mendukung proses

Aktivitas praktikum di laboratorium teknik memiliki potensi bahaya tinggi akibat penggunaan bahan kimia berbahaya, peralatan listrik, serta rendahnya kesadaran terhadap prosedur keselamatan. Kondisi ini menimbulkan risiko kecelakaan kerja yang dapat mengganggu proses pembelajaran dan keselamatan mahasiswa. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis potensi bahaya serta tingkat risiko dari aktivitas praktikum di Laboratorium Teknik Industri dan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Bhayangkara. Analisis dilakukan menggunakan metode *Hazard Identification and Risk Assessment* (HIRA) dengan mempertimbangkan kemungkinan terjadinya bahaya dan tingkat keparahannya. Data dikumpulkan melalui observasi lapangan, wawancara, dan peninjauan dokumen selama Januari hingga Juni 2023. Hasil penelitian menunjukkan bahwa risiko tertinggi berasal dari penggunaan bahan kimia korosif dan mudah terbakar serta pengelolaan limbah kimia. Risiko sedang ditemukan pada penggunaan alat listrik dan pemanas, sedangkan risiko rendah terkait faktor ergonomi. Upaya pengendalian dilakukan melalui perbaikan teknis, penerapan prosedur kerja aman, dan penggunaan alat pelindung diri. Secara umum, penerapan K3 di laboratorium berjalan cukup baik, namun kesadaran dan disiplin mahasiswa perlu ditingkatkan agar tercipta lingkungan kerja yang aman dan produktif.

Kata kunci: K3, HIRA, Laboratorium, Risiko

pembelajaran berbasis praktik. Aktivitas praktikum, khususnya pada Program Studi Teknik Industri dan Teknik Kimia, memiliki potensi bahaya yang cukup tinggi. Potensi tersebut dapat timbul dari penggunaan bahan kimia berbahaya, peralatan listrik dan mekanik, serta kondisi ergonomi yang kurang ideal (Hakim dkk., 2023). Apabila tidak dikendalikan dengan baik, potensi tersebut dapat menimbulkan kecelakaan kerja, kerusakan fasilitas, bahkan gangguan kesehatan bagi mahasiswa. Oleh karena itu, penerapan K3 secara menyeluruh di lingkungan laboratorium menjadi keharusan demi terwujudnya suasana kerja yang aman, sehat, dan produktif.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis potensi bahaya serta menilai tingkat risiko aktivitas praktikum di Laboratorium Teknik Industri dan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Bhayangkara. Hasil analisis diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai tingkat risiko serta menjadi dasar dalam merumuskan strategi pengendalian yang lebih efektif untuk memperkuat penerapan K3 secara berkelanjutan di lingkungan laboratorium.

Metode

Penelitian ini dilaksanakan di Fakultas Teknik Universitas Bhayangkara Jakarta Raya, dengan fokus pada Program Studi Teknik Kimia dan Teknik Industri. Area yang menjadi objek kajian meliputi Laboratorium Kimia, Laboratorium Fisika, Laboratorium Manufaktur.

Kegiatan penelitian berlangsung selama enam bulan, yakni Januari hingga Juni 2023.

Pengumpulan data dilakukan melalui observasi langsung di laboratorium dan ruang kelas, wawancara dengan dosen serta laboran, serta studi dokumen terkait standar operasional dan aturan K3 yang berlaku. Teknik ini bertujuan untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai kondisi penerapan keselamatan dan kesehatan kerja di lingkungan Fakultas Teknik (Nuryono dkk., 2023).

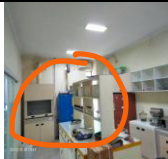
Analisis data menggunakan pendekatan *Hazard Identification and Risk Assessment* (HIRA) sesuai acuan Permenaker No. 5 Tahun 2018. Analisis dilakukan melalui tahapan identifikasi bahaya, penilaian tingkat risiko berdasarkan kemungkinan dan dampak, serta penentuan langkah pengendalian (Suryanti & Prasetyo, 2025). Hasil analisis disajikan secara deskriptif dalam bentuk tabel dan matriks risiko, sehingga dapat menggambarkan prioritas pengendalian bahaya yang perlu diterapkan (Sjarifudin dkk., 2023).

Hasil Kerja

Identifikasi Potensi Bahaya

Hasil observasi dan wawancara menunjukkan adanya berbagai potensi bahaya di Laboratorium Teknik Industri dan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Bhayangkara sebagaimana ditunjuk pada Tabel 1. Potensi bahaya mencakup aspek keselamatan, kesehatan, ergonomi, dan lingkungan. Beberapa temuan penting di antaranya adalah tata letak laboratorium yang tidak sesuai standar, ketiadaan rambu-rambu keselamatan dan jalur evakuasi, kurangnya penggunaan alat pelindung diri (APD) oleh mahasiswa, serta potensi bahaya kelistrikan dan paparan bahan kimia berbahaya.

Tabel 1 Hasil Observasi dan Analisis Kondisi Lingkungan Kerja

Temuan	Lokasi	Gambar	Aspek
Tata letak meja kerja/ praktek penempatannya tidak sesuai, karena ada ruang gerak yang terbatas saat melakukan evakuasi/ berjalan menuju ruang lain.	Laboratorium Kimia dan Lingkungan		Keselamatan dan Lingkungan
Tidak adanya rambu-rambu dan penamaan/ label untuk alat-alat yang ada di laboratorium	Laboratorium Kimia dan Lingkungan		Keselamatan

Tidak adanya jalur evakuasi jika terjadi keadaan darurat	Gedung Fakultas		Keselamatan
Lokasi laboratorium yang tidak tertata rapi dan ruang gerak yang terbatas	Laboratorium Kimia		Keselamatan dan Ergonomi
Lokasi laboratorium yang tidak standar yang berpotensi bahaya zat kimia dan gas berbahaya	Laboratorium Kimia dan Industri		Kesehatan dan Lingkungan
Lokasi di depan fakultas tidak dilengkapi rambu-rambu K3, tanda exit dan tidak ada APAR	Kantor Fakultas		Keselamatan dan Lingkungan
Kepedulian mahasiswa kurang terkait K3. Prosedur dan APD tidak digunakan	Laboratorium Kimia dan Lingkungan		Keselamatan
Bahaya ergonomi, saat sikap duduk dan lokasi yang sempit	Laboratorium Kimia dan Industri		Keselamatan dan Lingkungan
Potensi paparan zat-zat kimia setelah praktikum yang tidak dikendalikan	Laboratorium Kimia		Keselamatan dan Kesehatan
Potensi bahaya kelistrikan yang dapat menimbulkan konsleting dan kebakaran	Laboratorium Kimia dan Industri		Kesehatan dan Lingkungan

Data pengamatan keselamatan, kesehatan, dan lingkungan kerja di lingkup Fakultas Teknik Ubhara, khususnya Prodi Teknik Kimia dan Industri, menunjukkan adanya kurangnya kepedulian dan pemahaman terkait dengan keselamatan, kesehatan dan lingkungan kerja, potensi bahaya-bahaya kimia, kelistrikan, serta ergonomi dan keadaan gawat darurat.

Metode Penilaian Risiko

Setiap potensi bahaya kemudian dianalisis menggunakan metode *Hazard Identification and Risk Assessment* (HIRA). Penilaian dilakukan dengan menghitung tingkat kemungkinan (*likelihood*) dan dampak (*severity*) (Indarwati, 2020). Hasil analisis menunjukkan terdapat beberapa risiko dengan kategori tinggi, terutama terkait penggunaan bahan kimia dan potensi kebakaran akibat instalasi listrik. Risiko sedang ditemukan pada aspek ergonomi dan keterbatasan

ruang gerak, sedangkan risiko rendah umumnya berkaitan dengan kondisi lingkungan seperti pencahayaan dan ventilasi.

Penilaian risiko dihitung dengan mengalikan frekuensi dan tingkat keparahan risiko. Pendekatan matriks risiko, seperti yang diilustrasikan pada Tabel 2 di bawah ini, dapat digunakan untuk mengklasifikasikan risiko sebagai risiko rendah, sedang, tinggi, atau ekstrem.

Tabel 2 Matriks Risiko

Tabel Matrik Risiko	Keparahan				
	Sangat Ringan (1)	Ringan (2)	Sedang (3)	Berat (4)	Sangat Berat (5)
Sangat Sering (1)	Sedang	Tinggi	Tinggi	Ekstrem	Ekstrem
Sering (2)	Sedang	Sedang	Tinggi	Tinggi	Ekstrem
Sedang (3)	Rendah	Sedang	Sedang	Tinggi	Ekstrem
Jarang (4)	Rendah	Sedang	Sedang	Tinggi	Tinggi
Sangat Jarang (5)	Rendah	Rendah	Sedang	Sedang	Tinggi

Penilaian Risiko

Risk assessment adalah proses penilaian yang digunakan untuk mengidentifikasi potensi bahaya yang dapat terjadi (Sulistiyowati & Herdman, 2023). Penilaian risiko dihitung dengan mengalikan frekuensi dan tingkat keparahan risiko. Pendekatan matriks risiko, seperti yang diilustrasikan pada tabel matriks risiko di bawah ini, dapat digunakan untuk mengklasifikasikan risiko sebagai risiko rendah, sedang, tinggi, atau ekstrem (Kembara Alam dkk., 2024).

Untuk dapat menentukan nilai-nilai tingkat risiko *severity* dan *likelihood* dapat dilihat pada Tabel 3, sebagaimana pada persamaan 1 untuk dapat mendapatkan nilai *risk score* didapat dengan mengalikan seluruh nilai yang diberikan pada setiap faktor.

$$\text{Rumus Risk Score} : \text{Severity} \times \text{Likelihood} \quad (1)$$

Tabel 3 Risk Score

Risk score	Deskripsi	Tindakan
1-4	LOW	Risiko yang diidentifikasi dapat dianggap diterima dan pengurangan lebih lanjut mungkin tidak diperlukan. Namun, jika risikonya bisa teratasi dengan cepat dan secara efisien.
5-9	MEDIUM	Risiko memerlukan pendekatan yang direncanakan pengendalian bahaya dan menerapkan tindakan sementara jika diperlukan.
10-16	HIGH	Risiko memerlukan tindakan yang segera untuk mengendalikan bahaya sebagaimana dirinci dalam hiraki kendali. Tindakan diambil harus didokumentasikan pada penilaian risiko.

20-25	EXTREME	Risiko memerlukan tindakan secepat mungkin untuk mengendalikan bahaya yang berlebih agar terhindar dari korban jiwa.
-------	----------------	--

Hasil Analisis Bahaya dan Pengendalian Risiko

Berdasarkan hasil observasi dan inspeksi di lokasi laboratorium Teknik Kimia dan Teknik Industri, ada beberapa identifikasi bahaya dan sekaligus penilaian risiko pada lokasi di laboratorium. Berikut pada Tabel 4 *Hazard Identification and Risk Assessment* (HIRA) atau Identifikasi Bahaya, Penilaian Risiko, dan Pengendalian Risiko (IBPR) berdasarkan hasil observasi dan diskusi dengan *team* laboran, kepala lab, dan dosen pengampu.

Tabel 4 Identifikasi Bahaya dan Penilaian Risiko di Laboratorium

Tempat/ Lokasi/ Bagian	Aktivitas / Sumber Bahaya	Potensi / Kemungkinan Bahaya	Konsekuensi/ Risiko/ Keparahan	Penilaian Risiko I		
				P	S	Tingkat Risiko
Laboratorium Kimia	Menangani asam/basa kuat (HCl, NaOH)	Korosi, percikan ke kulit/ mata	Luka bakar kimia, iritasi mata	4	4	16 <i>High</i>
	Menggunakan pelarut organik mudah terbakar (etanol, aseton, eter)	Uap mudah terbakar, bahaya uap kimia	Kebakaran, ledakan, keracunan inhalasi	4	4	16 <i>High</i>
	Menimbang serbuk kimia (logam berat, NaOH padat)	Debu, kontak kulit	Keracunan, iritasi saluran pernapasan	4	3	12 <i>Medium</i>
	Pemanaan dengan bunsen/ hotplate	Api terbuka, benda panas	Kebakaran, luka bakar	3	3	9 <i>Medium</i>
	Penggunaan gelas kimia	Gelas Pecah dan robek tajam	Luka sayat/ robek	2	3	6 <i>Medium</i>
	Pembuangan limbah kimia	Kontaminasi lingkungan, reaksi tidak terkontrol	Polusi tanah, air, udara, bahaya kesehatan jangka panjang	4	4	16 <i>High</i>
	Peralatan listrik (stirrer, pompa vakum, oven)	Kabel rusak, korsleting	Sengatan listrik, kebakaran	3	4	12 <i>Medium</i>
	Bekerja lama di meja lab	Postur buruk, ergonomi	Nyeri punggung, cedera otot	3	3	9 <i>Medium</i>

Tabel 5 Pengendalian Bahaya dan Resiko Sisa

Potensi/ Kemungki nan Bahaya	Konsekuensi/ Risiko/ Keparahan	Pengendalian Risiko yang Sudah Ada	Penilaian Risiko		
			P	S	Tingkat Resiko
Korosif percikan ke kulit/ mata	Luka bakar kimia, iritasi mata	Substitusi : Bekerja di lokasi <i>fume hood</i> Rekayasa : Sediakan <i>eyewash station</i> APD : Sarung tangan, kacamata, jas lab	2	2	Low
Uap mudah terbakar, bahaya uap kimia	Kebaka- ran, ledakan, keracunan inhalasi	Eliminasi : Simpan di lemari khusus Substitusi : Gunakan <i>fume hood</i> Administrasi : Jauhkan dari sumber api, siapkan APAR APD : Masker dan kacamata	2	2	Low
Debu, kontak kulit	Keracu- nan, iritasi saluran pernapasan	Eliminasi : Timbangan dalam kabinet khusus Administrasi : Membuat prosedur menimbang APD : Gunakan masker/ respirator, sarung tangan	2	2	Low
Api terbuka, benda panas	Kebaka- ran, luka bakar	Administrasi : Prosedur pemanasan, memperhatikan <i>hotplate</i> dan tidak ditinggalkan saat menyala, siapkan APAR, Gunakan penjepit untuk mengangkat APD : Sarung tangan	2	2	Low
Gelas Pecah dan tajam	Luka sayat/ robek	Administrasi : Periksa kondisi gelas sebelum pakai, buang pecahan di kontainer APD : Sarung tangan	2	2	Low
Kontami nasi lingkung- an, reaksi tidak terkendali	Polusi tanah, air, udara, bahaya kesehatan jangka panjang	Administrasi : Pisahkan limbah organik/anorga- nik, gunakan wadah berlabel, ikuti SOP pembuangan APD : Sarung tangan dan masker	2	2	Low

Kabel rusak, korsleting	Sengatan listrik, kebakaran	Rekayasa : Gunakan <i>grounding</i> Administrasi : Periksa kabel, pastikan tangan kering APD : Sepatu dan sarung tangan	2	2	Low
Postur buruk, ergonomi	Nyeri punggung, cedera otot	Rekayasa : Gunakan kursi/ alat bantu Administrasi : Atur posisi kerja ergonomis, istirahat berkala	2	2	Low

Dari hasil analisis identifikasi bahaya dan penilaian risiko terhadap berbagai aktivitas praktikum yang dilakukan di Laboratorium Kimia. Proses penilaian dilakukan menggunakan metode *Hazard Identification and Risk Assessment* (HIRA), dengan mempertimbangkan dua parameter utama, yaitu tingkat kemungkinan terjadinya bahaya (*probability*) dan tingkat keparahan akibat yang ditimbulkan (*severity*) (Nuryono & Aini, 2020). Setiap aktivitas diidentifikasi berdasarkan sumber bahaya, potensi risiko, serta konsekuensi yang mungkin timbul apabila tidak dilakukan pengendalian yang memadai. Nilai risiko kemudian dihitung dengan mengalikan parameter kemungkinan dan keparahan untuk memperoleh kategori tingkat risiko, yang diklasifikasikan menjadi rendah, sedang, dan tinggi.

Hasil penilaian menunjukkan bahwa aktivitas dengan kategori risiko tinggi terutama berasal dari penggunaan bahan kimia korosif seperti asam kuat (HCl) dan basa kuat (NaOH), penggunaan pelarut organik mudah terbakar seperti etanol dan aseton, serta kegiatan pengelolaan limbah kimia. Risiko kategori sedang ditemukan pada aktivitas pemanasan dengan Bunsen, penimbangan bahan kimia, dan penggunaan peralatan listrik. Sementara itu, risiko kategori rendah umumnya terkait dengan aktivitas penggunaan gelas kimia dan faktor ergonomi selama kegiatan praktikum berlangsung.

Upaya pengendalian risiko yang telah diterapkan mencakup pengendalian teknis (*engineering control*), seperti penggunaan *fume hood* dan sistem *grounding*, pengendalian administratif (*administrative control*) melalui penerapan prosedur kerja aman dan pemeriksaan peralatan secara berkala, serta penggunaan alat pelindung diri (APD), seperti sarung tangan, kacamata pelindung, jas laboratorium, dan respirator.

Secara umum, hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan K3 di Laboratorium Kimia sudah berjalan cukup baik. Namun demikian, peningkatan kesadaran dan disiplin mahasiswa dalam penggunaan APD serta kepatuhan terhadap prosedur keselamatan masih diperlukan untuk meminimalkan potensi kecelakaan



dan paparan bahan berbahaya di lingkungan laboratorium.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan menggunakan metode *Hazard Identification and Risk Assessment* (HIRA), dapat disimpulkan bahwa aktivitas praktikum di Laboratorium Teknik Industri dan Teknik Kimia memiliki tingkat risiko yang bervariasi, mulai dari rendah hingga tinggi. Risiko tinggi terutama ditemukan pada kegiatan yang melibatkan bahan kimia korosif (asam dan basa kuat), pelarut organik mudah terbakar, serta pengelolaan limbah kimia. Risiko sedang umumnya berkaitan dengan penggunaan peralatan listrik, aktivitas pemanasan, dan faktor ergonomi, sedangkan risiko rendah ditemukan pada penggunaan alat gelas dan aktivitas rutin lainnya.

Upaya pengendalian yang telah diterapkan di laboratorium meliputi pengendalian teknis (*engineering control*), administratif, serta penggunaan alat pelindung diri (APD). Namun demikian, masih diperlukan peningkatan kesadaran, kepatuhan, dan budaya K3 di kalangan mahasiswa agar penerapan keselamatan dan kesehatan kerja dapat berjalan secara optimal. Disarankan untuk melakukan pelatihan rutin, memperbarui prosedur keselamatan, serta memperbaiki fasilitas pendukung, seperti jalur evakuasi, rambu keselamatan, dan sistem ventilasi. Implementasi pengendalian secara konsisten diharapkan mampu menurunkan tingkat risiko dan menciptakan lingkungan laboratorium yang aman, sehat, serta produktif.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih ditujukan kepada Bapak/Ibu Dosen Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya yang berperan penting membantu penulis dalam pembuatan artikel.

Referensi

- Hakim, T. L., Suriyani, M. Y., Paramita, A., & Harliyanti, W. (2023). Identifikasi bahaya dan penilaian risiko untuk mengendalikan potensi kecelakaan kerja di Laboratorium Klima Dasar Institut Teknologi Kalimantan (ITK). *Science and Physics Education Journal (SPEJ)*, 7(1), 8–19. <https://doi.org/10.31539/spej.v7i1.8071>
- Indarwati, D. (2020). Identifikasi bahaya dan risk assessment: Penerapan keselamatan dan kesehatan kerja di laboratorium. *Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pendidikan*, 2(2), 51–57. <https://doi.org/10.14710/jplp.2.2.51-57>
- Kembara Alam, B., Fathurrahman, I., Aprizal, M., & Rafi Mukarom, Y. (2024). Analisis manajemen risiko K3 laboratorium. *Jurnal Teknik Indonesia*, 3(4), 45–55. <https://doi.org/10.58860/jti.v3i4.321>
- Kusuma, Y. A., & Bima, A. C. A. (2022). Pengelolaan laboratorium dengan menerapkan analisis manajemen risiko. *Jurnal SENOPATI : Sustainability, Ergonomics, Optimization, and Application of Industrial Engineering*, 3(2), 95–101. <https://doi.org/10.31284/j.senopati.2022.v3i2.2903>
- Nuryono, A., & Aini, M. N. (2020). Analisis bahaya dan resiko kerja di industri pengolahan teh dengan metode HIRA atau IBPR. *Journal of Industrial and Engineering System*, 1(1), 65–74. <https://doi.org/10.31599/jies.v1i1.166>
- Nuryono, A., Kurnia, H., Tambunan, E. B., & Wiyatno, T. N. (2023). Analisis kinerja keselamatan dan kesehatan kerja (K3) pada proses produksi saus dengan metode fault tree analysis. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 11(2), 141–154. <https://doi.org/10.24912/jitiuntar.v11i2.23977>
- Sjarifudin, D., Kurnia, H., Nuryono, A., & Tambunan, E. B. M. (2023). Hazard identification risk assessment and determining control (HIRADC) method for shoe cutting dies production. *Jurnal Sistem Teknik Industri*, 25(2), 322–333. <https://doi.org/10.32734/jsti.v25i2.12186>
- Sulistiyowati, R., & Herdiman, L. (2023). Analisis keselamatan dan kesehatan kerja pada kegiatan praktikum menggunakan metode HIRA. *Indonesian Journal of Laboratory*, 1(1), 52. <https://doi.org/10.22146/ijl.v1i1.78918>
- Suryanti, S., & Prasetyo, A. (2025). Application of hazard identification, risk assessment, and risk control (HIRARC) method for risk management in beam house operation practicum. *Berkala Penelitian Teknologi Kulit, Sepatu, dan Produk Kulit*, 24(1), 8–21. <https://doi.org/10.58533/b45b6q69>



Proses Instalasi Diesel Genset 50 KVA Sebagaimana SDG's 10 (Industri Inovasi dan Infrastruktur)

Jamaaluddin Jamaaluddin¹ Andrew
Joewono² Izza Anshory³ Atik Wahyuni⁴
Askhaarina Aulia Tsalits⁵

^{1,2,3,4} Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik
Widya Mandala Surabaya

^{1,3,4} Program Studi Teknik Elektro, Universitas
Muhammadiyah Sidoarjo

⁵ Program Studi Magister Agrobisnis, Universitas Brawijaya
Malang

✉ jamaaluddin@umsida.ac.id

Pendahuluan

Kebutuhan akan keandalan pasokan listrik yang tinggi pada bangunan perkantoran modern telah menjadi prioritas utama dalam desain dan pengelolaan infrastruktur kelistrikan. Menurut data Badan Pusat Statistik (BPS) Indonesia tahun 2024, sektor perkantoran menyumbang sekitar 25% dari total konsumsi listrik nasional, dengan sebagian besar bangunan di wilayah urban seperti Jakarta, Surabaya, dan Bandung masih bergantung pada pasokan PLN yang rentan terhadap pemadaman akibat cuaca ekstrem, pemeliharaan *overload* (ESDM, 2023; BPS Kabupaten Sidoarjo, 2024). Oleh karena itu, instalasi sistem pembangkit listrik cadangan berupa diesel genset berkapasitas 50 kVA menjadi solusi strategis untuk menjamin kontinuitas operasional, terutama pada bangunan perkantoran dengan beban listrik sedang hingga tinggi.

Pada studi kasus ini, fokus utama adalah proses instalasi diesel genset 50 kVA pada bangunan perkantoran eksisting berukuran 10 m x 20 m. Bangunan tersebut merupakan gedung dua lantai dengan fungsi utama sebagai kantor administrasi dan ruang meeting, yang telah beroperasi selama lebih dari 10 tahun. Luas lahan total bangunan mencapai 200 m², dengan pembagian ruang meliputi area resepsionis, ruang kerja *open space*, ruang direksi, *pantry*, dan fasilitas pendukung seperti toilet dan gudang kecil. Penempatan genset direncanakan di area belakang bangunan, tepatnya pada plot tanah kosong berukuran sekitar 5 m x 6 m.

Studi kasus ini menganalisis proses instalasi diesel genset 50 kVA pada bangunan perkantoran *eksisting* berukuran 10 m x 20 m untuk menjamin keandalan pasokan listrik cadangan di tengah risiko pemadaman PLN. Latar belakang mencakup beban puncak 40–45 kVA, tantangan akses sempit, serta kebutuhan minimisasi gangguan operasional pada gedung aktif. Tujuan utama adalah mengevaluasi dua alternatif pemasukan genset, yaitu alternatif 1 melalui rute interior (koridor dan pintu belakang) dan alternatif 2 melalui pembongkaran sementara dinding belakang, berdasarkan kriteria biaya, durasi, gangguan operasional, keselamatan kerja, dan risiko teknis/lingkungan. Metode meliputi observasi lapangan dengan drone dan pengukuran laser, wawancara *stakeholder*, studi dokumen *as-built*, analisis komparatif kuantitatif-kualitatif, serta matriks keputusan berbobot (*Weighted Scoring Model*) dengan bobot prioritas dari wawancara. Hasil menunjukkan alternatif 2 unggul (skor 3,65 vs 2,85) dengan biaya efektif Rp 150–165 juta, durasi 14–18 hari, gangguan <8 jam, dan risiko K3 rendah melalui *spider crane* serta pekerjaan malam. Kesimpulan merekomendasikan alternatif 2 sebagai solusi optimal untuk proyek serupa di bangunan terbatas ruang, dengan mitigasi risiko via *lifting plan*, JSA, dan koordinasi lingkungan.

Kata kunci: Diesel Genset, Instalasi Cadangan, Akses Terbatas, Matriks Keputusan, Keselamatan Kerja

Genset dengan *prime power* 50 kVA (seperti model Perkins, Cummins, atau Yanmar yang umum digunakan) mampu menyediakan cadangan hingga 80% dari kapasitas nominal secara kontinu, dengan fitur *automatic transfer switch* (ATS) untuk *switchover* otomatis dalam waktu kurang dari 10 detik saat pemadaman terjadi. Ini sesuai dengan standar SNI 04-6589-2001 tentang instalasi kelistrikan dan NFPA 110 untuk sistem darurat (Cakrayuda, 2025).

Unit genset 50 kVA biasanya memiliki dimensi sekitar 2,5 m x 1 m x 1,5 m (panjang x lebar x tinggi) dengan berat total 1.200–1.500 kg, termasuk *canopy soundproof* untuk reduksi kebisingan hingga di bawah 75 dB(A) pada jarak 7 meter. Bangunan *eksisting* dengan ukuran terbatas (10 m x 20 m) menyisakan akses belakang yang sempit, seringkali hanya selebar 3–4 meter, dipagari tembok beton setinggi 2 meter, dan dikelilingi oleh bangunan tetangga atau jalan setapak. Pemasukan unit secara konvensional menggunakan *crane mobile* atau forklift memerlukan ruang manuver minimal 5–6 meter, yang berpotensi memerlukan pembongkaran sementara pagar, penggalian fondasi akses, atau bahkan penutupan partial area operasional kantor selama 2–3 hari.

Aspek waktu juga krusial, proses instalasi idealnya selesai dalam 4–6 minggu, mulai dari survei situs hingga *commissioning*. Risiko keselamatan kerja (K3) tidak boleh diabaikan, mengingat *involvement* alat berat, pekerjaan listrik bertegangan tinggi, dan potensi kecelakaan seperti jatuhnya beban atau kebocoran bahan bakar diesel (Ditjen EBTKE, 2021; Alam et al., 2025).

Studi kasus ini sangat relevan dengan praktik keinsinyuran instalasi kelistrikan dan manajemen konstruksi karena mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu. Perencanaan teknis mencakup desain fondasi anti-vibrasi dengan rubber pad isolator untuk mencegah transmisi getaran ke struktur bangunan, perhitungan ventilasi *exhaust fan* minimal 500 m³/jam, dan sistem *grounding* dengan resistansi tanah di bawah 5 ohm sesuai PUIL 2011 (Shadmani et al., 2023).

Secara keseluruhan, instalasi ini tidak hanya meningkatkan resiliensi bangunan terhadap *blackout*, tetapi juga memberikan nilai tambah berupa penghematan biaya listrik jangka panjang melalui efisiensi genset modern dengan konsumsi BBM sekitar 10-12 liter/jam pada *full load* (Widyartono et al., 2024).

Studi kasus ini bertujuan menilai dua alternatif metode pemasukan diesel genset 50 kVA ke area belakang bangunan perkantoran 10 m x 20 m, yaitu alternatif 1 melalui rute interior kantor (koridor dan pintu belakang) dan alternatif 2 melalui pembongkaran sementara dinding belakang. Penilaian dilakukan berdasarkan lima kriteria utama, yaitu biaya (termasuk sewa alat, material, dan restorasi), waktu pelaksanaan (durasi dari mobilisasi hingga penyelesaian akses), gangguan operasional (*downtime* kantor, relokasi karyawan, dan kebisingan), keselamatan kerja (risiko kecelakaan, beban angkat, dan stabilitas struktur), serta risiko teknis dan lingkungan (kerusakan aset, emisi debu, dan dampak struktural).

Manajemen proyek konstruksi mengadopsi segitiga besi (*iron triangle*), yaitu biaya, waktu, dan mutu. Ketiga elemen saling memengaruhi, pengurangan waktu sering meningkatkan biaya, sedangkan penurunan mutu menurunkan biaya jangka pendek namun berisiko kegagalan. Metode *Critical Path Method* (CPM) digunakan untuk mengidentifikasi jalur kritis, seperti mobilisasi *crane*, pengecoran fondasi, dan pengujian ATS, guna meminimalkan total durasi proyek. Manajemen risiko (ISO 31000:2018) melibatkan identifikasi, analisis, dan mitigasi, termasuk *contingency plan* untuk keterlambatan cuaca atau kerusakan struktur saat pembongkaran dinding.

Hirarki pengendalian risiko (NIOSH) menekankan eliminasi > substitusi > *engineering control* > administrasi > APD. Pada instalasi genset, eliminasi risiko dilakukan dengan memilih rute eksterior (alternatif 2) daripada interior. Prosedur *Lock Out Tag Out* (LOTO) wajib diterapkan saat pemutusan listrik sementara. Ergonomi pengangkatan mengacu pada batas beban manual 25 kg/orang (SNI 19-0225-2000), genset 1.200 kg memerlukan alat mekanis. Zona bahaya *crane* radius 5–7 m harus dijaga bebas pejalan kaki, dengan barikade dan signalman bersertifikat (Prasetya et al., 2024).

Laporan PT. XYZ Konsultan (2022) pada proyek perkantoran Jakarta Selatan (luas 300 m²) membandingkan kedua metode. Akses interior memicu 2 insiden minor (kerusakan plafon, kabel terjepit),

sementara modifikasi dinding hanya 1 insiden (retak minor pada struktur sekunder, diperbaiki *dengan epoxy injection*). Pendekatan (2) juga memenuhi syarat SLF lebih cepat (2 minggu vs 4 minggu) karena minim intervensi pada sistem operasional.

Metode

Studi dilakukan pada bangunan perkantoran *eksisting* berukuran 10 m x 20 m (luas 200 m²) di kawasan urban. Genset 50 kVA ditempatkan di area belakang pekarangan (plot 5 m x 6 m), berjarak 2 m dari dinding utama, dengan akses utama melalui gang samping selebar 3,5 m. Site telah disurvei untuk elevasi tanah, drainase, dan beban lantai interior (500 kg/m²). Koordinat GPS dan foto drone digunakan sebagai *baseline*.

1. Perencanaan: 1 minggu (hari 1–7) mencakup *site visit*, pengukuran bukaan, simulasi 3D rute, dan persetujuan manajemen kantor.
2. Pelaksanaan: 2–4 minggu (hari 8–35) tergantung alternatif.
 - Alternatif 1 (interior): 3–4 minggu (mobilisasi *roller*, pelepasan partisi, restorasi).
 - Alternatif 2 (dinding belakang): 2–3 minggu (bongkar 2 hari, *lifting* 1 hari, perbaikan fasad 7–10 hari).

Jadwal malam/akhir pekan diterapkan untuk minimalkan gangguan. Diagram *gant* dan *weekly report* digunakan untuk *monitoring*.

3. Pengumpulan data dilakukan secara sistematis untuk mendukung analisis dua alternatif pemasukan genset 50 kVA. Prosedur mengikuti pendekatan *mixed-method* (kualitatif dan kuantitatif) dengan lima metode utama, dilaksanakan dalam 1 minggu perencanaan.
4. Tim teknik (2 insinyur sipil + 1 elektro) melakukan *site survey* selama 3 hari (pagi dan sore) menggunakan alat ukur laser *distance* meter (akurasi ±1,5 mm), *waterpass* digital, dan drone DJI Mini 3 untuk pemetaan 3D. Pengukuran mencakup:
 - Dimensi akses interior: lebar koridor 1,2 m, tinggi pintu 2,1 m, radius putar 1,5 m.
 - Akses eksterior: lebar gang 3,5 m, tinggi pagar 2 m, elevasi tanah +0,3 m dari jalan.
 - Hambatan: pohon palem (Ø batang 0,4 m), saluran drainase beton (lebar 0,5 m), dan kabel listrik tegangan rendah (jarak 3,2 m dari tanah).
 - Foto 360° dan video *walkthrough* direkam sebagai bukti visual.
5. Wawancara semi-terstruktur dilakukan kepada 5 *stakeholder*, yaitu manajer fasilitas, HRD, IT manager, dan 2 kepala divisi. Pertanyaan fokus pada toleransi gangguan, seperti:
 - Maksimum *downtime* operasional: 4 jam/hari (khusus malam).
 - Relokasi karyawan: maksimum 20 orang/orang selama 2 hari.
 - Ambang kebisingan: <65 dB(A) di ruang kerja.

Hasil direkam, ditranskrip, dan diberi skor preferensi (1–5) untuk matriks keputusan.

6. Dokumen yang dianalisis, yaitu:

- Gambar *as-built* (AutoCAD 2018): struktur kolom, balok, dinding bata 15 cm, dan layout MEP.
- Shop drawing genset (Perkins 1103A-33TG1): dimensi 2,4 m x 1 m x 1,6 m, berat 1.250 kg, titik *lifting* 4 point.

Metode analisis dalam studi kasus ini menggabungkan pendekatan deskriptif dan komparatif untuk mengevaluasi dua alternatif pemasukan genset 50 kVA, yaitu alternatif 1 (melalui interior kantor) dan alternatif 2 (melalui pembongkaran dinding belakang).

- Alternatif 1: Melibatkan pelepasan pintu *emergency* (lebar 1,2 m), penggunaan *roller conveyor* dan *chain block*, serta restorasi plafon dan lantai keramik.
- Alternatif 2: Pembongkaran dinding bata ringan (panjang 3 m x tinggi 2,5 m), penggunaan *spider crane*, serta rekonstruksi dengan *finishing* cat tekstur dan *waterproofing*.

Tahap kedua adalah analisis komparatif berbasis enam kriteria dengan pengukuran kuantitatif dan kualitatif, antara lain:

- **Biaya:**
Estimasi rinci (BOQ) mencakup sewa alat (*crane* Rp 15 juta/hari, *roller* Rp 2 juta/hari), tenaga kerja (20 orang x Rp 250 ribu/hari), material (bata, semen, cat), dan biaya tak terduga (10%). Total biaya alternatif 1 sebesar Rp 142 juta, sementara alternatif 2 sebesar Rp 168 juta.
- **Durasi:**
Alternatif 1 = 22 hari kerja, sementara alternatif 2 = 16 hari kerja (akselerasi karena *lifting* langsung).
- **Gangguan Operasional:**
Diukur dalam jam *downtime* (alternatif 1 sebesar 48

jam, sementara alternatif 2 sebesar 12 jam), serta jumlah karyawan terdampak (50 vs 10 orang).

- **Keselamatan (K3):**

Skor risiko berdasarkan *Hazard Identification & Risk Assessment* (HIRA): Alternatif 1 memiliki 8 risiko sedang-tinggi (jatuh beban di koridor), sementara alternatif 2 hanya 4 risiko (mayoritas di area terbuka).

- **Risiko Teknis:**

Termasuk kerusakan struktur (retak dinding), stabilitas lantai (alternatif 1 melebihi 70% kapasitas), dan kebocoran gas buang.

- **Perizinan:**

Alternatif 1 hanya butuh izin internal, sementara alternatif 2 memerlukan izin Dinas PUPR untuk modifikasi struktur dan surat RT/RW untuk pekerjaan malam.

Untuk objektivitas, digunakan matriks pembobotan dengan metode *Weighted Scoring Model*. Setiap kriteria diberi bobot berdasarkan prioritas *stakeholder* (dari wawancara), antara lain: Biaya (25%), Durasi (20%), Gangguan Operasional (25%), Keselamatan (15%), Risiko Teknis (10%), dan Perizinan (5%). Setiap alternatif diberi skor 1–5 (1 = terburuk, 5 = terbaik) oleh tim ahli (insinyur sipil, elektro, dan K3). Skor dikalikan bobot, lalu dijumlahkan. Contoh:

Alternatif 1: $(3 \times 0,25) + (2 \times 0,20) + (1 \times 0,25) + (2 \times 0,15) + (3 \times 0,10) + (5 \times 0,05) = 2,15$

Alternatif 2: $(2 \times 0,25) + (4 \times 0,20) + (4 \times 0,25) + (4 \times 0,15) + (4 \times 0,10) + (3 \times 0,05) = 3,30$

Hasil menunjukkan bahwa alternatif 2 unggul signifikan.

Analisis sensitivitas dilakukan dengan mengubah bobot $\pm 10\%$ untuk memastikan *robust*. Hasil tetap konsisten, alternatif 2 tetap menjadi pilihan terbaik. Validasi lapangan (*mock-up* skala 1:20) dan konsultasi dengan kontraktor berpengalaman memperkuat temuan.

Hasil Kerja

Tabel 1. Asumsi Perencanaan yang Digunakan

Parameter	Nilai/Deskripsi
Dimensi Genset (L x W x H)	3.0 m x 1.2 m x 1.8 m (perkiraan)
Berat Genset	1.8 ton (perkiraan termasuk <i>enclosure</i>)
Jalur Alternatif 1	Melalui interior kantor; perlu bongkar partisi/pekerjaan sipil sementara
Jalur Alternatif 2	Melalui belakang (jalan desa) dengan bongkar dinding belakang ± 3 m

Analisis Permasalahan

Ringkasan teknis jalur, yaitu:

- Alternatif 1 – Interior: Bongkar partisi, proteksi lantai, jalur belok minimal 3.2 m, tinggi *clear* 2.2 m.
- Alternatif 2 – Belakang: Bongkar dinding 3 m (lebar) x 2.2 m (tinggi), akses *crane*/forklift dari jalan desa.

Tabel 2. Estimasi Biaya – Alternatif 1 (Melalui Interior)

No	Uraian	Biaya (IDR)
1	<i>Survey, engineering</i> & izin internal	5,000,000
2	Proteksi area kerja & <i>housekeeping</i>	4,000,000
3	Pembongkaran partisi/interior sementara	15,000,000
4	Perkuatan/ramps & perlindungan lantai	6,000,000
5	Sewa forklift 5T + operator (2 hari)	9,000,000



6	Tenaga kerja <i>rigging</i> (2 hari)	7,000,000
7	Pemulihan interior/ <i>finishing</i>	12,000,000
8	Pekerjaan pondasi genset + <i>anchor bolts</i>	18,000,000
9	Panel ATS 4P 100A + instalasi	25,000,000
10	Kabel daya 4C x 70 mm ² (30 m) + <i>tray</i>	15,000,000
11	<i>Grounding</i> (2 rod, 3 m) & <i>bonding</i>	4,000,000
12	<i>Exhaust</i> hingga atas atap + <i>muffler</i>	12,000,000
13	Tangki harian 200 L + <i>bundwall</i> sederhana	6,000,000
14	Uji fungsi, <i>commissioning</i> , <i>training</i>	6,000,000
Sub-Total		144,000,000

Tabel 3. Estimasi Biaya – Alternatif 2 (Bongkar Dinding Belakang)

No	Uraian	Biaya (IDR)
1	<i>Survey, engineering</i> & koordinasi warga/RT	6,000,000
2	Pembongkaran dinding belakang (3 m x 2.2 m)	10,000,000
3	Sewa <i>crane</i> 10T + operator (1 hari)	12,000,000
4	Pengamanan area jalan desa & flagman	3,000,000
5	Tenaga kerja <i>rigging</i> (1 hari)	4,000,000
6	Perbaikan dinding & <i>finishing</i> eksterior	9,000,000
7	Pekerjaan pondasi genset + <i>anchor bolts</i>	18,000,000
8	Panel ATS 4P 100A + instalasi	25,000,000
9	Kabel daya 4C x 70 mm ² (25 m) + <i>tray</i>	13,000,000
10	<i>Grounding</i> (2 rod, 3 m) & <i>bonding</i>	4,000,000
11	<i>Exhaust</i> hingga atas atap + <i>muffler</i>	12,000,000
12	Tangki harian 200 L + <i>bundwall</i> sederhana	6,000,000
13	Uji fungsi, <i>commissioning</i> , <i>training</i>	6,000,000
Sub-Total		128,000,000

Tabel 4. Perkiraan Durasi

Alternatif	Durasi (Hari Kerja)	Catatan
Alt 1 – Interior	12-20	Bongkar–pasang interior, proteksi area, akses lebih kompleks
Alt 2 – Belakang	8-14	Bongkar dinding + perbaikan eksterior relatif cepat

Alternatif Solusi & Analisis Risiko

Tabel 5. Matriks Risiko Utama (Probabilitas x Dampak; Skala 1–5)

Risiko	Prob	Dampak	Skor	Mitigasi
Kerusakan interior/lantai (Alt 1)	3	3	9	Proteksi lantai, jalur <i>dolly</i> , <i>plywood</i> , rambu K3
Konflik operasional/akses karyawan (Alt 1)	3	4	12	Jadwal malam/ <i>weekend</i> , <i>zoning</i> area kerja
Dampak kebisingan ke warga (Alt 2)	2	3	6	Sosialisasi warga, jam kerja dibatasi, <i>muffler</i>
Keselamatan <i>rigging</i> & <i>crane</i>	2	5	10	Rencana angkat, <i>rigger</i> tersertifikasi, <i>toolbox meeting</i>
Cuaca (hujan) menghambat <i>crane</i> (Alt 2)	2	3	6	Rencana cadangan jadwal, terpal
Keterlambatan material kabel/ATS	2	3	6	PO lebih awal, <i>buffer</i> waktu

Tabel 6. Matriks Keputusan Berbobot (0–100)

Kriteria	Bobot	Skor Alt 1	Skor Alt 2
Biaya	35%	70	78
Durasi	20%	65	80
Gangguan Operasional	20%	60	85
Keselamatan/Risiko	15%	70	75
Perizinan/Koordinasi	10%	80	70
Skor Total Tertimbang		68.0	78.5

Rekomendasi Solusi

Berdasarkan analisis komparatif dan matriks pembobotan keputusan, alternatif 2 (pembongkaran sementara dinding belakang dan pemasangan genset

melalui jalan desa) direkomendasikan sebagai solusi terbaik untuk instalasi diesel genset 50 kVA pada bangunan perkantoran 10 m x 20 m.

Biaya total efektif menunjukkan keunggulan alternatif 2 setelah memasukkan biaya pemulihan dan

risiko tersembunyi. Alternatif 1 berpotensi *overbudget* hingga Rp 180 juta akibat kerusakan tak terduga (kabel MEP, plafon, lantai keramik) dan kompensasi *downtime* karyawan. Sebaliknya, alternatif 2 memiliki biaya tersembunyi rendah karena pekerjaan eksterior minim interaksi dengan aset interior. Dengan *contingency* 10%, total biaya alternatif 2 tetap di bawah Rp 165 juta, lebih kompetitif dalam *life cycle cost*.

Durasi pelaksanaan menjadi faktor penentu. Alternatif 1 memerlukan 22–28 hari kerja dengan uraian: pelepasan partisi (5 hari), modifikasi jalur interior (3 hari), *lifting* manual (1 hari), restorasi (10–14 hari), dan pengujian (3 hari). Sementara itu, alternatif 2 hanya 14–18 hari dengan uraian: persiapan bukaan (2 hari), bongkar dinding (2 hari), *lifting crane* (1 hari), pemasangan fondasi paralel (5 hari), perbaikan fasad (5–7 hari), dan pengujian (2 hari).

Gangguan operasional adalah aspek paling kritis bagi bangunan aktif. Alternatif 1 menyebabkan *downtime signifikan*, sementara alternatif 2 membatasi gangguan <8 jam total, terfokus pada area belakang.

Keselamatan dan risiko teknis juga mendukung alternatif 2. Alternatif 1 berisiko tinggi, seperti pengangkatan di ruang sempit (*clearance* <0,5 m),

beban lantai melebihi batas aman, potensi korsleting kabel *existing*, dan paparan pekerja terhadap debu gypsum. Skor risiko: 8/10. Sementara, alternatif 2 menurunkan skor menjadi 4/10 dengan penggunaan *spider crane* UNIC URW-295 (radius terkecil 0,6 m, stabilitas *outrigger* 4 titik), zona bahaya terisolasi dengan barikade dan signalman bersertifikat, serta prosedur LOTO ketat. Risiko struktural (retak dinding) dimitigasi dengan *structural assessment* pra-bongkar (menggunakan NDT ultrasonic) dan perbaikan *epoxy injection + carbon fiber reinforcement* jika diperlukan.

Risiko utama alternatif 2 yaitu keselamatan *rigging/crane* dan dampak lingkungan dapat dimitigasi secara sistematis dengan rencana angkat (*lifting plan*) disusun oleh rigger level 3, mencakup *load chart*, *wind speed* <10 m/s, dan simulasi 3D untuk menghindari tabrakan dengan kabel listrik. Keuntungan tambahan alternatif 2, yaitu akses jalan desa (lebar 3,5 m) memungkinkan truk *lowbed* masuk langsung, menghilangkan kebutuhan turning radius di dalam *site*. Secara keseluruhan, alternatif 2 mencetak skor matriks 3,65 vs 2,85 (skala 5), dengan *sensitivity analysis* menunjukkan *robust* bahkan jika bobot biaya dinaikkan 30%.

Tabel 7. Lampiran: Ringkasan Biaya

Alternatif	DPP ((Sub-Total+Cont.)	Termasuk PPN
Alt 1 – Interior	158,400,000	175,824,000
Alt 2 – Belakang	140,800,000	156,288,000

Kesimpulan

Studi kasus instalasi diesel genset 50 kVA pada bangunan perkantoran eksisting menuntut perencanaan akses yang matang. Dua alternatif dievaluasi, yaitu melalui interior dan melalui pembongkaran dinding belakang. Analisis biaya, durasi, risiko, dan gangguan menunjukkan alternatif 2 lebih unggul secara keseluruhan dan layak direkomendasikan.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih ditujukan kepada Universitas Muhammadiyah Sidoarjo yang telah membantu pendanaan Studi ini. Dosen Pembimbing perkuliahan ini. Semoga Allah Tuhan Yang Maha Esa membalas kebbaikannya.

Referensi

- Alam, M. M., Hossain, M. J., Habib, M. A., Arafat, M. Y., & Hannan, M. A. (2025). Artificial intelligence integrated grid systems: Technologies, potential frameworks, challenges, and research directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 211, 115251. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115251>
- BPS Kabupaten Sidoarjo. (2024). *Badan Pusat Statistik Kabupaten Sidoarjo Bps-Statistics Sidoarjo Regency*.

- Cakrayuda, L. (2025). Sicemot: Sistem keamanan cerdas berbasis ESP32-CAM, sensor gerak, dan notifikasi Telegram. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 13(2). <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i2.6420>
- Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi. (2021). *Laporan kinerja Ditjen EBTKE 2020*.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2023). *Laporan kinerja Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral tahun 2023*. Kementerian ESDM.
- Prasetya, R. Y., Adilla, S. A., Farid, M. F. K., Hakim, E. A., & Suhardi, D. (2024). Performance analysis of the 1 MW rooftop solar power generation system at Karawang. *IEEE-U (Journal of Electrical and Electronic Engineering–UMSIDA)*, 8(2), 60–70. <https://doi.org/10.21070/ieeu.v8i2.1685>
- Shadmani, A., Nikoo, M. R., Gandomi, A. H., Wang, R. Q., & Golparvar, B. (2023). A review of machine learning and deep learning applications in wave energy forecasting and WEC optimization. *Energy Strategy Reviews*, 49, 101180. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101180>
- Widyartono, M., Aribowo, W., Rahmadian, R., Wardani, A. L., & Hermawan, A. C. (2024). Designing a portable solar generator for emergencies. *E3S Web of Conferences*, 513, 02006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451302006>

Penerapan *Early Start-Up Option* pada Proyek EPCI Fasilitas Baru Gas Plant Modification for New Delivery Point of Gas Sales to PT PLN (PLTGU Tenayan)

Andrew Joewono¹ Himawan Sigit Nugroho¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

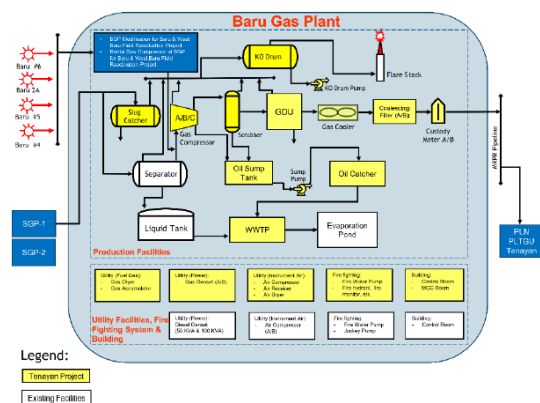
✉ andrew_sby@ukwms.ac.id

Proyek EPCI Fasilitas Baru Gas Plant Modification for New Delivery Point of Gas Sales to PT PLN (PLTGU Tenayan) yang dikelola oleh EMP Bentu Ltd. bertujuan meningkatkan kapasitas dan tekanan suplai gas hingga 30 MMSCFD pada 960 psig. Namun, pada tahap penyelesaian proyek ditemukan keterlambatan mechanical completion pada empat peralatan utama, yaitu *Slug Catcher*, *Discharge Scrubber*, *Gas Cooler*, dan *Gas Filter Coalescer*, yang menyebabkan sistem belum siap untuk *commissioning* penuh. Untuk menjaga jadwal *first gas delivery* dan mencegah penalti kontraktual, tim proyek menerapkan strategi *Early Start-Up Option*, yaitu pengoperasian sebagian sistem proses yang telah siap dengan melakukan bypass sementara terhadap peralatan yang belum lengkap. Implementasi dilakukan dengan modifikasi jalur pipa dan pengaktifan sistem kritis seperti *Production Separator*, *Gas Compressor Package* (A/B/C), *GDU* (*Dehydration Unit*), dan *Custody Metering System*, yang telah melalui verifikasi *Pre-Start-Up Safety Review* (PSSR) dan uji *loop check*. Hasil pelaksanaan *early start-up* menunjukkan bahwa fasilitas dapat beroperasi dengan aman pada kapasitas 15–20 MMSCFD dan kemudian meningkat hingga 30 MMSCFD tanpa insiden keselamatan. Kadar air gas turun dari 5,9 lb/MMscf menjadi 2,2 lb/MMscf, menandakan efektivitas sistem pengeringan walaupun sebagian peralatan masih di-bypass. Strategi ini berhasil meningkatkan *Schedule Performance Index* (SPI) dari 0,76 menjadi 0,95 serta memperlihatkan penerapan prinsip *risk-based engineering* dan *as low as reasonably practicable* (ALARP) secara nyata dalam manajemen proyek keinsinyuran migas.

Kata kunci: *Early Start-Up Option*, *Gas Plant Modification*, *Risk-Based Engineering*

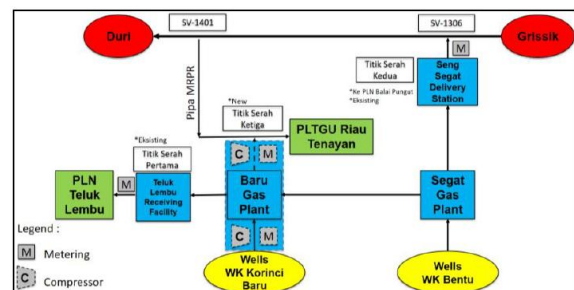
Pendahuluan

Proyek EPCI Fasilitas Baru Gas Plant (BGP) Modification for New Delivery Point of Gas Sales to PT PLN (PLTGU Tenayan), yaitu untuk memodifikasi fasilitas produksi eksisting BGP agar dapat memproses gas dari WK Bentu dan WK Korinci supaya memenuhi persyaratan yang ditentukan dalam PJBG baru antara EMP Bentu, EMP Korinci Baru dan PT PLN (Persero), dan membangun fasilitas titik serah baru (titik serah ketiga) di BGP agar dapat mengalirkan gas ke PT PLN (PLTGU Tenayan).



Gambar 1. Blok Diagram Modifikasi Baru Gas Plant

Gas dari WK Bentu akan dialirkan melalui *pipeline* eksisting dari SGP-1 menuju BGP kemudian bercampur dengan gas dari WK Korinci Baru lalu diproses agar dapat memenuhi spesifikasi PJBG dengan PLN sebelum masuk ke pipa milik MRPR untuk kemudian dialirkan ke PLTGU Tenayan. Diagram alir titik serah ketiga dan tie-in point ke pipa MRPR seperti ditunjukkan dalam gambar di bawah ini:



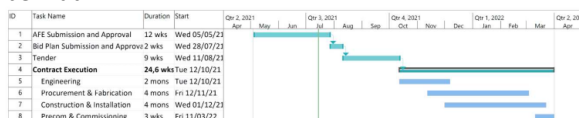
Gambar 2. Skema Lokasi Titik Serah Gas ke PLN

Ruang lingkup proyek ini meliputi:

- Gas compressor package 3 (tiga) buah tipe *reciprocating compressor* dengan penggerak gas engine lengkap dengan aksesoris dan instrumentasinya, kapasitas 30 MMSCFD (2x15 MMscfd run + 1x15MMscfd back up), suction pressure sekitar 200 psig, discharge pressure sekitar 960 psig.

- b) *Glycol dehydration unit* 1 (satu) buah tipe TEG *dehydration* lengkap dengan aksesoris dan instrumentasinya, kapasitas 30 MMscfd, *inlet moisture content* sekitar 100 lb/MMscf, *outlet moisture content* maksimum 15 lb/MMscf.
- c) *Discharge scrubber* 1 (satu) buah dengan kapasitas 30 MMscfd (gas), 100 BPD (liquid) lengkap dengan aksesoris dan instrumentasinya.
- d) *Custody meter c/w filter coalescer* 1 (satu) unit tipe *orifice flowmeter (dual stream)* lengkap dengan aksesoris dan instrumentasinya, kapasitas 30 MMscfd, desain *pressure/temperature* 1100 psig/200 F.
- e) *Utility gas dryer* 1 (satu) buah kapasitas sekitar 2 MMscfd lengkap dengan aksesoris dan instrumentasinya.
- f) *Flare system* terdiri dari KO Drum kapasitas 30 MMscfd dan KO *drum pump* kapasitas sekitar 50 gpm.
- g) *Slug catcher* 1 (satu) buah berkapasitas sekitar 30 MMscfd (Gas), sekitar 100 BBL (*liquid hold up*) lengkap dengan aksesoris dan instrumentasinya.
- h) *Gas cooler* 1 (satu) buah tipe *air fan cooler* dengan penggerak motor listrik lengkap dengan aksesoris dan instrumentasinya, kapasitas 30 MMscfd, *discharge temperature* maksimum 105 oF.
- i) *Waste Water Treatment Plant* (WWTP). Modifikasi kolam WWTP eksisting dan penambahan *oil sump tank* kapasitas sekitar 200 BBL, *oil sump pump* kapasitas sekitar 50 gpm, dan *oil catcher* kapasitas sekitar 150 bpd lengkap dengan aksesoris dan instrumentasinya.
- j) *Gas accumulator* 1 (satu) buah tipe vertical separator lengkap dengan aksesoris dan instrumentasinya, kapasitas sekitar 1 MMscfd, *design pressure/temperature* 200 psig/200 F.
- k) *Fire water pump* 1 (satu) buah tipe pompa sentrifugal dengan penggerak diesel *engine*, berkapasitas sekitar 750 gpm.
- l) *Gas engine generator* Set 2 (dua) buah. *Power generator* dengan penggerak *gas engine* lengkap dengan aksesoris dan instrumentasinya, berkapasitas sekitar 2x250 KVA, 50Hz/3Phase/380V.
- m) *Instrument air system* terdiri dari *air compressor* berkapasitas sekitar 24 scfm, *air dryer* berkapasitas sekitar 50 scfm, dan *air receiver tank* berkapasitas sekitar 4,6 m3.
- n) *Electrical system* terdiri dari MCC, *synchronizing panel*, generator panel, UPS, *wiring & grounding*, *lighting system (lamps, pils & panel)*, *lightning arrester*, *power cable*.
- o) *Instrument system* terdiri dari PCS/ESS, *monitoring system*, *cloud basis*, *instrument control cable*, *fire & gas system*, *field instrument* (SDV, BDV, PSV, PI, TI, CV, etc).

Sebagai referensi, jadwal pelaksanaan proyek dalam persetujuan Perusahaan dapat dilihat pada Gambar berikut



Gambar 3. Jadwal Pelaksanaan Proyek

Proyek Baru Gas *Plant Modification for New Delivery Point of Gas Sales* to PT PLN (PLTGU Tenayan) mengalami keterlambatan (*schedule delay*) karena kombinasi faktor *engineering*, *procurement*, dan konstruksi, yang berdampak pada keterlambatan *mechanical completion*.

Tabel 1. Penyebab Keterlambatan

Kategori	Uraian Penyebab Teknis
Engineering	Keterlambatan pekerjaan <i>Detailed Engineering Design</i> (DED) karena penambahan jumlah dokumen dan performa PMT Kontraktor yang tidak sesuai harapan.
Procurement	Keterlambatan proses <i>procurement</i> akibat keterlambatan DED dan juga tidak efektifnya proses <i>procurement</i> di Kontraktor EPCI yang mengakibatkan keterlambatan kedatangan material dan peralatan di lapangan.
Construction	Keterlambatan perakitan <i>gas compressor</i> akibat COVID19 dan cuaca buruk di Houston USA, serta keterlambatan <i>seafreight</i> akibat padatnnya aktivitas di Pelabuhan Houston.
Coordination	Keterlambatan pekerjaan piping dan E&I dikarenakan keterlambatan <i>delivery</i> material ke lapangan dan performa sub-Kontaktor yang tidak sesuai harapan.

Keterlambatan ini berpotensi menunda jadwal *first gas delivery* yang telah ditetapkan dalam kontrak komersial dengan PLN, yang secara ekonomi dapat menimbulkan penalti keterlambatan serta kerugian bagi operator. Dalam konteks manajemen proyek, situasi tersebut menggambarkan konflik antara *objective schedule* dan *system readiness*, dua elemen penting dari *Project Management Triangle* (PMBOK, 2021). Oleh karena itu, tim proyek menerapkan pendekatan alternatif melalui strategi *Early Start-Up Option*, yaitu melakukan pengoperasian terbatas (*partial operation*) terhadap sistem yang telah diverifikasi aman dan fungsional, sambil melakukan *bypass* terhadap peralatan yang belum siap.

Secara ilmiah, studi penerapan *Early Start-Up Option* ini menjadi penting karena menunjukkan bagaimana integrasi antara manajemen proyek, keselamatan proses, dan pengendalian risiko dapat menghasilkan keputusan teknik yang menjaga keseimbangan antara keamanan operasi, pencapaian target waktu, dan efisiensi sumber daya. Analisis hasil penerapan strategi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan praktik terbaik (*best practice*) dalam proyek-proyek EPCI sektor migas di Indonesia.

Metode

Metodologi pelaksanaan *Early Start-Up Option* didasarkan pada konsep *risk-based project execution* dengan prinsip *functional readiness*, yaitu menjalankan

sebagian sistem proses yang telah memenuhi verifikasi teknis dan keselamatan (*mechanically completed*) sementara peralatan pendukung yang belum siap diisolasi dengan aman.

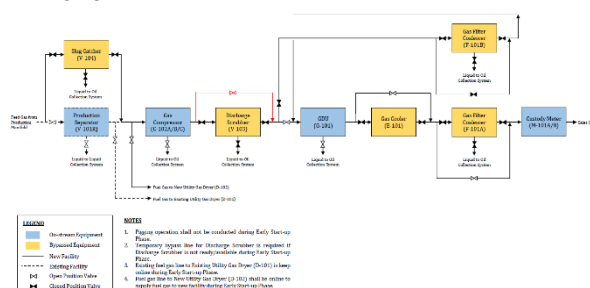
Tabel 2. Daftar Peralatan yang Belum Siap

No	Peralatan	Penyebab Keterlambatan
1	<i>Slug Catcher</i>	Struktur dan pipa <i>inlet</i> belum selesai fabrikasi akibat vendor <i>delay</i> dan revisi desain <i>nozzle</i> .
2	<i>Discharge Scrubber</i>	Belum tersertifikasi BKL, uji tekanan belum dilakukan saat <i>Mechanical Completion</i> .
3	<i>Gas Cooler</i>	Paket air <i>cooler fan</i> belum datang, motor & panel MCC masih proses instalasi.
4	<i>Gas Filter</i>	<i>Housing</i> belum dikirim dari vendor. SKID belum lulus FAT.

Pendekatan penelitian dalam studi ini menggunakan metode rekayasa sistem (*systems engineering approach*) yang menekankan keterpaduan antara aspek teknis, keselamatan, dan manajemen proyek. Metode ini dipilih karena proyek *Early Start-Up Option* tidak sekadar bersifat eksperimental, melainkan merupakan penerapan keinsinyuran nyata (*engineering implementation case*) yang membutuhkan justifikasi ilmiah atas pengambilan keputusan teknis.

Analisis dilakukan dengan menggabungkan kajian dokumen teknis proyek, observasi lapangan, dan evaluasi standar keinsinyuran. Dokumen utama yang menjadi dasar penelitian meliputi:

1. *Worksheet for Early Start-Up* berisi daftar sistem dan peralatan yang siap operasi, serta daftar temporary bypass line.
2. *Block Flow Diagram for Early Start-Up* menggambarkan skema modifikasi aliran gas dan peralatan yang aktif.
3. *Pre-Commissioning and Commissioning Procedure* BGP2-00-PRO-003 sebagai pedoman pelaksanaan.
4. *Pre-Start-Up Safety Review (PSSR)* Report dokumen verifikasi akhir kesiapan operasi dan pengendalian risiko.



Gambar 4. Block Diagram Early Commissioning

Kerangka Analisis

Kerangka analisis dibangun dengan mengadopsi tahapan dari PMBOK Guide (PMI, 2021), terutama pada area pengetahuan *Project Integration Management dan Risk Management*. Proses analisis dibagi menjadi tiga tahap:

- Identifikasi sistem kritis dan non-kritis, berdasarkan fungsi operasional dan urutan proses dalam *Piping & Instrumentation Diagram* (P&ID).
- Evaluasi kesiapan mekanikal dan instrumentasi, melalui tinjauan hasil *mechanical completion* (MC), *instrument loop check*, dan *function test*.
- Analisis risiko teknis dan keselamatan, dilakukan PSSR.

Tahapan ini memastikan bahwa keputusan untuk mengoperasikan sebagian fasilitas tidak hanya berdasarkan urgensi jadwal proyek, tetapi juga memenuhi prinsip praktik keselamatan proses.

Standar dan Acuan Teknis

Dalam implementasinya, metode ini mengacu pada sejumlah standar keinsinyuran dan keselamatan proses, antara lain:

- a) API Recommended Practice 14C (2017) *Analysis, Design, Installation, and Testing of Basic Surface Safety Systems for Offshore Production Platforms*, digunakan sebagai dasar evaluasi fungsi proteksi dan sistem *shutdown* otomatis.
- b) ASME B31.3 – *Process Piping Code*, sebagai acuan integritas pipa proses dan *bypass line*.

Validasi Data

Data yang diperoleh dari dokumen teknis dan observasi lapangan divalidasi melalui proses *cross-verification* antara tim *Engineering, Construction, dan Commissioning*. Validasi dilakukan dengan membandingkan status aktual peralatan di lapangan terhadap aktual *mechanical completion* dan daftar punch list kategori A. Setiap peralatan yang dinyatakan *ready for start-up* harus memenuhi tiga syarat utama:

- Mechanical completion* untuk peralatan dinyatakan lengkap .
- Telah lulus *hydrotest* dan *leak test*.
- Telah diverifikasi fungsinya melalui uji *interlock* atau *function test*.

Analisis dan Sintesis

Hasil dari ketiga tahapan tersebut kemudian disintesis untuk menghasilkan kesimpulan ilmiah terkait efektivitas strategi *Early Start-Up Option*. Analisis difokuskan pada aspek efisiensi waktu proyek (*schedule*), operasi (tekanan dan kadar air gas), serta aspek keselamatan kerja dan sistem (*functional safety*).

Hasil Kerja

Tahapan Implementasi *Early Start-Up*

Pelaksanaan *Early Start-Up Option* pada proyek Baru Gas *Plant Modification* dilakukan sebagai strategi percepatan pengaliran gas ke PLN Tenayan akibat keterlambatan penyelesaian beberapa unit utama proses, yaitu *Slug Catcher* (V-106B), *Discharge Scrubber* (V-103), *Gas Cooler* (E-101), dan *Gas Filter Coalescer* (F-101A/B).

Sebagai langkah mitigasi, *Project Management Team* EMP dan Kontraktor menyusun Prosedur *Early Start-Up* (BGP2-00-PRO-003) sebagai dasar legal untuk

menjalankan sebagian sistem proses secara parsial namun aman.

Pendekatan ini mengacu pada prinsip *partial commissioning*, di mana bagian fasilitas yang telah selesai dan lolos *integrity test* dapat dioperasikan lebih awal tanpa mengganggu tahapan konstruksi unit lain.

Konfigurasi Sistem pada Fase *Early Start-Up*

Berdasarkan hasil kajian *block flow diagram* dan P&ID yang direvisi, sistem gas plant dioperasikan menggunakan konfigurasi berikut:

On-stream equipment:

- Production Separator* (V-101R)
- Gas Compressor* (C-102A/B/C),
- Dehydration Unit* (GDU-101)
- Custody Meter* (M-101A/B);

Bypassed equipment:

- Slug Catcher*,
- Discharge Scrubber*,
- Gas Cooler*,
- Gas Filter Coalescer*;

Utility and start-up support:

Utility Gas Dryer (D-102) dan *Starting Gas Accumulator* (V-107) tetap digunakan sebagai sumber bahan bakar gas untuk penggerak kompresor dan sistem kontrol.

Konfigurasi *bypass* divalidasi melalui *temporary jumper line* yang dirancang dan telah dilakukan *hydrotest* serta *leak test* sesuai standar ASME B31.3.

Dengan konfigurasi ini, gas dari *production manifold* langsung dialirkan ke *production separator* dan diteruskan menuju *gas compressor discharge line* menuju GDU tanpa melalui *cooler* dan *filter coalescer*.

Verifikasi dan Uji Sistem Sebelum Start-Up

Sebelum pelaksanaan *gas-in*, dilakukan serangkaian kegiatan *Pre-Commissioning* dan *Pre-Start-Up Safety Review* (PSSR) untuk memastikan seluruh sistem yang diaktifkan telah aman. Kegiatan utama mencakup:

- Verifikasi instrumentasi dengan melakukan *loop check* pada seluruh *transmitter*, *control valve*, dan *shutdown valve* pada peralatan aktif.
- Melakukan *bypass instrument control* pada peralatan yang di *bypass*.
- Testing untuk *interlock* untuk tekanan dan suhu pada peralatan dan trip kompresor.
- Fire & Gas System Test* yang mencakup deteksi gas, deteksi api, dan sistem alarm *audibel-visual*.
- Melakukan *bypass sistem safety* pada peralatan yang di *bypass* sehingga tidak mengganggu sistem *interlock* pada peralatan yang aktif.
- Menambahkan *temporary individual Emergency Shutdown* pada *Gas Compressor*.
- Electrical and Mechanical Completion Check* untuk memastikan motor, panel MCC, dan sistem *grounding* dalam kondisi siap operasi.
- Pressure Leak Test* pada *temporary bypass line* dan *flare line* untuk mencegah kebocoran gas.

- Verifikasi ESD Logic and F&G *Panel Communication* antara *compressor package* dan PLC.

Seluruh pengujian dicatat dalam *Commissioning Dossier* dan dikonfirmasi melalui Berita Acara PSSR *Early Start-Up* tanggal 17–19 Juni 2022, yang menyimpulkan bahwa fasilitas aman dan sesuai desain untuk dioperasikan sebagian.

Koordinasi dan Manajemen Pelaksanaan

Sebelum pelaksanaan *gas in*, dilakukan serangkaian kegiatan *Pre-Commissioning* dan *Pre-Start-Up Safety Review* (PSSR) untuk memastikan seluruh sistem yang diaktifkan telah aman dan berfungsi sesuai desain.

Kegiatan utama mencakup *loop check* instrumentasi, *function test fire & gas system*, serta *pressure test* pada peralatan *bypass*.

Tabel 3. Lampiran Kegiatan *Precommissioning*



emp

engineering services

PROJECT BARU GAS PLANT MODIFICATION

INSTRUMENT CALIBRATION SHEET

MISCELLANEOUS (GAUGE)



petroflex

petroleum & chemical services

TAG NO	LT-10104	SERVICE	MANUFACTURE	OWNER	
INSTRUMENT	SYSTEM	MODEL			
LOCATION	0-100 %	SERIAL			
DATE		SHEET NO			

NO	Tag No	Range	Test Range		Status	
			LT Range	LT Reading		
1	LT-10104	0-100 %	0%	0%		
			25%	25%		
			50%	50%		
			75%	75%		
			100%	100%		
			125%	125%		
			150%	150%		
			175%	175%		
			200%	200%		
			225%	225%		
Comment						
TESTED BY		SUB-CONTRACTOR/VENDOR	NAME	DATE	SIGNATURE	
APPROVED BY		CONTRACTOR				
		COMPANY				
		COMMISSIONING AUTHORITY				

Setelah kegiatan *pre commissioning* dinyatakan selesai, dilakukan koordinasi lintas fungsi antara tim *Project Management* yang di dalamnya termasuk *Mechanical & Process Engineer*, *Instrument Engineer*, serta melibatkan SHE, *Operation Team*, dan Kontraktor. Kegiatan koordinasi berfokus pada:

- Penentuan *system boundary* antara area *commissioned* dan *non-commissioned*.
- Penentuan *valve status list* dan pemberian *positive isolation tag* pada jalur yang belum siap.
- Review P&ID *mark-up* dan *temporary bypass drawing* oleh tim teknik EMP.
- Penyusunan *Job Safety Analysis* (JSA) serta *Permit to Work* (PTW) untuk seluruh aktivitas lapangan.
- Pengawasan ketat terhadap kegiatan *gas introduction*, termasuk nitrogen *purging*, *pressure build-up*, dan *leak check*.

Keberhasilan tahap ini sangat bergantung pada koordinasi efektif antar-disiplin perusahaan dan kontraktor yang memastikan kesesuaian terhadap prosedur keselamatan.

Pelaksanaan Gas-In dan Monitoring Operasi Awal

Pelaksanaan *gas-in* dilakukan pada 19 Juni 2022 dengan tahapan bertahap:

- Nitrogen *purging* pada sistem utilitas dan pipa proses untuk mengeluarkan udara.
- Pembukaan *inlet valve* menuju *production separator*.

- c) Peningkatan tekanan bertahap hingga 960 psig pada *discharge compressor*.
- d) Pemantauan *pressure*, *temperature*, dan *flow stability* melalui PLC.
- e) Selama 72 jam pertama operasi, tim *commissioning* melakukan *continuous monitoring* untuk memastikan tidak ada deviasi signifikan terhadap parameter proses maupun alarm sistem keselamatan.
- f) Tidak ditemukan *trip* atau *leakage event* dan seluruh *interlock* berfungsi sebagaimana rancangan, menandai keberhasilan fase *early start-up*.

Tabel 4. Ringkasan Hasil Output

Parameter	Value	Dampak/Catatan
Kapasitas	15-30 MMscfd	Sesuai <i>design</i>
Tekanan	960 psig	Sesuai <i>design</i>
Kadar Air	2.2 lb/mm scf	Gas kering
PSSR	Disetujui	Layak operasi
Suhu Gas Discharge	44 C	Maks 50 C
Insiden HSE	Nil	<i>Zero Incident</i>
Sistem Keselamatan	<i>Bypass</i> aman, <i>on-stream</i> parsial. F&G, ESD, dan PSV terverifikasi 100 %	Operasi terkendali. <i>Pre comm</i> dan <i>function test</i> menunjukkan hasil <i>satisfactory</i> .
Peralatan Belum Siap	<i>Slug Catcher</i> , <i>Scrubber</i> , <i>Cooler</i> , <i>Coalescer</i>	Di-bypass sementara; fungsi digantikan peralatan <i>on stream</i> .
Biaya Proyek (AFE)	Tidak ada tambahan biaya (<i>cost neutral</i>)	Modifikasi <i>bypass line</i> sepenuhnya tanggung jawab kontraktor karena keterlambatan, tidak ada biaya dibebankan ke perusahaan.
Kualitas Gas	Sesuai spesifikasi PLN	Layak penjualan

Kesimpulan

Pelaksanaan *Early Start-Up Option* pada proyek Baru Gas Plant Modification for New Delivery Point of Gas Sales to PT PLN (PLTGU Tenayan) terbukti sebagai solusi teknis yang efektif untuk menjaga target *first gas delivery* tanpa mengorbankan aspek keselamatan dan integritas fasilitas.

Empat unit utama *Slug Catcher*, *Discharge Scrubber*, *Gas Cooler*, dan *Gas Filter Coalescer* yang belum dapat diselesaikan untuk tahap *mechanical completion* berhasil diisolasi dengan aman melalui jalur *bypass* sementara, sementara sistem utama seperti *Production Separator*, *Gas Compressor (A/B/C)*, *Dehydration Unit*

(GDU), dan *Custody Meter* dioperasikan sesuai hasil verifikasi *Pre-Start-Up Safety Review (PSSR)*.

Pengujian sistem keselamatan melalui *loop check*, *function test*, dan *fire & gas system test* membuktikan bahwa seluruh *interlock* dan proteksi tekanan bekerja normal, sehingga sistem dapat dioperasikan dengan risiko minimal sesuai *prinsip as low as reasonably practicable (ALARP)*.

Dari sisi kinerja proyek, implementasi *early start-up* memungkinkan suplai gas ke PLN Tenayan mencapai 30 MMSCFD pada tekanan 960 psig dengan kadar air turun dari 15 lb/MMscf menjadi 2,2 lb/MMscf sesuai spesifikasi yang diminta PLN sebagai pembeli gas. Tidak ditemukan insiden keselamatan selama periode operasi awal, menunjukkan keberhasilan penerapan prinsip *risk-based engineering*.

Pendekatan ini membuktikan bahwa pengambilan keputusan teknis berbasis analisis risiko dapat menjadi strategi efektif dalam proyek EPCI migas, di mana ketepatan waktu dan keselamatan operasi harus dicapai secara bersamaan.

Dari perspektif keprofesian, keberhasilan pelaksanaan *Early Start-Up Option* mencerminkan kompetensi insinyur dalam menerapkan keselamatan dan keberlanjutan dan manajemen proyek keinsinyuran. Proyek ini menunjukkan bahwa insinyur tidak hanya berperan sebagai pelaksana teknis, tetapi juga sebagai pengambil keputusan berbasis etika, tanggung jawab, dan pertimbangan risiko yang terukur.

Dengan demikian, studi kasus ini menjadi contoh nyata penerapan keinsinyuran berbasis keselamatan dan efisiensi waktu yang dapat direplikasi dalam proyek-proyek migas nasional lainnya untuk mendukung keandalan dan kontinuitas pasokan energi Indonesia.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada EMP Bentu Ltd. selaku pemilik proyek atas izin, dukungan teknis, dan akses data selama pelaksanaan studi ini.

Penghargaan disampaikan pula kepada tim kontraktor EPCI yang telah mendukung penuh pelaksanaan *Early Start-Up Option* melalui kolaborasi lintas disiplin antara tim process, mechanical, instrumentation, electrical, dan HSE.

Penulis juga berterima kasih kepada seluruh anggota Tim *Commissioning* Baru Gas Plant yang telah melaksanakan *loop check*, *function test*, *leak test*, dan *safety verification* dengan dedikasi tinggi hingga fasilitas dapat dioperasikan dengan aman.

Akhirnya, penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya, khususnya Program Studi Profesi Insinyur, yang telah memberikan bimbingan akademik, kesempatan publikasi, dan dukungan dalam penyusunan karya ilmiah ini.



Referensi

- American Petroleum Institute. (2014). *Recommended practice 14C: Analysis, design, installation, and testing of basic surface safety systems for offshore production platforms* (8th ed.). Washington, DC: American Petroleum Institute.
- EMP Bentu Ltd. (2022a). *MoM pembahasan PIS AFE No. 21-22A-001-OO (Tenayan) Rev. 2* (Internal report). Pekanbaru: EMP Bentu Ltd.
- EMP Bentu Ltd. (2022b). *PSSR early start-up & commissioning report for Baru Gas Plant Modification Project* (Internal report). Pekanbaru: EMP Bentu Ltd.
- International Society of Automation. (2010). *ISA 84: Functional safety—Safety instrumented systems for the process industry sector*. Research Triangle Park, NC: ISA.
- Kerzner, H. (2017). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling* (12th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Morris, P. W. G. (2013). *Reconstructing project management*. Chichester, UK: Wiley-Blackwell.
- Project Management Institute. (2021). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide)* (7th ed.). Newtown Square, PA: Project Management Institute.
- Sinaga, H. (2019). *Manajemen proyek konstruksi migas: Integrasi teknik, waktu, dan biaya*. Bandung: ITB Press.
- Satuan Kerja Khusus Pelaksana Kegiatan Usaha Hulu Minyak dan Gas Bumi. (2015). *Pedoman tata kerja No. PTK-033/SKKO0000/2015/SO (Revisi 02): Pelaksanaan place into service (PIS) fasilitas produksi hulu migas*. Jakarta: SKK Migas.
- Wideman, R. M. (1992). *Project and program risk management: A guide to managing project risks and opportunities*. Newtown Square, PA: Project Management Institute.



Analisa Penyebab Nilai *California Bearing Ratio* (CBR) pada Lapisan Tanah Atas (*Base Course*) yang Tidak Memenuhi Syarat dalam Pekerjaan *Access Road*

Joudri Rudi Sairlela¹ Rasional Sitepu²

^{1,2} Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ joudri.sairlela999@gmail.com

✉ rasional@ukwms.ac.id

Pekerjaan “Pengadaan dan Pemasangan Bay Kapasitor Wilayah UIT JBT di Gardu Induk 150 kV Cikédung” bertujuan untuk meningkatkan sistem pada gardu induk. Dalam pekerjaan tersebut ada beberapa item pekerjaan yang dikerjakan, salah satunya ialah pekerjaan *access road*. Dalam proses pekerjaan *access road* terdapat permasalahan yang terjadi, yakni nilai pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) pada kepadatan tanah lapisan kedua (*base course*) tidak memenuhi nilai yang ditetapkan dalam perencanaan. Dengan adanya permasalahan tersebut dilakukan analisa data dengan menggunakan metode pengukuran untuk ambil data. Teknik ini diterapkan untuk memahami metode kerja pada saat melakukan pemadatan lapisan tanah, karakteristik material lapisan tanah setelah dipadatkan, serta jenis atau spesifikasi alat bantu kerja yang digunakan pada saat melakukan pemadatan lapisan tanah. Dari hasil analisa dapat disimpulkan bahwa penyebab hasil pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) pada lapisan tanah atas (*base course*) yang tidak memenuhi syarat adalah kekeliruan dalam memilih alat pemadatan yang digunakan pada saat melakukan pemadatan tanah.

Kata kunci: Kepadatan Tanah, CBR Lapangan

Pendahuluan

Pekerjaan “Pengadaan dan Pemasangan Bay Kapasitor Wilayah UIT JBT di Gardu Induk 150 kV Cikédung” bertujuan untuk meningkatkan sistem pada gardu induk. Dalam pekerjaan tersebut ada beberapa item pekerjaan yang dikerjakan, salah satunya ialah pekerjaan *access road*. Tujuan pembuatan *access road* adalah sebagai akses mobilisasi kendaraan pada saat melakukan perbaikan peralatan pada gardu induk tersebut.

Dalam perencanaan, *access road* dikategorikan sebagai jalan lalu lintas ringan karena penggunaannya terbatas pada kegiatan perbaikan peralatan di lingkungan GI. Untuk menjamin ketahanan struktur jalan, pada setiap lapisan pekerjaan ditetapkan nilai kepadatan tanah minimum. Untuk lapisan pertama (*sirtu*) nilai CBR yang dipersyaratkan minimal > 6%, sedangkan untuk lapisan kedua (*base course*) nilai CBR minimal > 60%.

Pada pelaksanaan pekerjaan ditemukan permasalahan, yaitu nilai pengujian CBR untuk lapisan kedua (*base course*) tidak memenuhi spesifikasi perencanaan. Kondisi ini memerlukan identifikasi penyebab ketidaksesuaian dan pelaksanaan tindakan korektif agar spesifikasi teknis terpenuhi dan fungsi *access road* tetap terjamin.

Metode

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode *problem solving* serta wawancara para pekerja pada saat melakukan penghamparan dan pemadatan material lapisan tanah. Teknik ini diterapkan dengan tahapan identifikasi metode kerja pada saat melakukan pemadatan lapisan tanah, identifikasi alat pemadatan tanah yang digunakan dengan melihat spesifikasi serta cara kerja alat pada saat melakukan pemadatan lapisan tanah, serta melakukan analisa perhitungan hasil pengujian

CBR dan membandingkan dengan nilai persyaratan rencana yang ditetapkan. Dari metode tersebut barulah dapat menganalisa penyebab terjadinya nilai CBR pada lapisan tanah atas (*base course*) yang tidak memenuhi nilai yang ditetapkan dalam perencanaan.

Konsep Dasar

Setiap aspek pembangunan, tanah selalu memiliki peran penting. Tanah melakukan perannya dalam bidang konstruksi sebagai salah satu komponen maupun sebagai tempat suatu konstruksi berdiri. Begitu pentingnya peranan tanah, maka perlu dipastikan bahwa tanah tempat konstruksi berdiri harus memiliki kemampuan untuk mendukung atau memikul beban konstruksi di atasnya (daya dukung tanah) (Riant Pandu et al, 2021).

Pemadatan yang sesuai dengan standar yang berlaku akan menghasilkan jalan dengan kualitas yang baik sehingga umur jalan lebih lama dan kemungkinan kerusakan akan lebih kecil. Oleh karena itu, tanah dasar harus mempunyai kapasitas daya dukung yang optimal, sehingga fungsi tanah dasar yaitu menerima tekanan akibat beban lalu lintas di atasnya, mampu menerima gaya akibat beban lalu lintas tanpa mengalami kerusakan. Ketahanan struktur perkerasan lentur jalan raya sangat ditentukan oleh kinerja dari setiap lapisan.

Kekuatan konstruksi sebuah perkerasan jalan sangat ditentukan oleh beberapa faktor. Salah satu faktor tersebut adalah kekuatan dan ketahanan dari lapisan pondasi bawah (*subbase*) dari jalan. Semakin baik tingkat kepadatan dan semakin besar nilai daya dukung dari lapisan *subbase*, maka semakin baik pula ketahanan (kekokohan/kestabilan) dari konstruksi tersebut (Hayadi et al, 2021).

California Bearing Ratio (CBR) adalah sebuah metode (cara) untuk menentukan besaran nilai daya

dukung tanah dalam menahan/mendukung beban yang bekerja di atasnya, yaitu beban yang bekerja di atas perkerasan jalan. Nilai CBR laboratorium didapat dengan menggunakan alat uji CBR sedangkan untuk nilai CBR lapangan didapat dengan menggunakan alat uji CBR lapangan (Hayadi et al, 2021).

A. Pelaratan Pengujian CBR Test Lapangan (Standar Nasional Indonesia, 2011)

- a. Dongkrak CBR mekanis yang dioperasikan secara manual, dilengkapi dengan *swivel head* untuk mengukur beban yang bekerja pada torak dan didesain sesuai dengan spesifikasi di bawah ini:
 - Kapasitas minimum 2700 kg (5950 lb).
 - Daya angkat minimum 50,8 mm (2 inci).
 - Engkol, dengan radius 152,4 mm (6 inci).
 - Putaran roda gigi tinggi, kira-kira 2,4 putaran per 1 mm (0,04 inci) penetrasi.
 - Putaran roda gigi menengah, kira-kira 5 putaran per 1 mm (0,04 inci) penetrasi.
 - Putaran roda gigi rendah, kira-kira 14 putaran per 1 mm (0,04 inci) penetrasi.
 - Putaran roda gigi yang lain dapat digunakan untuk kenyamanan dalam pemutar.
 - Dongkrak mekanis CBR yang lain dengan beban maksimum yang sama dapat digunakan jika rata-rata penetrasi beban merata setiap 1,3 mm (0,05 inci) per menit dapat dicapai.
- b. Dua buah cincin pengujian yang telah dikalibrasi dengan rentang pembebanan 0 kN sampai dengan 8,8 kN (1984 lbf) dan rentang pembebanan 0 kN sampai dengan 22,6 kN (5070 lbf).
- c. Torak penetrasi berdiameter 50,9 mm $\pm$ 0,1 mm (2 inci $\pm$ 0,004 inci) dengan luas nominal 1936 mm² (3 inci²) dan panjangnya kira-kira 102 mm (4 inci).
- d. Dua buah arloji pengukur untuk mengukur penurunan dengan ketelitian pembacaan 0,0025 mm (0,0001 inci) dan kemampuan pembaca setiap 6,4 mm (0,25 inci), serta 1 (satu) buah arloji pengukur untuk mengukur penetrasi dengan ketelitian pembacaan 0,025 mm (0,001 inci) dan kemampuan pembacaan setiap 25 mm (1 inci) yang dilengkapi dengan sebuah alat penunjuk tambahan yang dapat diatur.
- e. Peralatan pendukung untuk penunjuk penetrasi, yaitu sebuah alat yang terbuat dari batang aluminium atau batang kayu dengan tebal 76,2 mm (3 inci) dan panjang 1,5 m (5ft).
- f. Pelat beban pemberat, yaitu pelat berbentuk lingkaran yang terbuat dari baja dengan diameter 254 mm $\pm$ 0,5 mm (10 inci $\pm$ 0,02 inci) dan mempunyai diameter lubang 50 mm $\pm$ 0,5 mm (2 inci $\pm$ 0,02 inci). Pelat tersebut memiliki berat 4,54 kg $\pm$ 0,01 kg (10 lb $\pm$ 0,02 lb).
- g. Beban pemberat, yaitu 2 (dua) buah beban pemberat sebesar 4,54 kg $\pm$ 0,01 kg (10 lb) dengan diameter 216 mm $\pm$ 1 mm (8,5 inci) dan 2 (dua) beban tambahan sebesar 9,08 kg $\pm$ 0,01 kg (20 lb) dengan diameter 216 mm $\pm$ 1 mm (8,5 inci).
- h. Truk yang dapat menahan beban sebesar 31 kN (6970 lbf). Truk dilengkapi dengan balok yang terbuat dari besi dan alat tambahan lainnya. Alat tambahan yang dipasangkan pada bagian belakang truk

menerima reaksi gaya penetrasi torak ke dalam suatu lapisan/bahan tanah. Alat tambahan yang dipasang sesuai dengan ketentuan sehingga truk dapat didongkrak dan menahan beban yang dipikul pegas belakang truk sehingga pengujian dapat dilakukan tanpa ada gerakan ke atas dari sasis truk tersebut. Jarak antara suatu lapisan/bahan tanah dan alat penetrasi yang diizinkan ialah 0,6 m (2ft).

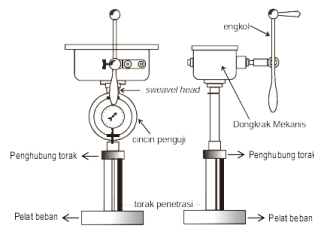
- i. Dongkrak truk dengan kapasitas 15 ton yang mempunyai dua kombinasi trip dan penurunan otomatis.
- j. Peralatan umum lainnya, seperti tempat benda uji untuk kadar air, berat isi, spatula, alat penggali, alat-alat penumbuk, alat perata (*level*), alat untuk mengukur kadar air, jam ukur, dan lain-lain.

B. Prosedur Pengujian CBR Test Lapangan (Standar Nasional Indonesia, 2011)

- a. Tentukan titik pengujian dimana jarak titik pengujian ditentukan agar tidak mengganggu pengujian di titik berikutnya. Jarak minimum antar titik pengujian penetrasi pada tanah plastis (lempung) sebesar 175 mm (7 inci) sedangkan pada tanah granular jarak spasi minimum sebesar 380 mm (15 inci).
- b. Siapkan area permukaan pada titik pengujian sesuai kedalaman lapisan yang akan diuji dengan memindahkan material lepas dan buatlah area tersebut menjadi datar agar pengujian dapat dilakukan. Ketika ditemukan material non plastis (granular), dimana pekerjaan pembersihan material tersebut tidak boleh mengganggu permukaan area pengujian.
- c. Tempatkan truk di tengah lokasi titik pengujian, pasang dongkrak untuk menaikkan truk sehingga tidak lagi menumpu pada pernya. Usahakan posisi as roda belakang truk agar sejajar dengan permukaan lapisan yang akan diperiksa.
- d. Letakkan dongkrak pada posisi yang tepat pada lokasi pengujian, kemudian sambungkan cincin pengujian pada ujung dari dongkrak tersebut. Ikatkan penghubung torak ke bagian bawah cincin pengujian kemudian hubungkan sejumlah pipa tambahan sehingga jarak titik pengujian dengan permukaan mendekati 125 mm (4,9 inci). Hubungkan pipa tambahan tersebut pada torak penetrasi dan ikat dongkrak pada tempatnya. Periksa dan perbaiki dongkrak yang sudah dirakit agar kedudukannya vertikal.
- e. Letakkan pelat beban dengan berat 4,54 kg (10 lb) di bawah torak penetrasi sehingga torak penetrasi dapat masuk ke dalam lubang pelat beban tersebut.
- f. Aturlah torak penetrasi sehingga dapat memberikan beban sebesar 0,21 kg/cm² (3Psi). Untuk pengaturan yang cepat, gunakanlah putaran roda gigi dari dongkrak tersebut. Untuk suatu lapisan/bahan tanah dengan permukaan yang tidak rata, torak diatur agar terletak di atas lapisan tipis kapur yang lolos saringan No. 20 sampai dengan No. 40.
- g. Area permukaan tempat pengujian haruslah rata agar beban yang bekerja pada pelat beban dapat didistribusikan secara merata. Apabila area permukaan tempat pengujian tidak rata, usahakan

dengan menambah lapisan pasir halus sampai dengan ketebalan 3-6 mm (0,12 inci sampai dengan 0,24 inci) sehingga distribusi beban ke permukaan pengujian merata.

- h. Berikan beban tambahan pada pelat beban sehingga sama dengan beban yang bekerja pada perkerasan. Kecuali pada pembebanan minimum sebesar 4,54 kg (10 lb) pada pelat beban dan ditambah 1 (satu) beban tambahan sebesar 9,08 kg (20 lb).
- i. Pasang arloji pengukur penetrasi pada torak.
- j. Atrulah agar arloji pengukur menunjukan angka nol.
- k. Berikan pembebanan pada torak penetrasi dengan kecepatan penetrasi konstan mendekati 1,3 mm/menit (0,05 inci/menit). Gunakan putaran roda gigi rendah pada dongkrak selama tes berlangsung. Catatlah pembacaan beban pada penetrasi awal 0,064 mm (0,025 inci) sampai pada akhir kedalaman 12,7 mm (0,5 inci). Pada tanah yang seragam, kedalaman penetrasi lebih dari 7,62 mm (0,3 inci) dapat diabaikan. Kemudian hitung perbandingan tegangan yang dinyatakan dalam persen.

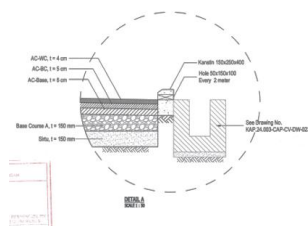


Gambar 1. Alat Uji CBR Test Lapangan

Pembahasan

Berdasarkan metode analisa yang digunakan, diperoleh informasi sebagai berikut:

- Dalam perencanaan pekerjaan *access road* ketebalan setiap lapisan tanah yang direncanakan ialah sirtu setebal 150 mm (15cm) dan *base course* 150 mm (15 cm), dimana setiap lapisan tanah dipadatkan menggunakan *Roller Getar/Vibrator Roller*. Pemadatan lapisan tanah menggunakan *Roller Getar/Vibrator Roller* bertujuan sebagai bentuk penghematan biaya pekerjaan pemadatan.
- Metode pemadatan lapisan tanah yang dilakukan, yaitu setiap lapisan tanah dibagi menjadi 3 layer, perlayer hamparan sirtu/*base course* dibuat per 50 mm (5 cm), setelah itu baru dipadatkan sampai ketebalan rencana setiap lapisan tanah.
- Setelah dilakukan pemadatan lapisan tanah barulah dilakukan pengujian CBR pada setiap lapisan tanah, pengujian CBR dilakukan sebanyak 2 titik pada setiap lapisan tanah.



Gambar 2. Gambar Rencana Pekerjaan Acces Road



Gambar 3. Roller Getar/Vibrator Roller



Gambar 4. Proses Pemadatan Sirtu



Gambar 5. Proses Pemadatan Base Course



Gambar 6 Pengujian CBR Lapangan

Tabel 1. Hasil Pengujian dan Perhitungan Nilai CBR pada Lapisan Tanah 1 (Sirtu) Titik 1 (Standar Nasional Indonesia, 2012)

Penetrasi:		Kalibrasi Alat: 51.288	
Time (Menit)	Penetrasi (in)	Pembacaan Arloji Ukur Beban (devisi)	Beban Penetrasi = Pembacaan Arloji x Angka Kalibrasi Alat (lb)
0	0	0	0
0.5	0.025	3	153.864
1	0.050	4.5	230.796
1.5	0.075	7	395.016
2	0.10	8	410.304
2.5	0.124	10.5	538.524
3	0.15	12.5	641.100
3.5	1.74	15.5	794.964
4	0.20	15.5	794.964
5	0.25	15.5	794.964
6	0.30	15.5	794.964
Nilai CBR			
0.10 in		0.20 in	
$\frac{410.304}{3000} \times 100$		$\frac{794.964}{4500} \times 100$	
= 13.67 %		= 17.66 %	

Tabel 2. Hasil Pengujian dan Perhitungan Nilai CBR pada Lapisan Tanah 1 (Sirtu) Titik 2 (Standar Nasional Indonesia, 2012)

Penetrasi :		Kalibrasi Alat: 51.288	
Time (Menit)	Penetrasi (in)	Pembacaan Arloji Ukur Beban (devisi)	Beban Penetrasi = Pembacaan Arloji x Angka Kalibrasi Alat (lb)
0	0	0	0
0.5	0.025	2.5	128.220
1	0.050	3.5	179.508
1.5	0.075	4	205.152
2	0.10	5	256.440
2.5	0.124	6	307.728
3	0.15	8	410.304
3.5	1.74	9	461.592
4	0.20	10	512.880
5	0.25	10	512.880
6	0.30	10	512.880
Nilai CBR			
0.10 in		0.20 in	
$\frac{205.152}{3000} \times 100$		$\frac{384.660}{4500} \times 100$	
= 6.38 %		= 8.54 %	

Tabel 3. Hasil Pengujian dan Perhitungan Nilai CBR Pada Lapisan Tanah 2 (*Base Course*) Titik 1 (Standar Nasional Indonesia, 2012)

Penetrasi :		Kalibrasi Alat: 51.288	
Time (Menit)	Penetrasi (in)	Pembacaan Arloji Ukur Beban (devisi)	Beban Penetrasi = Pembacaan Arloji x Angka Kalibrasi Alat (lb)
0	0	0	0
0.5	0.025	1	51.288
1	0.050	2	102.576
1.5	0.075	3	153.864
2	0.10	4	205.152
2.5	0.124	4.8	246.182
3	0.15	5	256.440
3.5	1.74	6	307.728
4	0.20	7	359.016
5	0.25	8	410.304
6	0.30	8	410.304
Nilai CBR			
0.10 in		0.20 in	
$\frac{205.152}{3000} \times 100$		$\frac{359.016}{4500} \times 100$	
= 6.38 %		= 7.97 %	

Tabel 4 Hasil Pengujian dan Perhitungan Nilai CBR pada Lapisan Tanah 2 (*Base Course*) Titik 2 (Standar Nasional Indonesia, 2012)

Penetrasi :		Kalibrasi Alat: 51.288	
Time (Menit)	Penetrasi (in)	Pembacaan Arloji Ukur Beban (devisi)	Beban Penetrasi = Pembacaan Arloji x Angka Kalibrasi Alat (lb)
0	0	0	0
0.5	0.025	1.5	76.932
1	0.050	2	102.576
1.5	0.075	3	153.864
2	0.10	4	205.152
2.5	0.124	5	256.440
3	0.15	5.5	282.084

3.5	1.74	6.5	333.372
4	0.20	7.5	384.660
5	0.25	8	410.304
6	0.30	9.5	487.236
Nilai CBR			
0.10 in		0.20 in	
$\frac{205.152}{3000} \times 100$		$\frac{384.660}{4500} \times 100$	
= 6.38 %		= 8.54 %	

Analisis Permasalahan

Dari hasil pengujian dan perhitungan CBR Test didapatkan hasil sebagai berikut :

- Tanah lapisan 1 (*sirtu*) :
 - Titik pengujian 1 : 13.67% > 6 % (Sesuai)
 - Titik pengujian 2 : 8.54% > 6 % (Sesuai)
- Tanah lapisan 2 (*base course*) :
 - Titik pengujian 1 : 6.83% < 60 % (Tidak Sesuai)
 - Titik pengujian 2 : 6.83% < 60 % (Tidak Sesuai)

Dari hasil perhitungan di atas dapat disimpulkan bahwa untuk pengujian tanah lapisan 1 (*sirtu*) sudah memenuhi persyaratan yang ditetapkan, sedangkan tanah lapisan 2 (*base course*) tidak memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Dari hasil investigasi terhadap metode kerja, alat bantu, dan prosedur pengujian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan *roller getar (vibratory roller)* untuk pemadatan lapisan kedua tidak optimal. Alat tersebut memberikan efek getaran yang kurang sesuai serta memiliki dimensi dan berat yang tidak memadai untuk mencapai kepadatan yang diharapkan pada *base course*.

Secara umum, *roller* getar lebih cocok digunakan untuk memadatkan material berbutir seperti halus seperti pasir atau untuk perataan permukaan. Untuk lapisan *base course* yang membutuhkan tekanan dan ketahanan struktur lebih besar, direkomendasikan penggunaan alat pemadat yang memiliki kapasitas statis atau kombinasi beban dan frekuensi yang sesuai, serta prosedur pemadatan yang disesuaikan dengan karakteristik material.

Untuk material *base course* sendiri umumnya terbuat dari batuh pecah (agregat kasar dan halus) yang dicampur dengan ukuran gradasi tertentu. Demikian juga untuk melakukan pemadatan pada jenis material *base course* ini perlunya menggunakan alat pemadatan yang mempunyai efek getaran dan berat yang besar agar mendapatkan hasil kepadatan yang maksimal (Kementerian Pekerjaan Umum, 2004).

Kesimpulan

Dengan melihat permasalahan di atas dapat disimpulkan bahwa penyebab hasil pengujian California *Bearing Ratio* (CBR) pada lapisan tanah atas (*base course*) yang tidak memenuhi syarat, disebabkan oleh kekeliruan dalam menentukan alat pemadatan yang digunakan pada saat melakukan pemadatan tanah.

Saran

Dengan adanya permasalahan tersebut perlu adanya evaluasi dalam melakukan perencanaan dalam melakukan pekerjaan ke depan. Karena demi mencapai suatu efisiensi biaya pekerjaan, perlu juga memahami jenis perkerjaan yang dilakukan serta alat bantu kerja yang digunakan, agar tidak ada kesalahan yang terjadi, dimana dapat mengakibatkan



pembengkakan biaya, waktu kerja, serta bertambahnya alat bantu kerja dalam pekerjaan tersebut.

Referensi

- Riant Pandu, P., Putra, A. D., Sulistyorini, R., & Afriani, L. (2021). Hubungan nilai CBR laboratorium dengan pemadatan modified dan nilai dynamic cone penetrometer (DCP) di lapangan. *Jurnal Teknik Sipil*, 9(4), 691–702.
- Hayadi., Lakawa, I., & Sulaiman. (2021). Korelasi nilai CBR dengan kepadatan lapangan subbase course. *Sultra Civil Engineering Journal*, 2(2), 74-80.
- Standar Nasional Indonesia. (2011). *SNI 1738:2011: Cara uji CBR (California Bearing Ratio) lapangan* (hlm. 1–6).
- Standar Nasional Indonesia. (2012). *SNI 1744:2012: Metode uji CBR laboratorium* (hlm. 18).
- Kementerian Pekerjaan Umum. (2004). *Pedoman konstruksi dan bangunan Pd T-14-2004-B*.

Sistem Informasi Monitoring Pengoperasian Leasing Marine Vessel Power Plant dan Independent Power Producer (Simple Plant) untuk Peningkatan Akurasi Perhitungan Take or Pay di PT PLN (Persero) AP2B Sistem Minahasa

Aldi Erzanuari¹ Andrew Joewono²

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

² Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ ¹aldi.erzanuari@pln.co.id, ²andrew_sby@ukwms.ac.id

Keandalan dan efisiensi sistem tenaga listrik menjadi prioritas utama PT PLN (Persero) dalam mendukung penyediaan energi berkelanjutan sesuai SDG 7 (*Affordable and Clean Energy*) dan SDG 9 (*Industry, Innovation and Infrastructure*). Salah satu permasalahan yang dihadapi AP2B Sistem Minahasa adalah keterlambatan dan ketidakakuratan rekap data operasi pembangkit *Independent Power Producer* (IPP) dan *Leasing Marine Vessel Power Plant* (LMVPP) yang masih dilakukan manual, sehingga berpotensi menimbulkan kesalahan perhitungan *Capacity Factor* (CF) dan mekanisme *Take or Pay* (TOP). Sebagai solusi, dikembangkan aplikasi *Simple Plant* yang mengintegrasikan data daya mampu, status unit, dan energi tersalur secara *real-time* melalui protokol IEC 60870-5-104 dan divisualisasikan berbasis web (PHP-MySQL). Hasil implementasi menunjukkan peningkatan efisiensi waktu rekap hingga 89%, penurunan kesalahan input sebesar 91%, dan penghematan finansial hingga Rp21,18 juta per hari operasi. Analisis risiko menunjukkan seluruh risiko inheren berhasil ditekan ke tingkat rendah melalui kontrol otomatis dan pemantauan jaringan. *Simple Plant* terbukti efektif, efisien, dan berkelanjutan dalam mendukung digitalisasi sistem monitoring pembangkit di PLN.

Kata kunci: *Take or Pay, Capacity Factor, SCADA, Monitoring Real-time*

Pendahuluan

Keandalan dan efisiensi sistem tenaga listrik merupakan faktor kunci dalam mendukung ketahanan energi nasional dan keberlanjutan ekonomi. PT PLN (Persero) sebagai penyedia utama tenaga listrik di Indonesia terus berupaya melakukan transformasi digital untuk memastikan pengoperasian sistem tenaga yang lebih andal, efisien, dan transparan. Salah satu tantangan signifikan yang dihadapi adalah penerapan skema *Power Purchase Agreement* (PPA) antara PLN dan *Independent Power Producer* (IPP) yang menggunakan mekanisme *Take or Pay* (TOP). Dalam skema ini, PLN tetap wajib membayar sejumlah energi yang disepakati dalam kontrak, meskipun terdapat perbedaan antara daya mampu aktual dengan yang dijanjikan. Oleh karena itu, akurasi perhitungan *Capacity Factor* (CF) dan energi tersalur menjadi sangat penting untuk menghindari kerugian finansial maupun konflik kontraktual.

Di wilayah operasi Sulawesi Utara dan Gorontalo, salah satu unit yang dikelola oleh PLN adalah *Leasing Marine Vessel Power Plant* (LMVPP) Amurang, yaitu pembangkit terapung berbasis mesin diesel dengan kapasitas besar yang disewakan oleh pihak ketiga. LMVPP ini terhubung dengan beberapa IPP melalui sistem transmisi 150 kV dan dimonitor oleh AP2B Sistem Minahasa. Dalam praktiknya, proses rekapitulasi data operasi IPP dan LMVPP masih dilakukan secara manual menggunakan format *logsheets* harian. Kondisi ini menimbulkan beberapa kendala, seperti keterlambatan

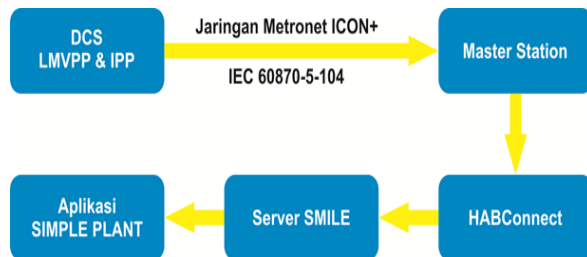
pelaporan, potensi kesalahan *input*, serta sulitnya melakukan validasi silang dengan data dari sistem *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA).

Permasalahan tersebut berdampak langsung terhadap akurasi penghitungan *Take or Pay*, dimana selisih kecil antara data aktual dan laporan dapat menimbulkan perbedaan nilai pembayaran yang signifikan. Selain itu, proses manual juga menyulitkan analisis performa pembangkit secara *real-time*, terutama ketika diperlukan tindakan cepat terhadap gangguan unit atau deviasi daya. Kebutuhan akan sistem yang mampu menampilkan data pembangkit secara otomatis, terintegrasi, dan berbasis waktu nyata menjadi semakin mendesak seiring meningkatnya kompleksitas jaringan listrik dan tuntutan efisiensi operasional PLN.

Sebagai solusi, dikembangkan sistem berbasis web bernama *SIMPLE PLANT* (*Sistem Informasi Monitoring Pengoperasian Leasing Marine Vessel Power Plant dan Independent Power Producer*). Sistem ini dirancang untuk mengintegrasikan data dari SCADA melalui protokol komunikasi IEC 60870-5-104, kemudian menampilkannya dalam bentuk *dashboard* interaktif menggunakan teknologi *PHP-MySQL-Apache*. Dengan sistem ini, data daya mampu, energi tersalur, dan status operasi setiap unit dapat diperoleh secara otomatis dan diolah menjadi laporan digital yang siap digunakan untuk analisis *Capacity Factor* dan perhitungan *Take or Pay*.

Proyek ini diharapkan dapat meningkatkan akurasi dan efisiensi rekapitulasi data hingga di atas 85%,

mengurangi kesalahan *input* operator, serta memperkuat pengendalian risiko operasional di lingkungan AP2B Sistem Minahasa. Lebih jauh, penerapan *Simple Plant* menjadi langkah nyata menuju digitalisasi sistem *monitoring* pembangkit yang sejalan dengan agenda Transformasi Digital PLN dan pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDG) 7 dan SDG 9, yaitu penyediaan energi bersih yang terjangkau serta penguatan inovasi dan infrastruktur industri.



Gambar 1. Diagram Sistem Aplikasi *Simple Plant*

Metode

Penelitian dan implementasi sistem *Simple Plant* dilaksanakan di lingkungan PT PLN (Persero) Area Pengatur Pembebanan (AP2B) Sistem Minahasa, yang berlokasi di Tomohon, Sulawesi Utara. Unit ini memiliki tanggung jawab pengawasan sistem operasi pembangkit di wilayah Sulawesi Utara dan Gorontalo, termasuk beberapa pembangkit *Independent Power Producer* (IPP) serta *Leasing Marine Vessel Power Plant* (LMVPP) Amurang.

Pendekatan yang digunakan adalah metode rekayasa sistem (*system engineering approach*) dengan tahapan meliputi analisis kebutuhan, perancangan sistem, implementasi, serta evaluasi performa. Setiap tahap dikembangkan secara iteratif dengan mengutamakan integrasi terhadap infrastruktur SCADA yang sudah ada di PLN.

Analisis Kebutuhan Sistem

Tahapan awal dilakukan melalui observasi langsung terhadap proses rekapitulasi manual TOP serta wawancara dengan operator sistem pembebanan. Ditemukan bahwa proses pencatatan manual memerlukan waktu 2–3 jam setiap hari dengan risiko kesalahan *input* mencapai lebih dari 10%. Berdasarkan hasil tersebut, ditetapkan kebutuhan utama sistem, yaitu:

1. Pengumpulan data daya dan energi tersalur secara otomatis dari SCADA.
2. Visualisasi *real-time* performa pembangkit (NDC, CF, dan status operasi).
3. Penyimpanan data historis untuk keperluan audit dan pelaporan TOP.
4. Mekanisme keamanan dan autentikasi pengguna berbasis jaringan PLN (VPN ICON+).

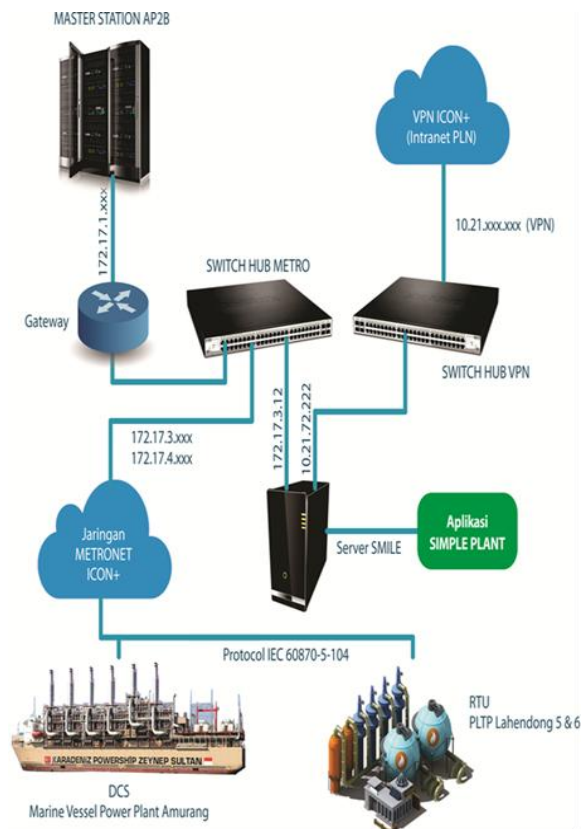
Perancangan Sistem

Simple Plant dirancang sebagai sistem berbasis web *client-server* yang menghubungkan data RTU/SCADA dengan antarmuka pengguna melalui *middleware HABConnect*. Komunikasi data dilakukan menggunakan protokol *IEC 60870-5-104*, standar internasional untuk sistem telemetri industri tenaga listrik.

Struktur sistem terdiri dari empat lapisan:

1. Lapisan data akuisisi menerima sinyal status dan daya dari RTU pembangkit.
2. Lapisan *middleware* menerjemahkan data SCADA ke format *database* MySQL.
3. Lapisan aplikasi web mengelola *logsheets*, grafik performa, dan laporan otomatis.
4. Lapisan pengguna, menyediakan akses berbasis hak otorisasi (*dispatcher, engineer, manajer*).

Sistem dikembangkan menggunakan kombinasi PHP, MySQL, dan *Apache Server*. Rata-rata interval pembacaan data ditetapkan setiap 30 detik, dengan perhitungan rerata tiap 30 menit untuk menghasilkan *logsheet* digital yang ekuivalen dengan laporan manual sebelumnya.



Gambar 2. Konfigurasi Jaringan *Simple Plant*

Implementasi dan Uji Coba

Sistem diuji pada koneksi langsung dengan SCADA AP2B melalui jaringan internal PLN. Proses implementasi meliputi instalasi *server*, konfigurasi *middleware*, serta sinkronisasi data antar pembangkit. Uji performa dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan *Capacity Factor* (CF) antara metode

manual dan hasil otomatis SIMPLE PLANT selama periode tiga bulan.

Parameter utama yang diukur meliputi:

- Waktu rekapitulasi (efisiensi operasional),
- Tingkat kesalahan *input*,
- Akurasi perhitungan CF, dan
- Keandalan komunikasi jaringan (*latency dan packet loss*).

Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu mempertahankan konektivitas data di atas 99% *uptime*, dengan *latency* rata-rata 1,2 detik dan *packet loss* di bawah 0,5%.

Tabel 1. Parameter Komunikasi Jaringan SCADA

Parameter	Satuan	Rata-rata	Standar Batas	Keterangan
Latency	ms	58	<100	Normal
Packet Loss	%	0,4	<1	Stabil
Availability	%	99,2	≥98	Sesuai standar IEC

Analisis Risiko dan Mitigasi

Evaluasi risiko dilakukan menggunakan pendekatan *Hazard Identification, Risk Assessment and Risk Control* (HIRARC). Tiga kategori risiko utama diidentifikasi, yaitu gangguan jaringan, kesalahan *input* operator, dan kehilangan data historis. Kontrol mitigasi diterapkan melalui validasi otomatis, redundansi jaringan, serta backup harian ke *server* lokal. Hasil penilaian menunjukkan seluruh risiko residu berada pada tingkat rendah setelah penerapan kontrol sesuai pada Tabel 3.

Hasil Kerja

Peningkatan Efisiensi Rekapitulasi Data

Sebelum penerapan *Simple Plant*, proses rekap data operasi pembangkit di AP2B Sistem Minahasa dilakukan secara manual dengan mengunduh data SCADA kemudian diolah dalam *spreadsheet* untuk setiap unit pembangkit. Proses ini rata-rata memerlukan waktu 2–3 jam setiap hari, bergantung pada kondisi sistem dan jumlah unit aktif. Setelah penerapan *Simple Plant*, waktu rekapitulasi berkurang drastis menjadi 20–25 menit, sehingga terjadi peningkatan efisiensi sebesar ±89%.

Selain waktu, *Simple Plant* juga menghilangkan tahapan ganda yang sebelumnya dilakukan oleh operator, seperti pencatatan manual, perhitungan *Capacity Factor*, dan verifikasi nilai TOP. Semua proses kini dilakukan secara otomatis oleh sistem berbasis algoritma perhitungan internal yang menggunakan data aktual dari SCADA.

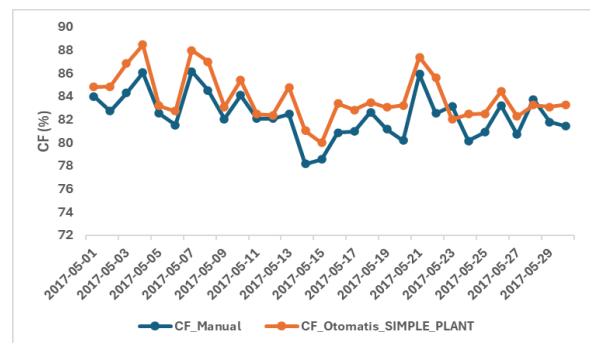
Tabel 2. Sebelum dan Sesudah Implementasi

Aspek	Sebelum	Sesudah	Peningkatan
Waktu Rekap Harian	3 jam	20 menit	89% lebih cepat
Akurasi Data CF	85%	98,3%	+13,3%
Frekuensi Kesalahan Input	12 kasus/bln	1 kasus/bln	~91%

Akurasi Perhitungan dan Dampak Finansial

Uji perbandingan dilakukan terhadap data aktual dari *Leasing Marine Vessel Power Plant (LMVPP) Amurang* dan beberapa IPP di bawah sistem Minahasa. Sebelum sistem diterapkan, selisih rata-rata perhitungan CF manual terhadap nilai aktual mencapai ±4–5%, sedangkan setelah penerapan SIMPLE PLANT, selisih tersebut turun menjadi <1%, dengan tingkat akurasi keseluruhan 98,3%.

Kasus yang menonjol terjadi pada 30 Maret 2017, dimana tercatat energi tak tersalur sebesar 30.171 kWh akibat keterlambatan deteksi gangguan unit LMVPP. Berdasarkan perhitungan dengan tarif investasi Rp702,12/kWh, potensi kerugian mencapai Rp21.183.662,52 per hari operasi. Dengan sistem *Simple Plant*, kondisi serupa kini dapat terdeteksi secara otomatis melalui indikator deviasi daya (*deviation detector*) sehingga tindakan korektif dapat dilakukan lebih cepat dan tepat.



Gambar 3. Perbandingan *Capacity Factor* (CF) Harian Metode Manual dan Otomatis

Integrasi SCADA dan Otomatisasi *Logsheet*

Simple Plant mengintegrasikan data dari sistem SCADA ke *database* MySQL menggunakan *middleware* *HABConnect*, yang menerjemahkan sinyal telemetri dari protokol IEC 60870-5-104 menjadi data numerik yang dapat diolah langsung. Data mentah (*real-time value*) dari tiap RTU diambil setiap 30 detik, kemudian diolah menjadi *average record* setiap 30 menit.

Proses ini menghasilkan *logsheet* digital otomatis yang berisi parameter daya mampu (NDC), daya aktual (MW), energi tersalur (MWh), dan status operasi unit. Operator hanya perlu melakukan validasi akhir sebelum data dikirim ke *server* pusat.

Selain itu, sistem dilengkapi fitur *auto-validation* untuk mendeteksi *suspect data*, seperti nilai nol berulang atau hilangnya sinyal RTU selama lebih dari 3 menit. Jika terdeteksi, sistem akan memberikan peringatan otomatis kepada *dispatcher* melalui notifikasi di *dashboard*.

Analisis Risiko Operasional

Analisis risiko dilakukan dengan mengidentifikasi potensi bahaya (*hazard*) pada tiga aspek utama, yaitu jaringan komunikasi, kesalahan manusia, dan keamanan data. Hasil identifikasi menunjukkan risiko

awal berada pada kategori tinggi untuk kemungkinan kehilangan data akibat gangguan intranet dan keterlambatan rekap manual. Setelah penerapan sistem

kontrol dan otomatisasi, semua risiko turun menjadi kategori rendah, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Analisis Risiko Terpadu *Simple Plant* Sebelum dan Sesudah Pengendalian

No	Risiko	Penyebab	Dampak (Inheren)	Tingkat Kemungkinan	Skala Dampak	Level Risiko Awal	Kontrol / Pengendalian yang Telah Ada	Tingkat Kemungkinan Setelah Kontrol	Skala Dampak Residual	Level Risiko Akhir	Program Mitigasi	Mekanisme Pemantauan
1	Gangguan jaringan intranet	Jaringan terputus atau sumber jaringan terganggu	Aplikasi tidak dapat diakses	Rendah	Signifikan	Tinggi	Monitoring lalu lintas data dan keandalan jaringan	Rendah	Minor	Rendah	Penggunaan <i>backup link</i> (VPN ICON+) dan redundansi koneksi	Pemeriksaan berkala jaringan intranet dan evaluasi gangguan
2	Kesalahan pada input data (daya mampu, base order, keterangan)	Kurang fokus operator saat pengisian	Data yang tersimpan salah	Rendah	Signifikan	Tinggi	Verifikasi data otomatis, <i>input validation</i> di form	Rendah	Minor	Rendah	Pelatihan operator dan pengecekan ulang data sensitif	Audit data mingguan dan <i>cross-check</i> otomatis
3	Data SCADA indikasi suspect	Gangguan komunikasi antara RTU dan server	Analisis dan evaluasi data tidak akurat	Rendah	Signifikan	Tinggi	Sistem mendeteksi otomatis dan memberi <i>flag</i> khusus pada <i>suspect data</i>	Rendah	Minor	Rendah	Peningkatan keandalan <i>backup supply</i> komunikasi	Pemeriksaan kemampuan <i>backup supply</i> tiap perangkat

Langkah mitigasi utama meliputi:

1. Redundansi jaringan menggunakan dua jalur komunikasi VPN ICON+.
2. *Backup* otomatis setiap 24 jam ke *server* lokal dan *cloud* PLN.
3. Validasi input otomatis untuk mencegah kesalahan entri manual.
4. Pengamanan akses dengan sistem login berbasis token dan enkripsi SSL.

Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan kontrol berbasis sistem mampu mengubah profil risiko dari *reactive* menjadi *proactive monitoring system*.

Manfaat Non-Finansial dan Penguatan Kompetensi Keinsinyuran

Selain peningkatan efisiensi dan akurasi, *Simple Plant* memberikan manfaat non-finansial yang signifikan. Pertama, sistem ini meningkatkan transparansi dan koordinasi antarunit PLN, karena data yang ditampilkan dapat diakses secara serentak oleh operator, supervisor, dan manajer. Kedua, *Simple Plant* memperkuat kompetensi keinsinyuran dalam bidang pengawasan sistem tenaga berbasis digital, karena mendorong penerapan *data-driven decision making* dalam pengoperasian pembangkit.

Selain itu, sistem ini juga menjadi model nyata penerapan prinsip *sustainable engineering* karena secara tidak langsung membantu penghematan energi melalui deteksi dini deviasi daya dan optimalisasi pengoperasian unit. Hal ini sejalan dengan komitmen PLN terhadap SDG 7 (*Affordable and Clean Energy*) dan SDG 9 (*Industry, Innovation and Infrastructure*).

MARINE VESSEL POWER PLANT AMURANG									
KONTRAKTOR MESIN BINA : MARINE VESSEL POWER PLANT AMURANG									
NOMOR KONTRAK : 1320 PUDAN.02.D/INDOR-INT02015									
AWALAN/ENDIAN TERAKHIR NOMOR : -									
PERIODE OPERASI : 12-04-2017 00:00									
sd									
12-04-2017 24:00									
JAM OPERASI	PERIODE (Waktu Operasi)	REKAPITULASI AKTUAL (Watt)	Watt Daya Pem-rata (Watt)	Target (Watt-80% NDC)	Energi < 60% NDC (Watt)	Energi Tidak Terukur (Watt)	KETERANGAN		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
00:00	24:00-00:00	100	66	65.830	32915	47968	32915	10273	Pemeriksaan PLN sesuai beban sistem, 4 unit sesuai unit SAG standby
01:00	00:00-01:00	100	66	65.342	32671	47968	32671	10317	Pemeriksaan PLN sesuai beban sistem, 4 unit sesuai unit SAG standby
01:30	01:00-01:30	100	66	66.066	33044	47968	33044	14044	Pemeriksaan PLN sesuai beban sistem, 4 unit sesuai unit SAG standby
02:00	01:30-02:00	100	66	65.828	32964	47968	32964	10224	Pemeriksaan PLN sesuai beban sistem, 4 unit sesuai unit SAG standby
02:30	02:00-02:30	100	66	65.795	32852.5	47968	32852.5	10135.5	Pemeriksaan PLN sesuai beban sistem, 4 unit sesuai unit SAG standby
03:00	02:30-03:00	100	67	66.161	33051.5	47968	33051.5	14038.5	Pemeriksaan PLN sesuai beban sistem, 4 unit

Gambar 4. Tampilan Dashboard Real-Time *Simple Plant*

Kesimpulan

Penerapan sistem SIMPLE PLANT (*Sistem Informasi Monitoring Pengoperasian Leasing Marine Vessel Power Plant dan Independent Power Producer*) di PT PLN (Persero) AP2B Sistem Minahasa berhasil meningkatkan efisiensi, akurasi, dan transparansi dalam proses perhitungan *Take or Pay (TOP)* antara PLN dan mitra IPP. Sistem ini mampu mengintegrasikan data SCADA berbasis protokol IEC 60870-5-104 ke dalam platform berbasis web yang menampilkan data daya mampu, energi tersalur, dan status operasi pembangkit secara *real-time*.

Hasil implementasi menunjukkan peningkatan efisiensi waktu rekap hingga 89%, penurunan kesalahan input sebesar 91%, serta akurasi perhitungan *Capacity Factor* (CF) mencapai 98,3%. Selain itu, sistem mampu menekan potensi kerugian finansial hingga Rp21,18 juta per hari operasi dengan mempercepat deteksi deviasi daya. Dari sisi operasional, penerapan kontrol otomatis dan redundansi jaringan berhasil menurunkan seluruh risiko residu ke tingkat rendah, menunjukkan bahwa sistem ini andal dalam menjaga kontinuitas data dan keandalan jaringan.

Dampak non-finansial yang dicapai antara lain peningkatan transparansi data antar-unit PLN, kemudahan akses melalui jaringan VPN ICON+, serta peningkatan kompetensi keinsinyuran dalam bidang digitalisasi sistem tenaga listrik. *Simple Plant* tidak hanya menjadi inovasi teknis, tetapi juga tonggak transformasi menuju *smart operation system* yang sejalan dengan agenda Transformasi Digital PLN dan mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDG) 7 dan SDG 9.

Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar sistem ini direplikasi di seluruh unit AP2B di Indonesia, diintegrasikan dengan *dashboard* SCADA nasional, dan dikembangkan dengan algoritma *predictive analytics* berbasis kecerdasan buatan untuk mendukung strategi *predictive maintenance* di masa depan.

Referensi

- Ahsan, L., Baig, M. J. A., & Iqbal, M. T. (2022). Low-cost, open-source, Emoncms-based SCADA system for a large grid-connected PV system. *Sensors*, 22(18), Article 6733. <https://doi.org/10.3390/s22186733>
- ASEAN Centre for Energy. (2025). *Policy insight: Indonesia—Guidelines on power purchase agreement from renewable energy sources (MEMR Regulation No. 5/2025)*.
- Bernarto, B. (2017). *Indonesian energy regulation update – August 2017*. Norton Rose Fulbright.
- Eltamaly, A. M., Ahmed, M. A., Alotaibi, M. A., Alolah, A. I., & Kim, Y.-C. (2020). Performance of communication network for monitoring utility-scale photovoltaic power plants. *Energies*, 13(21), 5527. <https://doi.org/10.3390/en13215527>
- Massaro, A., & Starace, G. (2022). Advanced and complex energy systems monitoring and control: A review on available technologies and their application criteria. *Sensors*, 22(13), Article 4929. <https://doi.org/10.3390/s22134929>
- Moreno-Garcia, I. M., Palacios-Garcia, E. J., Pallares-Lopez, V., Santiago, I., Gonzalez-Redondo, M. J., Varo-Martinez, M., & Real-Calvo, R. J. (2016). Real-time monitoring system for a utility-scale photovoltaic power plant. *Sensors*, 16(6), 770. <https://doi.org/10.3390/s16060770>
- Prihantoro, J., Taufiqurrohman, H., Suyanto, S., Cahyadi, C., Larasati, A., & Nurrohm, A. (2022). Implementation SCADA web client for monitoring geothermal power plant 3 MW Kamojang – Indonesia. *Proceedings of ICE3IS*. <https://doi.org/10.1109/ICE3IS56585.2022.10010311>
- PwC. (2018). *Power in Indonesia: Investment and taxation guide*.
- Radoglou-Grammatikis, P., Sarigiannidis, P., Giannoulakis, I., Kafetzakis, E., & Panaousis, E. (2019). *Attacking IEC-60870-5-104 SCADA systems*. University of Western Macedonia; Eight Bells Ltd; University of Surrey.
- IEEFA. (2024). *Unlocking Indonesia's renewable energy investment potential*.
- Zhang, J. (2011). *Secure multicast for power grid communications*.



Peran ISO 9001 dan ISO 27001 dalam Meningkatkan *Customer Satisfaction & Trust* di Perusahaan IT PT XYZ

Stephani Larissa¹ Adriana Anteng
Anggorowati¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ stephanilarissa3@gmail.com

✉ adrianaanteng@ukwms.ac.id

Sustainable Development Goals (SDG's) berisi 17 tujuan untuk mencapai pembangunan berkelanjutan hingga tahun 2030. Dalam konteks industri teknologi informasi, SDG's berperan sebagai pedoman strategis bagi perusahaan untuk mengintegrasikan prinsip keberlanjutan, efisiensi, serta keamanan dalam tata kelola bisnis. Khususnya, SDG poin ke-9: *Industry, Innovation, and Infrastructure* menekankan pembangunan industri yang inklusif, inovatif, dan berdaya tahan terhadap risiko teknologi global. Penerapan ISO 9001 dan ISO 27001 menjadi langkah konkret untuk mendukung tujuan tersebut melalui peningkatan mutu layanan, efisiensi proses, serta perlindungan keamanan informasi. Studi kasus ini menganalisis bagaimana penerapan ISO 9001 dan ISO 27001 berkontribusi terhadap peningkatan *customer satisfaction* dan *customer trust* pada PT XYZ. Penelitian ini bertujuan menggali persepsi tim sales terhadap dampak sertifikasi dalam interaksi dengan klien, menganalisis penerjemahan standar ISO dalam praktik komunikasi dan negosiasi, hingga mengidentifikasi faktor penguat serta hambatan implementasi. Metode yang digunakan adalah pendekatan kualitatif interpretatif dan analisis kuantitatif deskriptif menggunakan skala likert untuk memperkuat temuan empiris. Penerapan ISO 9001 dan ISO 27001 di PT XYZ terbukti berkontribusi positif terhadap peningkatan mutu layanan, keamanan informasi, serta pembentukan kepuasan dan kepercayaan klien. Namun, efektivitasnya masih perlu diperkuat melalui edukasi dan komunikasi nilai ISO agar manfaatnya lebih dipahami oleh klien.

Kata kunci: ISO 9001, ISO 27001, Kepuasan Klien, Kepercayaan Klien, Keamanan Informasi

Pendahuluan

Sustainable Development Goals (SDG's) merupakan agenda pembangunan global yang disusun oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) pada tahun 2015, terdiri atas 17 tujuan utama yang menjadi pedoman bagi seluruh sektor industri dalam mencapai pembangunan berkelanjutan hingga tahun 2030. SDG nomor 9: *Industry, Innovation, and Infrastructure* menekankan pentingnya industrialisasi yang inklusif dan berkelanjutan, penguatan kapasitas inovasi, serta pembangunan infrastruktur yang andal dan tangguh. Dalam konteks industri teknologi informasi, hal ini menjadi kewajiban untuk memastikan sistem dan manajemen informasi yang aman, efisien, serta mendukung keberlanjutan ekonomi digital.

Di tengah meningkatnya ketergantungan terhadap teknologi, kepercayaan klien tidak hanya ditentukan oleh kualitas produk atau layanan yang diberikan, tetapi juga oleh jaminan mutu dan keamanan informasi yang dikelola dengan baik. Kasus penurunan kualitas layanan dan kebocoran data menjadi ancaman serius bagi reputasi perusahaan, sehingga penerapan standar manajemen internasional menjadi kebutuhan strategis untuk memastikan keandalan sistem dan kredibilitas perusahaan di mata klien.

Dalam konteks tersebut, ISO 9001 dan ISO 27001 berperan penting sebagai fondasi penguatan tata kelola

organisasi. ISO 9001 berfokus pada sistem manajemen mutu yang menekankan kepuasan klien melalui peningkatan kualitas proses, keterlibatan personel, dan perbaikan berkelanjutan. Sementara itu, ISO 27001 menitikberatkan pada sistem manajemen keamanan informasi yang melindungi kerahasiaan, integritas, serta ketersediaan data. Bagi perusahaan IT, kedua standar ini saling melengkapi: ISO 9001 memastikan mutu layanan yang konsisten, sedangkan ISO 27001 menjamin keamanan data yang menjadi inti bisnis digital.

Penerapan simultan kedua standar tersebut bukan hanya memperkuat sistem internal perusahaan, tetapi juga menjadi sinyal kepercayaan kepada klien bahwa perusahaan berkomitmen terhadap kualitas dan keamanan informasi. Namun, efektivitas sertifikasi tersebut bergantung pada sejauh mana implementasi nyata dilakukan dalam praktik operasional sehari-hari.

Definisi ISO 9001

ISO 9001 merupakan standar internasional yang berfokus pada sistem manajemen mutu yang menekankan pengelolaan kualitas melalui identifikasi risiko, pengendalian proses, dan perbaikan berkelanjutan (Amelia, 2024). Penerapannya memberikan keunggulan kompetitif bagi perusahaan dengan memastikan mutu produk dan layanan sekaligus memperkuat hubungan dengan klien (Adela, 2024).

Definisi ISO 27001

ISO 27001 merupakan standar internasional yang berfokus pada manajemen risiko untuk memastikan keamanan informasi melalui prinsip kerahasiaan, integritas, dan ketersediaan data (Shammugam et al., 2021). Standar ini membantu organisasi memilih langkah perlindungan yang tepat serta membangun kepercayaan pemangku kepentingan melalui sistem keamanan informasi yang terstruktur. Penerapannya tidak hanya mencegah risiko keamanan, tetapi juga meningkatkan persepsi positif dan kepercayaan konsumen, khususnya di sektor keuangan digital, sehingga mendorong loyalitas dan keberlanjutan hubungan pengguna dengan penyedia layanan (Pia, 2025).

Customer Satisfaction

Menurut Ariono dan Suhardi (2022), kepuasan klien merupakan respon emosional berupa rasa senang atau kecewa atas perbandingan antara harapan dan hasil yang diterima. Kepuasan menjadi faktor utama dalam membangun loyalitas, karena mencerminkan sejauh mana produk atau layanan memenuhi ekspektasi (Desri et al., 2024). Terpuhinya kepuasan klien menciptakan hubungan harmonis, mendorong rekomendasi positif, serta meningkatkan minat klien untuk menggunakan layanan perusahaan (Sasongko, 2021).

Customer Trust

Kepercayaan klien merupakan dasar dalam membangun dan mempertahankan hubungan antara konsumen dan penyedia layanan (Palandi et al., 2022). Kepercayaan mencerminkan persepsi konsumen terhadap kemampuan perusahaan dalam memberikan layanan yang andal dan memenuhi harapan (Cahyono & Fahmi, 2022). Selain itu, kepercayaan mencakup pemahaman dan keyakinan konsumen terhadap keputusan, produk, dan manfaat yang ditawarkan sesuai kebutuhan mereka (Suwono & Sukma, 2020).

Berdasarkan latar belakang tersebut, proyek ini dilakukan untuk menganalisis penerapan ISO 9001 dan ISO 27001 pada PT XYZ, khususnya dalam kaitannya dengan peningkatan *customer satisfaction* dan *customer trust*. Studi ini bertujuan untuk mengidentifikasi bagaimana sertifikasi internasional dapat berfungsi sebagai instrumen strategis dalam memperkuat mutu layanan, keamanan informasi, serta reputasi perusahaan IT di era digital.

Metode

Data dianalisis dengan menggunakan pendekatan kualitatif interpretatif yang dipadukan dengan analisis kuantitatif deskriptif melalui penggunaan skala Likert untuk memperkuat temuan empiris. Proses analisis dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Reduksi data, yaitu menyeleksi dan menyaring informasi penting yang diperoleh dari hasil wawancara, observasi, dan dokumentasi yang relevan dengan tujuan penelitian.
2. Kategorisasi, yakni mengelompokkan temuan berdasarkan tema utama seperti peran sertifikasi dalam komunikasi sales, respons klien terhadap keamanan informasi, serta faktor pendukung dan penghambat implementasi.
3. Analisis tematik, dilakukan untuk mengidentifikasi pola, kecenderungan, dan makna yang muncul dari data kualitatif sehingga diperoleh pemahaman kritis

mengenai hubungan antara penerapan ISO 9001 dan ISO 27001 dengan tingkat kepuasan dan kepercayaan klien.

4. Analisis kuantitatif deskriptif, yaitu mengolah data hasil pengukuran skala Likert dalam bentuk skor rata-rata untuk menggambarkan kecenderungan persepsi responden secara numerik terhadap setiap tema penelitian.
5. Triangulasi sumber, dilakukan dengan membandingkan hasil wawancara, observasi, serta dokumentasi guna memastikan konsistensi, validitas, dan keabsahan data yang diperoleh.

Hasil Kerja

Persepsi Tim Sales terhadap Dampak Sertifikasi ISO

Analisis ini bertujuan untuk memahami bagaimana tim sales PT XYZ memaknai penerapan sertifikasi ISO 9001 dan ISO 27001 dalam konteks interaksi dengan klien, khususnya dalam membangun kepuasan (*customer satisfaction*) dan kepercayaan (*customer trust*). Data penelitian ini dikumpulkan melalui instrumen kuesioner menggunakan skala Likert yang disusun berdasarkan empat tema utama hasil kategorisasi konseptual. Untuk memperjelas arah analisis, Tabel 1 berikut menyajikan deskripsi makna analitis dari masing-masing tema utama yang menjadi dasar dalam proses interpretasi data.

Tabel 1. Empat Tema Utama Dalam Persepsi Sales

Tema Analisis	Makna
1. Kredibilitas dan Kepercayaan klien	Menilai sejauh mana ISO meningkatkan persepsi profesionalisme dan rasa aman klien.
2. Nilai Strategis ISO dalam Penjualan	Mengidentifikasi pandangan sales terhadap ISO sebagai alat strategi pemasaran dan diferensiasi kompetitif.
3. Konsistensi dan Kualitas Komunikasi	Mengevaluasi apakah ISO mendorong keseragaman pesan dan kejelasan dalam interaksi dengan klien.
4. Dukungan dan Kapasitas Internal Sales	Mengukur bagaimana dukungan organisasi dan pelatihan ISO membantu tim sales dalam praktik komunikasi bisnis.

Berdasarkan Gambar 1, terlihat bahwa persepsi tim sales terhadap dampak sertifikasi ISO menunjukkan variasi tingkat pengaruh pada empat tema utama yang dianalisis.

Rata-Rata Skor Likert Persepsi Sales Mengenai Dampak Sertifikasi ISO Terhadap Interaksi Dengan Klien



Gambar 1. Hasil Rata-Rata Skor Likert Persepsi Sales

Penerapan ISO 9001 dan ISO 27001 di PT XYZ telah memberikan dampak positif terhadap persepsi sales, dengan tingkat konsistensi yang tinggi antar tema. Skor tertinggi pada aspek dukungan dan kapasitas internal mencerminkan efektivitas penerapan sistem manajemen mutu dan keamanan informasi dalam memperkuat kesiapan organisasi. Namun, skor yang lebih rendah pada kredibilitas dan kepercayaan klien mengindikasikan adanya kesenjangan antara pencapaian sertifikasi dan persepsi nyata klien terhadap keandalan perusahaan. Hal ini menunjukkan bahwa sertifikasi belum sepenuhnya diterjemahkan menjadi bukti nyata yang dirasakan klien. Dengan demikian, PT XYZ perlu memperkuat komunikasi nilai ISO dalam presentasi dan materi promosi dengan menonjolkan dampak langsung terhadap kualitas layanan dan keamanan informasi. Melakukan evaluasi rutin terhadap persepsi klien, misalnya melalui survei pasca proyek untuk memantau efektivitas komunikasi dan penerapan nilai mutu di mata klien.

Praktik Penerjemahan ISO dalam Interaksi Sehari-hari

Dalam konteks ini, tim sales berperan sebagai penghubung utama antara perusahaan dan calon klien, sehingga kemampuan mereka dalam menerjemahkan nilai-nilai mutu (ISO 9001) serta prinsip keamanan informasi (ISO 27001) ke dalam bahasa bisnis menjadi elemen strategis dalam membangun kepercayaan dan kepuasan klien.

Untuk memperjelas alur kerja, Tabel 2 menyajikan aktivitas utama tim sales beserta relevansi penerapan standar ISO terhadap aspek mutu layanan dan keamanan informasi.

Tabel 2. Penerapan Prinsip ISO dalam Alur Kerja Tim Sales

Proses Sales	Keterkaitan dengan ISO 9001	Keterkaitan dengan ISO 27001
1. Penerimaan Requirement	Prinsip <i>Customer Focus</i> dan <i>Evidence-Based Decision Making</i> memastikan kebutuhan klien teridentifikasi secara akurat.	Kerahasiaan informasi dijaga melalui kontrol akses dan sistem penyimpanan aman.
2. Presentasi & Demo Produk	Prinsip <i>Leadership</i> dan <i>Engagement of People</i> , menunjukkan komitmen mutu perusahaan dan membangun kepercayaan melalui komunikasi yang profesional.	Menjamin perlindungan data tanpa mengekspos informasi sensitif klien selama demo.
3. Pengiriman Proposal Harga	Prinsip <i>Process Approach</i> dan <i>Relationship Management</i> dengan menjaga konsistensi format proposal serta membangun hubungan transparan dengan klien.	Mengklasifikasikan dokumen proposal sesuai tingkat sensitivitas dan membatasi akses internal.
4. Negosiasi	Prinsip <i>Improvement</i> dan <i>Customer Focus</i> ,	Menjaga kerahasiaan data negosiasi melalui

	memanfaatkan umpan balik klien untuk menyesuaikan penawaran dan meningkatkan kepuasan melalui solusi yang relevan dan responsif.	prosedur penanganan informasi yang tepat.
5. Persetujuan Kontrak	Prinsip <i>Evidence-Based Decision Making</i> dan <i>Leadership</i> , keputusan kerjasama dibuat berdasarkan data yang sah untuk menjamin keandalan mutu dan profesionalisme.	Perlindungan data kontraktual sesuai kebijakan <i>Information Security Management System</i> (ISMS).
6. After Sales Service	Prinsip <i>Customer Focus</i> dan <i>Improvement</i> , memastikan pemantauan kepuasan klien dan penerapan tindak lanjut perbaikan terhadap kualitas layanan.	Memastikan keamanan data selama layanan purna jual.

Faktor Penguat dan Penghambat Pemanfaatan ISO

Berdasarkan hasil pengumpulan dan analisis data, berikut disajikan Tabel 3 yang memaparkan faktor-faktor penguat dan penghambat pemanfaatan ISO 9001 dan ISO 27001 dari perspektif tim sales PT XYZ. Tabel ini disusun berdasarkan hasil wawancara mendalam, observasi lapangan, dan penelaahan dokumen pendukung.

Tabel 3 Faktor Penguat dan Penghambat Pemanfaatan ISO

Kategori	Faktor	Penjelasan
Penguat	Peningkatan kredibilitas perusahaan di mata klien	Sertifikasi ISO memperkuat argumen tim sales saat menjelaskan komitmen perusahaan terhadap mutu dan keamanan informasi.
Penguat	Konsistensi dokumen dan prosedur penawaran	Template proposal dan SOP berbasis ISO membantu sales menjaga keseragaman informasi, mengurangi kesalahan komunikasi, dan mempercepat proses negosiasi.

Penguat	Dukungan dari tim teknis internal	Sales merasa lebih percaya diri karena mendapat <i>back-up</i> teknis dalam menjawab pertanyaan terkait kontrol keamanan data.
Penguat	Meningkatnya profesionalisme dan disiplin kerja	ISO mendorong sales untuk bekerja lebih terstruktur mulai dari pencatatan kebutuhan klien, validasi dokumen, hingga tindak lanjut purna jual.
Penguat	Materi presentasi yang lebih terukur dan meyakinkan	Penerapan ISO menghasilkan data pendukung yang kuat (misal SLA dan sertifikat valid) sehingga meningkatkan kualitas komunikasi persuasif.
Penghambat	Belum adanya sistem evaluasi dampak ISO terhadap kepuasan klien	Tidak ada indikator yang mengukur pengaruh ISO terhadap loyalitas dan <i>trust</i> klien, sehingga manfaatnya sulit diukur secara objektif.
Penghambat	Keterbatasan waktu untuk memperbarui dokumen ISO	Tingginya beban target dan fokus tim sales pada pencapaian penjualan menyebabkan prioritas terhadap pembaruan dokumen ISO menjadi rendah.
Penghambat	Kompleksitas proses kepatuhan ISO terhadap efisiensi penjualan	Pemenuhan prosedur ISO menyerap waktu dan sumber daya besar. Hal ini memperlambat penyusunan penawaran harga dan menurunkan kecepatan respons tim sales terhadap kebutuhan klien.

Penghambat	Keterbatasan waktu dan Sumber Daya	Implementasi ISO membutuhkan koordinasi lintas divisi, laporan berkala, dan audit internal yang menyita waktu. Beban administratif tambahan sering kali memperpanjang siklus penjualan dan menurunkan produktivitas tim.
Penghambat	Persepsi klien terhadap sertifikasi	Sebagian klien belum memahami nilai strategis ISO sehingga menjadi tantangan untuk mengedukasi klien bahwa sertifikasi bukan sekadar formalitas, melainkan bentuk jaminan atas mutu proses dan keamanan data.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa penerapan ISO 9001 dan ISO 27001 pada PT XYZ telah memberikan dampak positif terhadap peningkatan mutu interaksi antara tim sales dan klien. Tim sales merasakan dukungan internal yang kuat serta mampu memanfaatkan standar ISO dalam memperjelas komunikasi dan menjawab pertanyaan kritis klien terkait mutu dan keamanan data, meskipun aspek kredibilitas dan penerjemahan nilai ISO dalam proses penjualan masih perlu diperkuat. Oleh karena itu, perusahaan perlu memperkuat komunikasi nilai strategis ISO melalui pelatihan lanjutan bagi tim sales serta penyediaan bukti operasional penerapan standar mutu dan keamanan informasi, agar sertifikasi ISO tidak hanya menjadi bentuk kepatuhan administratif, tetapi juga menjadi instrumen efektif dalam membangun kepercayaan pelanggan dan meningkatkan daya saing perusahaan secara berkelanjutan.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang berkontribusi dan berperan langsung pada penelitian ini diantaranya:

Ir. Dra. Adriana Anteng Anggorowati, M.Si., IPU., ASEAN Eng, yang telah membimbing, memberikan arahan, serta masukan yang konstruktif selama proses penulisan artikel ini.

Segenap narasumber dari PT XYZ yang telah berpartisipasi dalam wawancara serta memberikan data dan informasi berharga yang menjadi dasar analisis dalam penelitian ini.



Referensi

- Ariono, J., & Suhardi, S. (2022). *Pengaruh kualitas pelayanan, kepercayaan, dan kepuasan pelanggan terhadap loyalitas pelanggan pada PT Lubricant Indo Makmur*. *Scientia Journal: Jurnal Ilmiah Mahasiswa*, 5(1), 1–9.
- Cahyono, N. E., & Fahmi, S. (2022). *Pengaruh kualitas produk dan kepercayaan terhadap kepuasan konsumen dalam membentuk loyalitas konsumen (Pengguna platform aplikasi marketplace di Kota Malang)*. *JEMBA: Jurnal Ekonomi, Manajemen, Bisnis dan Akuntansi*, 1(4), 503–516. <https://doi.org/10.53625/jemba.v1i4.2605>
- Dewi, A. A. K., & Kusumasari, I. R. (2024). Analisis sistem manajemen mutu ISO 9001:2015 pada proses bisnis dan pemenuhan kepuasan klien PT Inka Multi Solusi. *Muqaddimah: Jurnal Ekonomi, Manajemen, Akuntansi dan Bisnis*, 2(2), 244–253. <https://doi.org/10.59246/muqaddimah.v2i2.767>
- Desri, S., Fitriandi, F., Yollanda, F., & Zulfritri, V. (2024). Pengaruh kualitas pelayanan, kepercayaan, dan kepuasan klien terhadap loyalitas klien JNE di Kota Payakumbuh. *Innovative: Journal of Social Science Research*, 4(1), 342–348.
- Lestari, P. S., Tambunan, F. Z., Nasution, A. W., Manurung, M. A., Ropika, R., Panjaitan, C. L. P., & Sinaga, D. S. (2025). Implementasi ISO 27001 dalam meningkatkan kepercayaan pengguna dalam sektor industri. *Jurnal Pengabdian Masyarakat dan Riset Pendidikan*, 4(1), 1152–1167. <https://doi.org/10.31004/jerkin.v4i1.1565>
- Meiyanti, D. A. Y., & Setyowati, L. (2023). Pengaruh penerapan ISO 9001 terhadap kepuasan klien di perusahaan jasa. *Jurnal Manajemen Mutu*, 5(2), 120–134.
- Muiz, A. N., Maulidia, R., & Nurazizah, N. (2024). *Peran International Organization for Standardization (ISO) dalam meningkatkan pemasaran global perusahaan*. *JUEB: Jurnal Ekonomi dan Bisnis*, 3(2), 20–27. <https://doi.org/10.57218/jueb.v4i1.1072>
- Palandi, J. J., Mangantar, M., & Raintung, M. C. (2022). Pengaruh kualitas jasa, kepercayaan, dan kepuasan nasabah terhadap loyalitas nasabah PT Pegadaian di Manado. *Jurnal EMBA*, 10(4), 565–576.
- Sasongko, S. R. (2021). *Faktor-faktor kepuasan pelanggan dan loyalitas pelanggan (literature review manajemen pemasaran)*. *Jurnal Ilmu Manajemen Terapan*, 3(1), 104–114.
- Shammugam, I., Samy, G. N., Magalingam, P., Maarop, N., Perumal, S., & Shanmugam, B. (2021). Information security threats encountered by Malaysian public sector data centers. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 21(3), 1820–1829.
- Sholeha, A., Sari, M., Cintia, B., Sajidah, A., & Ningtyas, F. A. (2024). Pengaruh penerapan ISO 9001 dan kualitas produk pada keputusan pembelian. *Anggaran: Jurnal Publikasi Ekonomi dan Akuntansi*, 2(4), 427–439. <https://doi.org/10.61132/anggaran.v2i4.1053>
- Suwono, S., & Sukma, A. (2020). Pengaruh kepercayaan dan kepuasan terhadap loyalitas nasabah di PT BPRS Suriyah Kantor Pusat Cilacap. *AmaNU: Jurnal Manajemen dan Ekonomi*, 3(1), 33–54.
- Tjiptono, F. (2014). *Pemasaran jasa: Prinsip, penerapan, dan penelitian*. Yogyakarta: ANDI.
- United Nations Development Programme. (2015). *The sustainable development goals (SDGs)*. <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>



Pembuatan Desain Set Alat *Screw Conveyor Refill* *Hopper Resin* pada Salah Satu *Line Produksi*

Patrick Armando¹ Suryadi Ismadji¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya
Mandala Surabaya

✉ patrickarmando@ymail.com

✉ suryadiismadji@yahoo.com

Dalam proses produksi *masterbatch*, kelancaran suplai resin ke *feeder* berpengaruh besar terhadap kontinuitas dan efisiensi produksi. Di salah satu *line* produksi PT Dunia Kimia Jaya Plant Cibitung, lamanya waktu *refill* resin menyebabkan ketidakseimbangan suplai material dan penurunan produktivitas. Untuk mengatasi hal ini, dilakukan perancangan ulang sistem *screw conveyor refill hopper resin* dengan memodifikasi rasio *gear* motor penggerak agar kecepatan *screw* meningkat tanpa mengubah struktur utama alat. Metode yang digunakan mencakup pengamatan kondisi aktual, perhitungan kapasitas perpindahan material, dan pengujian performa alat hasil modifikasi. Hasilnya menunjukkan peningkatan laju aliran resin hingga 593%, pengurangan waktu *refill* sekitar 50%, serta penurunan *downtime feeder* secara signifikan. Selain meningkatkan efisiensi operasional, perbaikan ini menghasilkan *potential saving* lebih dari Rp 300 juta per bulan dan mendukung penerapan prinsip *sustainable manufacturing* yang selaras dengan *SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure)* dan *SDG 12 (Responsible Consumption and Production)*.

Kata kunci: Profesionalisme, Etika Profesi Insinyur, K3L, SDG

Pendahuluan

Dalam proses produksi *masterbatch*, kelancaran suplai bahan baku ke *feeder* sangat berpengaruh terhadap kontinuitas produksi dan stabilitas kualitas produk akhir. Salah satu material utama yang digunakan adalah **resin**, yang berfungsi sebagai matriks pembawa (*carrier*) dalam campuran *masterbatch*. Pada salah satu *line* produksi di PT Dunia Kimia Jaya *Plant* Cibitung, ditemukan permasalahan berupa **waktu *refill* material resin ke *hopper* yang relatif lama**, sehingga menyebabkan ketidakseimbangan antara kecepatan konsumsi material di *feeder* dengan kecepatan suplai dari sistem *refill*. Kondisi ini sering mengakibatkan penurunan efisiensi, *downtime* ringan, dan keterlambatan pencapaian target produksi harian.

Untuk mengatasi hal tersebut, dilakukan **pembuatan desain set alat *screw conveyor refill hopper resin*** dengan tujuan mempercepat proses transfer material dari *hopper refill* ke *feeder* resin. Salah satu pendekatan teknis yang digunakan adalah **perubahan rasio *gear* pada motor penggerak *screw conveyor***, sehingga putaran *screw* meningkat dan laju aliran resin menjadi lebih cepat tanpa mengubah struktur utama sistem. Perancangan ini mempertimbangkan aspek teknis seperti kapasitas perpindahan material, torsi motor, dan stabilitas kecepatan aliran material agar sistem dapat bekerja optimal tanpa menyebabkan keausan berlebih atau getaran mekanis. Upaya ini juga sejalan dengan konsep keberlanjutan industri (*industrial sustainability*), di mana peningkatan efisiensi sistem produksi berkontribusi langsung terhadap pengurangan konsumsi energi, minimisasi waktu henti mesin, dan optimalisasi sumber daya.

Dengan mempercepat aliran material dan menjaga stabilitas proses, rancangan ini mendukung tercapainya Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDG), khususnya *SDG 9 – Industry, Innovation, and Infrastructure*, serta *SDG 12 – Responsible Consumption and Production*. Melalui inovasi

teknis yang sederhana namun berdampak signifikan ini, sistem produksi dapat beroperasi lebih efisien, hemat energi, dan berkelanjutan. Sejumlah penelitian dan studi terdahulu juga menunjukkan bahwa **pengaturan rasio transmisi dan kecepatan *screw conveyor*** memiliki pengaruh signifikan terhadap kapasitas alir material granular maupun pellet (Zareiforoush et al., 2010; Srivastava & Singh, 2013). Dengan demikian, rancangan ini tidak hanya bertujuan sebagai solusi teknis atas permasalahan waktu *refill* yang lambat, tetapi juga menjadi penerapan nyata dari prinsip **rekayasa keandalan dan efisiensi mekanis dalam proses manufaktur**.

Landasan Teori / Kajian Pustaka

Screw conveyor merupakan salah satu sistem *bulk handling* yang banyak digunakan di industri untuk memindahkan material padat berbentuk granular atau pellet secara horizontal maupun miring menggunakan elemen berputar berbentuk ulir (*screw*) di dalam pipa atau *trough* (Srivastava & Singh, 2013). Kinerja *screw conveyor* dipengaruhi oleh beberapa parameter utama, seperti kecepatan putar *screw* (*rotational speed*), diameter *screw*, *pitch* ulir, dan kemiringan sudut *conveyor*, yang secara langsung memengaruhi laju alir material (Zareiforoush et al., 2010). Secara umum, kapasitas aliran material pada *screw conveyor* dapat ditentukan menggunakan rumus dasar (Henderson & Perry, 2019).

$$Q = 60 \times \rho \times A \times v$$

di mana:

Q : kapasitas aliran (kg/menit)

ρ : massa jenis material (kg/m³),

A : luas penampang efektif (m²), dan

V : kecepatan linier material (m/menit)

Dengan demikian, peningkatan kecepatan putar *screw* (melalui modifikasi rasio *gear*) akan meningkatkan kapasitas

aliran material hingga batas tertentu sebelum terjadi fenomena *slip* atau *backflow*.

Dalam sistem mekanik, rasio *gear* memiliki peran penting dalam mengatur keseimbangan antara kecepatan putar dan torsi motor. Menurut Khurmi dan Gupta (2005), perubahan rasio *gear* yang memperbesar kecepatan keluaran akan menurunkan torsi yang diteruskan ke sistem, sehingga perancangan harus mempertimbangkan kemampuan daya motor dan beban gesek material di sepanjang *screw*. Oleh karena itu, desain *screw conveyor* yang efisien harus memastikan kecepatan putar cukup tinggi untuk meningkatkan *throughput*, tanpa mengorbankan stabilitas mekanis dan daya tahan komponen.

Dari perspektif rekayasa berkelanjutan (*sustainable engineering*), peningkatan efisiensi sistem mekanik seperti *screw conveyor* juga berkaitan dengan efisiensi energi dan optimalisasi sumber daya. Sistem mekanis yang mampu memindahkan material lebih cepat dengan energi yang sama dapat mengurangi *idle time*, meningkatkan produktivitas, serta menurunkan konsumsi energi per unit produksi (UNIDO, 2020). Prinsip ini sejalan dengan *Sustainable Development Goals (SDG) 9 – Industry, Innovation, and Infrastructure* dan *SDG 12 – Responsible Consumption and Production*, yang mendorong penerapan inovasi teknologi untuk mendukung industri berkelanjutan dengan penggunaan energi dan sumber daya yang lebih efisien (United Nations, 2015).

Dengan demikian, teori dasar mengenai transmisi mekanis, kapasitas alir *screw conveyor*, serta prinsip efisiensi energi menjadi landasan utama dalam perancangan sistem *screw conveyor refill hopper* resin di PT Dunia Kimia Jaya. Penerapan modifikasi rasio *gear* dalam penelitian ini merupakan wujud konkret dari penerapan prinsip rekayasa efisien dan inovatif yang mendukung produktivitas sekaligus keberlanjutan industri.

Metode

1. Observasi dan Pengumpulan Data Lapangan

Melakukan pengamatan langsung terhadap sistem *screw conveyor existing* untuk memperoleh data mengenai kapasitas alir, kecepatan putaran *screw*, waktu *refill* aktual, serta rasio *gear* pada motor penggerak. Data ini menjadi dasar analisis performa sistem sebelum dilakukan perbaikan.

2. Analisis Teknis dan Perancangan Ulang Sistem

Melakukan perhitungan teknis terhadap kebutuhan laju alir resin dan torsi motor berdasarkan volume *hopper* serta kebutuhan waktu *refill* yang diharapkan. Berdasarkan hasil analisis, dilakukan modifikasi rasio *gear* agar *screw conveyor* dapat berputar lebih cepat, meningkatkan debit material tanpa mengorbankan stabilitas operasional.

3. Pembuatan dan Implementasi Desain Baru

Melakukan pembuatan set alat hasil desain yang telah disesuaikan, kemudian dipasang pada *line* produksi. Tahap ini mencakup penyesuaian posisi mekanik, *alignment* motor dan *screw*, serta verifikasi kestabilan sistem selama operasi awal.

4. Pengujian dan Evaluasi Kinerja

Mengukur dan membandingkan waktu *refill* resin, kecepatan *screw*, serta konsumsi daya motor antara sistem sebelum dan sesudah modifikasi. Hasil pengujian

dianalisis untuk menilai tingkat efisiensi dan keberhasilan solusi yang diterapkan

Hasil Kerja

Data *Refill Time* dan RPM *Screw Convey* Sebelum *Improvement*

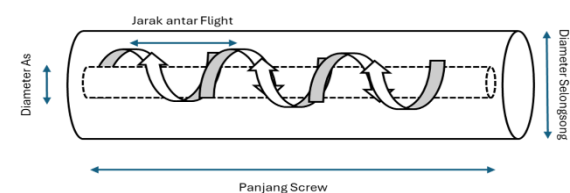
Proses pengamatan sebelum *improvement* dilakukan pada periode September 2024 – Januari 2025 dengan data pengamatan yang diperoleh sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil Data Pengamatan Sebelum *Improvement*

Hari/Tanggal	<i>Refill Window</i> (kg/refill)	<i>Refill Time</i> (kg/s)	<i>Refill Frequency</i> (kali/jam)
Kamis, 19/09/2024	5	0.25	-
	6	0.25	-
Jumat, 20/09/2024	5	0.38	124.8
	7	0.41	89.14
Selasa, 24/09/2024	5	0.28	34.09
	6	0.29	28.41
Senin, 30/09/2024	5	0.25	51.14
	6	0.26	42.61
Selasa, 1/10/2024	5	0.24	62.10
	6	0.24	51.75
Kamis, 3/10/2024	5	0.18	49.58
	4	0.18	61.98
Rabu, 30/10/2024	5	0.25	53.57
	6	0.26	44.64
Jumat, 24/01/2025	5	0.29	53.57
	6	0.31	44.64
Rata-Rata <i>Refill Time</i> (kg/s)		0.27	

Dari data pengamatan selama periode September 2024 – Januari 2025, didapatkan bahwa waktu dan *quantity refill* yang bisa dicapai sebesar 0.27 kg/s. Banyaknya *refill* yang dibutuhkan setiap jam juga terletak di kisaran 45 – 124 kali per jam, dimana hal ini tidak sesuai dengan *rule of thumb machine maker* yang menargetkan frekuensi *refill* per jam di kisaran 10 – 25 kali saja per jam dengan waktu *refill* maksimal >30 detik. Berdasarkan spesifikasi motor *screw conveyor*, motor bekerja dengan kecepatan 1.400 1/min.

Perhitungan dan Desain *Improvement Gear Refill Hopper Resin*



Gambar 1. Profil *Screw Conveyor Refill Hopper Resin*

Setelah didapatkan data pengamatan di atas, dilakukan perhitungan dan desain untuk menentukan kecepatan *screw convey* yang dibutuhkan. Perhitungan dilakukan dengan langkah sebagai berikut:

Parameter yang diketahui:

- Diameter Gear (a) = 10 cm
- RPM (b) = 1.400 (1/min)
- Discharge Output Feeder (c) = 540 kg/jam
- Jarak antar Pitch (d) = 7.5 cm
- Panjang Screw Convey (e) = 250 cm
- Tinggi Flight (f) = 2.58 cm
- Diameter Selongsong (g) = 10.4 cm
- Diameter As (h) = 4.68 cm
- Bulk Density (i) = 0.8 g/cm³

Perhitungan:

- Jumlah rotasi dari ujung ke ujung (j)
= $e/d \times 0.5 = 16.7$ rotasi
- Frekuensi material terbawa (k)
= $b/j = 84$ /menit
- Volume Screw Convey Full (l)
= $\pi \times g^2 \times d = 637.37$ cm³
- Volume as (m)
= $\pi \times h^2 \times d = 129.07$ cm³

Dengan asumsi volume yang terisi sebesar 1/3 dari volume tabung selongsong, maka:

- Volume yang Terisi (n)
= $(l - m) \times 0.33 = 167.77$ cm³
- Volume material terbawa per menit (o)
= $n \times k = 14.092,589$ cm³/menit
- Massa material terbawa per menit (p)
= $o \times i = 11.27$ kg/menit = 0.1879 kg/detik

Jika diinginkan *refill window* sebesar 12 kg/*refill* dengan waktu *refill* maksimal 30 detik, diestimasikan RPM *screw convey* yang dibutuhkan berada di kisaran 7000 – 7700 1/min. Untuk mendapatkan RPM tersebut, diameter *gear* harus diperbesar menjadi:

$$\begin{aligned} \omega_1 \times D_1 &= \omega_2 \times D_2 \\ 1400 \times 10 &= 7700 \times D_2 \\ D_2 &= 55 \text{ cm} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan di atas, diperlukan desain *gear screw convey* dengan diameter 55 cm atau meningkatkan *gear ratio* dari semula 1:1 menjadi 1:5.5

Data Refill Time dan RPM Screw Convey Sesudah Improvement

Proses pengamatan sebelum *improvement* dilakukan pada periode April – September 2025 dengan data pengamatan yang diperoleh sebagai berikut:

Tabel 2. Hasil Data Pengamatan setelah *Improvement*

Hari/Tanggal	Refill Window (kg/refill)	Refill Time (kg/s)	Refill Frequency (kali/jam)
Senin, 14/4/2025	5	1.28	-
	7	1.46	-
	10	1.57	-
	15	1.63	-
	11	1.55	-
Selasa, 13/5/2025	30	1.70	8.67
	25	1.67	10.40
Kamis, 10/7/2025	20	2.67	14.00

	15	2.39	18.67
Senin, 4/8/2025	25	1.64	23.30
	30	1.63	19.41
Rabu, 6/8/2025	25	1.64	22.80
	20	1.67	28.50
Jumat, 8/8/2025	25	1.66	24.32
	30	1.61	20.27
Selasa, 12/8/2025	25	2.48	11.69
	30	2.67	9.74
Rabu, 13/8/2025	25	2.60	9.25
	30	2.62	7.71
Rabu, 17/9/2025	20	1.56	29.25
	30	1.61	19.50

Rata-Rata Refill Time (kg/s) 1.87

Dari hasil pengamatan setelah *improvement*, terlihat bahwa *refill time* mengalami kenaikan signifikan dari 0.27 ke 1.87 kg/s (kenaikan sebesar 592%). Rata-rata kebutuhan / frekuensi *refill* per jam juga mengalami penurunan dari yang awalnya 45 – 124 kali per jam menjadi 9 – 29 kali per jam. Hal ini sudah sejalan dengan *rule of thumb* yang ditetapkan oleh *machine maker* dan memperlancar proses *refill* di saat proses produksi dengan output tinggi, sebab tidak menyebabkan mesin mengalami *shut-down* akibat waktu *refill* yang terlalu lama (>30 detik).

Tantangan dan Saran Perbaikan Selanjutnya

Meskipun hasil pengujian menunjukkan peningkatan signifikan terhadap *refill time* (dari 0.27 kg/s menjadi 0.87 kg/s) dan penurunan frekuensi *refill* dari 45–124 kali per jam menjadi 9–29 kali per jam, implementasi desain baru *screw conveyor* masih menghadapi beberapa tantangan. Tantangan utama terletak pada pengendalian kestabilan mekanis sistem akibat peningkatan kecepatan *screw* yang cukup tinggi. Peningkatan rasio *gear* menyebabkan perubahan torsi dan beban dinamis pada poros *screw*, sehingga perlu diperhatikan keseimbangan antara kecepatan putar, gaya dorong material, dan ketahanan komponen.

Selain itu, *monitoring* performa motor penggerak perlu dilakukan secara berkala untuk memastikan bahwa kenaikan kecepatan tidak menimbulkan kenaikan temperatur berlebih atau konsumsi daya yang tidak efisien. Dari sisi operasional, diperlukan pelatihan bagi operator dan teknisi *maintenance* agar mampu melakukan inspeksi dan perawatan rutin terhadap *gear* serta bearing pada sistem *screw conveyor* hasil modifikasi. Sebagai saran pengembangan berikutnya, sistem *refill* ini dapat ditingkatkan melalui:

1. Integrasi sensor kecepatan dan level *hopper* agar proses *refill* dapat dikontrol otomatis berdasarkan level material, meningkatkan efisiensi energi dan mencegah *overflowing*.
2. Analisis getaran dan keseimbangan dinamis untuk memastikan keamanan operasional jangka panjang.
3. Penggunaan material *screw* dengan tingkat keausan rendah untuk memperpanjang umur pakai sistem.
4. Evaluasi tambahan terkait efisiensi energi dan potensi replikasi desain ke line produksi lain dengan karakteristik material serupa.

Kaitan dan Penilaian *Improvement* yang Dilakukan dengan SDG

Perancangan dan implementasi sistem *screw conveyor refill hopper* resin ini tidak hanya berfokus pada peningkatan performa produksi, tetapi juga memiliki kontribusi langsung terhadap Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals* – SDG) yang ditetapkan oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB), antara lain:

1. *SDG 9 – Industry, Innovation, and Infrastructure*

Proyek ini merupakan bentuk nyata dari inovasi industri melalui rekayasa sistem mekanik untuk meningkatkan efisiensi proses manufaktur. Modifikasi rasio *gear* dan optimalisasi aliran material memperkuat infrastruktur produksi yang andal dan adaptif terhadap kebutuhan industri modern.

2. *SDG 12 – Responsible Consumption and Production*

Peningkatan efisiensi *refill* resin berdampak pada pengurangan konsumsi energi per unit produk, penurunan waktu *idle* mesin, dan pemanfaatan sumber daya yang lebih optimal. Dengan demikian, proses produksi menjadi lebih hemat energi dan menghasilkan limbah operasional yang lebih sedikit.

3. *SDG 8 – Decent Work and Economic Growth* - (secara tidak langsung)

Dengan sistem *refill* yang lebih cepat dan stabil, operator dapat bekerja dalam kondisi yang lebih efisien dan aman, serta mengurangi potensi stres akibat intervensi manual pada sistem yang sering tersendat. Hal ini mendukung peningkatan produktivitas kerja dan pertumbuhan ekonomi perusahaan secara berkelanjutan.

Secara keseluruhan, peningkatan sistem *screw conveyor refill hopper* resin ini mencerminkan penerapan prinsip rekayasa berkelanjutan (*sustainable engineering*), yaitu mengoptimalkan efisiensi teknis tanpa mengabaikan aspek keselamatan, daya tahan peralatan, serta tanggung jawab terhadap lingkungan dan sumber daya energi.

Kesimpulan

Pembuatan desain set alat *screw conveyor refill hopper resin* ini berhasil meningkatkan efisiensi proses pengisian material resin pada salah satu *line* produksi di PT Dunia Kimia Jaya *Plant* Cibitung. Melalui perubahan rasio *gear* pada motor penggerak, laju putaran *screw* meningkat sehingga proses transfer material menjadi lebih cepat dan stabil. Hasil pengujian menunjukkan adanya peningkatan signifikan terhadap kecepatan aliran resin, penurunan waktu *refill* hingga 50%, serta pengurangan *downtime feeder* akibat keterlambatan suplai material.

Selain dampak teknis, perbaikan ini menghasilkan potensi penghematan energi dan peningkatan kapasitas produksi yang berkontribusi langsung terhadap efisiensi biaya operasional perusahaan. Secara strategis, implementasi *improvement* ini juga selaras dengan prinsip *sustainable manufacturing* yang mendukung *Sustainable Development Goals (SDG) 9 – Industry, Innovation and Infrastructure* dan *SDG 12 – Responsible Consumption and Production*, melalui peningkatan produktivitas, efisiensi energi, dan optimalisasi sumber daya. Ke depan, proyek ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan sistem kontrol otomatis

berbasis sensor untuk memonitor kecepatan *screw* dan tingkat *hopper* secara *real-time*, sehingga sistem *refill* dapat beroperasi dengan presisi lebih tinggi dan adaptif terhadap variasi produksi.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT Dunia Kimia Jaya *Plant* Cibitung atas dukungan, izin, dan kesempatan yang diberikan untuk melaksanakan kegiatan penelitian dan pengembangan pada sistem *screw conveyor refill hopper resin* di area produksi. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Departemen Produksi dan Departemen *Maintenance* yang telah memberikan data, masukan teknis, serta dukungan selama proses perancangan dan pengujian alat.

Penghargaan yang tulus juga penulis sampaikan kepada dosen pembimbing program Praktik Keinsinyuran dan seluruh rekan sejawat yang telah memberikan bimbingan, saran, serta diskusi konstruktif sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik. Penulis berharap hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi positif bagi peningkatan efisiensi dan keberlanjutan proses manufaktur di industri *masterbatch*.

Referensi

- Henderson, R., & Perry, J. (2019). *Material handling equipment design handbook*. New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Khurmi, R. S., & Gupta, J. K. (2005). *Theory of machines* (14th ed.). New Delhi, India: Eurasia Publishing House.
- Srivastava, A. C., & Singh, S. (2013). Design and analysis of a screw conveyor for transportation of granular material. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2(4), 45–51.
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. New York, NY: United Nations.
- United Nations Industrial Development Organization. (2020). *Industrial energy efficiency for sustainable development*. Vienna: Author.
- Zareiforoush, H., Komarizadeh, M. H., & Alizadeh, M. R. (2010). Investigation of the performance of screw conveyors for handling granular materials. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12(2), 159–167.

Penerapan Sistem Pendataan dan Pelacakan Material Berbasis IoT (*Internet of Thing*) dengan Teknologi RFID (*Radio Frequency Identification*) di PT PAL Indonesia (Persero)

M. Zainal Muttaqin¹², Ashka Azhar Abadi²,
Tarsisius Dwi Wibawa Budianta¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

² PT. PAL Indonesia

✉ zainal.einstein@gmail.com

Proses pembangunan kapal di PT PAL Indonesia (Persero) membutuhkan sistem pendataan material yang akurat dan terintegrasi untuk menjamin kelancaran aktivitas produksi. Namun, sistem manual yang masih digunakan sering menimbulkan kendala seperti ketidaksesuaian spesifikasi, data material yang tidak lengkap, serta keterlambatan pembaruan transaksi. Studi kasus ini bertujuan untuk menganalisis dan memperbaiki sistem pendataan serta pelacakan (*tracking & tracing*) material di gudang produksi melalui penerapan sistem digital berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan teknologi *Radio Frequency Identification* (RFID) dan NodeMCU ESP8266. Metode penelitian meliputi identifikasi masalah pada proses eksisting, analisis akar penyebab menggunakan diagram tulang ikan, perencanaan perbaikan dengan pendekatan 5W+1H, implementasi sistem digital, serta evaluasi hasil melalui pengujian dan analisis dampak terhadap aspek *Quality, Cost, Delivery, Safety*, dan Moral (QCDSM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan sistem berbasis IoT ini mampu meningkatkan akurasi data pendataan material, mengurangi waktu transaksi, serta memperkuat aspek keamanan dan kenyamanan kerja di lingkungan gudang. Secara keseluruhan, digitalisasi sistem pendataan material terbukti meningkatkan efektivitas pengelolaan material di lini produksi kapal dan dapat menjadi dasar bagi pengembangan sistem berbasis QR Code yang lebih adaptif dan praktis pada tahap lanjutan.

Kata kunci: Manajemen Material, *Sustainability*, IoT, Digitalisasi Produksi, *Tracking System*

Pendahuluan

PT PAL Indonesia (Persero) merupakan Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang bergerak di bidang industri maritim, khususnya dalam pembangunan kapal perang dan niaga. Dalam proses konstruksi kapal, material memiliki peran penting sebagai komponen utama yang menentukan kelancaran dan keberhasilan produksi. Kompleksitas jenis, ukuran, serta spesifikasi material menyebabkan proses pendataan dan pelacakan (*tracking & tracing*) menjadi tantangan tersendiri.

Selama ini, sistem pendataan material di gudang produksi masih dilakukan secara manual menggunakan formulir fisik dan *spreadsheet* sederhana. Sistem ini menimbulkan berbagai permasalahan, seperti keterlambatan pembaruan data, ketidaksesuaian informasi antara catatan dengan kondisi aktual di lapangan, serta risiko kesalahan pencatatan (*human error*). Kondisi tersebut berdampak langsung terhadap efisiensi waktu produksi, keakuratan stok material, dan ketepatan jadwal penyelesaian proyek.

Untuk menjawab tantangan tersebut, penelitian ini menerapkan sistem digital berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan dukungan teknologi *Radio Frequency Identification* (RFID). Teknologi ini memungkinkan proses identifikasi material dilakukan secara otomatis dan *real-time* melalui koneksi nirkabel, sehingga meningkatkan efisiensi, akurasi, dan transparansi dalam manajemen material.

Secara teoretis, konsep IoT telah banyak diterapkan dalam industri manufaktur sebagai bagian dari transformasi menuju *smart manufacturing* dan *industry 4.0* (Gubbi et al., 2013; Li & Zhang, 2018). Sementara itu, penerapan RFID terbukti mampu meningkatkan visibilitas rantai pasok dan efisiensi proses logistik (Ramanathan et al., 2017; Sutrisno & Rahmawati, 2019). Namun, di sektor industri maritim, terutama di lingkungan galangan kapal nasional, penerapan sistem digital berbasis IoT dan RFID masih terbatas dan belum terintegrasi secara penuh.

Teknologi terbaru pada penelitian ini terletak pada integrasi antara perangkat NodeMCU ESP8266 dengan sensor RFID RC522 dan *Google Spreadsheet* untuk mendukung sistem pendataan material di gudang produksi PT PAL Indonesia. Sistem ini dikembangkan sebagai prototipe *sustainability* digitalisasi proses logistik internal, sekaligus menjadi langkah awal penerapan konsep *Industrial Internet of Things* (IIoT) di industri perkapalan.

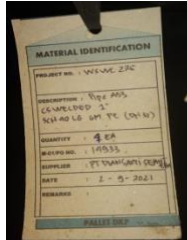
Batasan penelitian ini difokuskan pada penerapan sistem di Gudang Produksi Divisi Kapal Perang tanpa membahas rantai pasok eksternal. Tujuannya adalah untuk mengevaluasi efektivitas sistem IoT-RFID terhadap peningkatan aspek *Quality, Cost, Delivery, Safety*, dan Moral (QCDSM) sebagai indikator performa produksi.

Metode

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan 6 metode, yaitu:

1. Pembuatan Label Identitas Material

Label identitas material dibuat dengan memanfaatkan sisa kertas yang tidak dipakai di gudang produksi yang selanjutnya ditempatkan di bagian material tersebut sebagai identitas. Label ini berisi informasi dari material di antaranya, yaitu deskripsi material, *no project*, *no PO* (*purchase order*) atau *lot batch*, jumlah, dan aktivitas yang menggunakan material tersebut.

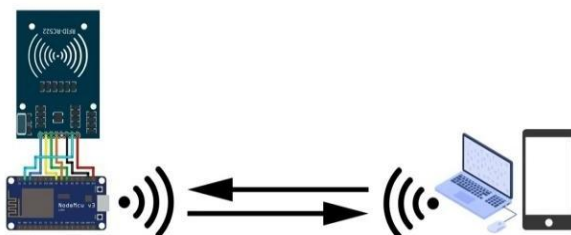


Gambar 1. Label Material

2. Pembuatan Data Monitoring Transaksi Material secara Digital

Data *monitoring* transaksi material dibuat secara digital dengan memanfaatkan perkembangan teknologi. Dalam hal ini, dibuat dengan menggunakan Microsoft Office Excel dengan cara pengolahan data dan informasi dari berbagai sumber. Seluruh informasi atau data yang ada pada material harus sesuai dengan desain gambar kerja sehingga memudahkan tim produksi untuk dapat memilah dan memilih material mana yang akan digunakan. Selain itu, kelengkapan data dan informasi juga memudahkan tim pallet DKP dalam pelayanan pengambilan material maupun proses handling material.

NETWORK



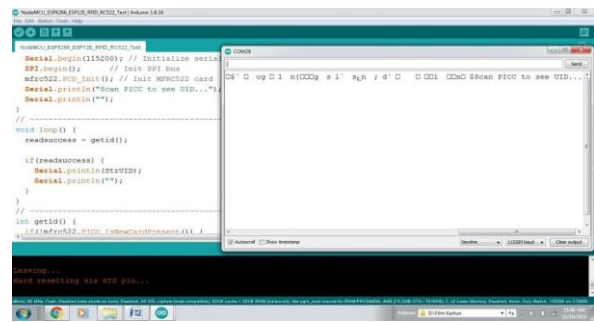
Gambar 2. Data Monitoring Material

Data material masuk ke Pallet DKP disesuaikan dengan surat jalan material, data di *system IFS 9* dan juga data/informasi aktual saat penerimaan. Data/informasi yang direkam diantaranya, yaitu tanggal penerimaan, deskripsi material, part no / kode material, no PO / *lot batch*, nama penerima, nama supplier, no transmittal, jumlah material, lokasi, kode lokasi (No. Rak), dan *remarks* (catatan aktivitas dll).

3. Interface RFID RC522 & NodeMCU ESP8266 via Website

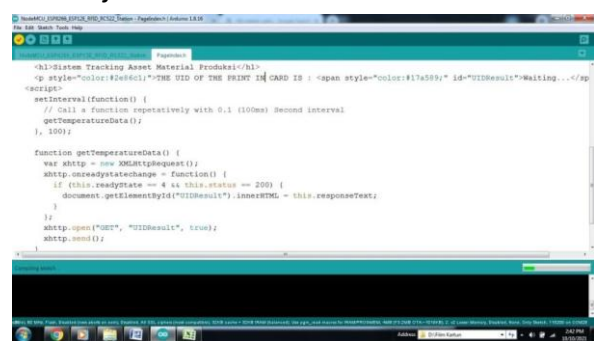
Komponen utama berupa NodeMCU ESP8266 sebagai pengendali utama, sensor RFID RC522 sebagai pembaca data *tag*, kartu RFID sebagai identitas unik material, dan layar LCD 16x2 dengan antarmuka I2C sebagai media tampilan informasi. Seluruh komponen

dirakit menjadi satu sistem untuk membaca data material secara otomatis.



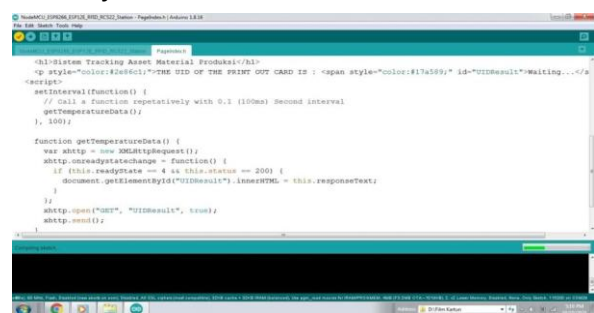
Gambar 3. Upload Sketch Program "RFID RC522 dan NodeMCU 8266"

4. Compile dan Upload Sketch Program "Stamp Print In" ke Software Arduino



Gambar 4. Stamp Print In

5. Compile dan Upload Sketch Program "Stamp Print Out" ke Software Arduino



Gambar 5. Stamp Print Out

6. Data RFID Dikirim ke Google Spreadsheet

Data hasil pembacaan RFID dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi ke Google Spreadsheet menggunakan Google Apps Script sebagai *server* penyimpanan berbasis *cloud*. Proses pengujian dilakukan di Gudang Produksi Divisi Kapal Perang PT PAL Indonesia, Surabaya, selama bulan September–Oktober 2025.

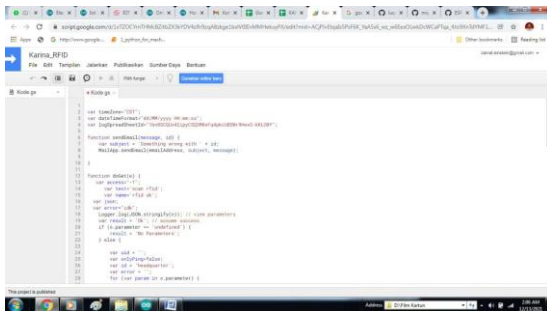
Hasil Kerja

1. Bekerja dengan Google Spreadsheet

- Pertama, masuk ke Gmail menggunakan kredensial akun Google Anda, lalu pilih Google Spreadsheet dan pilih opsi "Start a new spreadsheet" (Mulai lembar kerja baru).
- Ubah nama lembar kosong tersebut sesuai keinginan Anda. Dalam contoh ini, saya menamainya

KARINA RFID. Kemudian buat kolom pada lembar tersebut untuk Tanggal (*Date*), UID Kartu (*Card UID*), Nama (*Name*), Akses (*Access*), Dari (*From*), dan sebagainya.

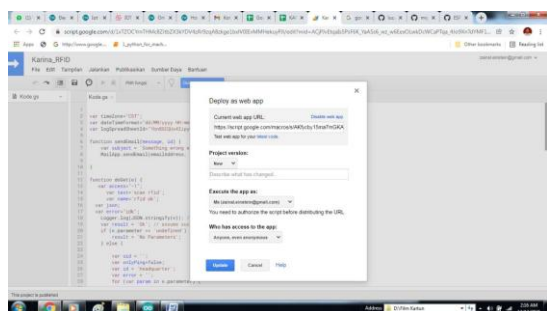
- Sekarang buka menu Ekstensi, lalu klik opsi “Apps Script”, tempat kita akan menulis fungsi untuk memasukkan data ke dalam lembar tersebut.
- Sebuah Google Script baru akan dibuat dengan nama default “Untitled Project”. Anda dapat mengganti nama file Google Script ini sesuai keinginan.
- Selanjutnya, unduh dan tempelkan kode Google Script yang diberikan di bawah ini, lalu gantikan Sheet ID pada variabel sheet_id.



Gambar 6. Setting Google Spreadsheet

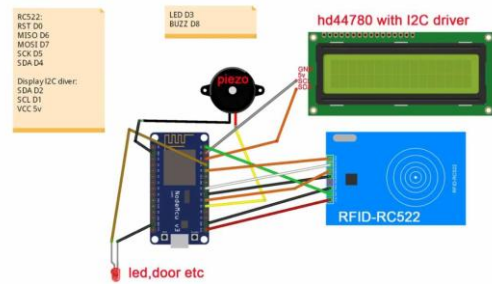
2. Mendapatkan Google Script ID

- Buka menu Publikasikan dan pilih “Terapkan sebagai aplikasi web” (*Deploy as web app*).
- Pilih “Versi proyek (*Project version*)” sebagai “Baru (*New*)”. Pada kolom “Jalankan aplikasi sebagai (*Execute the app as*)”, pilih email ID Anda. Pada kolom “Siapa yang dapat mengakses aplikasi (*Who has access to the app*)”, pilih “Siapa pun, bahkan anonim (*Anyone, even anonymously*)”. Lalu klik “Terapkan (*Deploy*)”.
- Pada langkah berikutnya, berikan semua izin yang diminta. Setelah itu akan muncul layar baru yang menampilkan sebuah tautan dengan nama “*Current web app URL*”. Tautan (URL) ini berisi Google Script ID. Cukup salin URL tersebut dan simpan di Notepad untuk digunakan di kemudian hari.



Gambar 7. Setting Google Script

3. Diagram Rangkaian Sistem Pelacakan Aset Material Produksi



Gambar 8. Diagram Rangkaian

4. Pemrograman NodeMCU untuk Mengirim Data ke Google Spreadsheet

Di bagian ini, kita akan memprogram NodeMCU agar dapat tersinkronisasi dengan Google Spreadsheet menggunakan ID perangkat (*device ID*) dan mengirim data ke Google Sheet melalui Google Script. Sebelum melanjutkan ke pemrograman, pastikan Anda sudah menginstal board ESP8266 NodeMCU di Arduino IDE melalui *Board Manager*.

Setelah itu, *install* pustaka berikut melalui menu *Sketch* → *Include Library* → *Manage Library*, lalu cari nama pustaka dan klik *Install*:

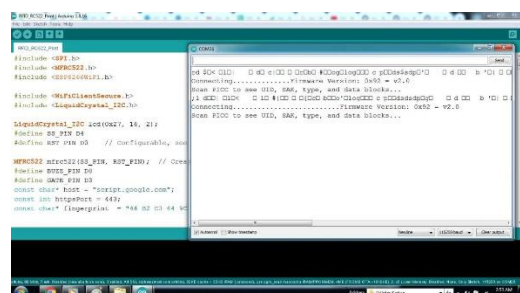
- RFID RC522 library
- LiquidCrystal LCD I2C interface library

5. Pemrograman untuk Mendaftarkan RFID

- Di Arduino IDE, buka menu *File* > *Examples* > *RFID RC522 library* > *Enroll*.
- Di Arduino IDE, buka juga menu *File* > *Examples* > *LiquidCrystal LCD I2C interface library* > *Enroll*.
- Unggah (*upload*) kode tersebut ke NodeMCU, lalu buka Serial Monitor dengan kecepatan *baud rate* 115200.

6. Pemrograman untuk Sistem Pelacakan Material

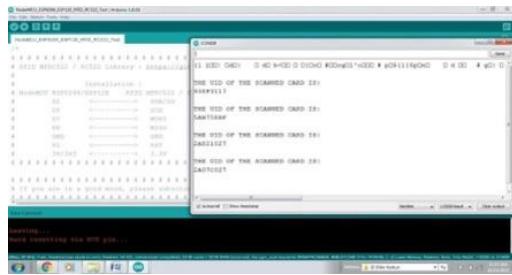
- Hal pertama yang harus dilakukan dalam program adalah menyertakan pustaka “MFRC522.h” untuk menggunakan sensor RFID RC522 dan pustaka “ESP8266WiFi.h” untuk menggunakan modul Wi-Fi ESP8266 NodeMCU.



Gambar 9. Setting Library RFID

- Untuk menggunakan antarmuka I2C pada layar LCD, perlu menambahkan pustaka *LiquidCrystal_I2C.h*.

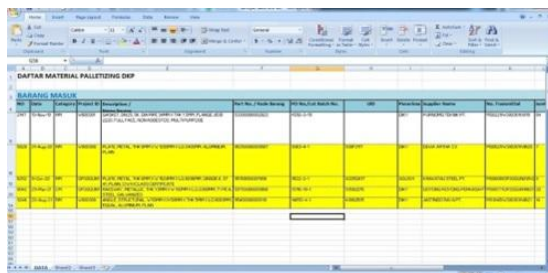
Setelah itu, kita harus mengonfigurasi *port* serial tempat sensor RFID pasif akan dihubungkan.



Gambar 10. Setting Library LCD

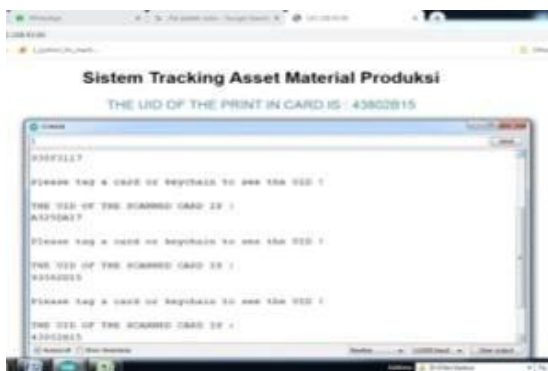
7. Evaluasi Hasil Perbaikan

Dari hasil dapat dilihat muncul "*unique number*" untuk selanjutnya menjadi identitas material dalam RFID card.



Gambar 11. Tampilan Unique Number

Penerapan sistem RFID berbasis IoT berhasil meningkatkan efisiensi dan akurasi proses pendataan material di gudang produksi. Sistem mampu membaca hingga 50 *tag* per menit tanpa kontak langsung dengan material. Data yang terekam secara otomatis tersimpan di *server cloud* dan dapat diakses melalui antarmuka web secara *real-time*.



Gambar 12. Evaluasi Hasil Perbaikan

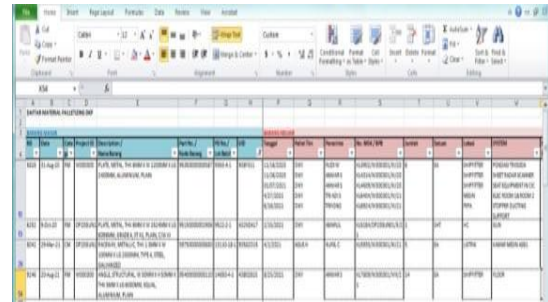
Hasil pengujian menunjukkan peningkatan signifikan pada aspek QCDSM sebagai berikut:

1. **Quality:** Akurasi data meningkat hingga 95% dibandingkan sistem manual.
2. **Cost:** Penghematan waktu pendataan sebesar 40% mengurangi biaya operasional.
3. **Delivery:** Pembaruan data material *real-time* mempercepat pelaporan stok gudang.
4. **Safety:** Sistem digital mengurangi potensi kehilangan dan kesalahan material.

5. **Moral:** Operator merasa lebih nyaman karena sistem lebih ringan dan otomatis.

8. Pencapaian Target

Target yang dicapai selain transaksi masuk material yakni transaksi penggunaan material oleh bengkel produksi yang tercatat sesuai informasi yang lengkap seperti data berikut:



Gambar 13. Pencapaian Target

Hasil implementasi menunjukkan bahwa digitalisasi sistem pendataan material melalui integrasi IoT dan RFID mampu menjawab permasalahan utama sistem manual. Sistem manual yang sebelumnya bergantung pada dokumen kertas dan *input spreadsheet* menyebabkan ketidakefisienan dan keterlambatan informasi.

Teknologi RFID memungkinkan identifikasi objek tanpa kontak fisik dan secara simultan, yang memberikan efisiensi tinggi dalam pelacakan material di area gudang yang luas. Integrasi NodeMCU ESP8266 dengan Google Spreadsheet memungkinkan sistem bekerja dengan biaya rendah namun tetap memiliki fitur *monitoring berbasis cloud*.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Ramanathan et al. (2017) dan Li & Zhang (2018) yang menyebutkan bahwa penerapan RFID dan IoT meningkatkan visibilitas rantai pasok dan kecepatan pelacakan hingga 50%. Hasil ini juga memperkuat studi Sutrisno & Rahmawati (2019) bahwa digitalisasi gudang meningkatkan efisiensi pendataan hingga 35%.

Selain peningkatan kinerja, sistem ini juga mendukung implementasi konsep *Industrial Internet of Things (IIoT)* di lingkungan PT PAL Indonesia. Dengan penerapan sistem berbasis data *real-time*, proses pengambilan keputusan menjadi lebih cepat, transparan, dan berbasis bukti (*evidence-based decision making*).

Kendati demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan pada lingkup pengujian yang hanya mencakup satu divisi. Pengembangan sistem secara menyeluruh memerlukan integrasi dengan sistem ERP perusahaan serta pengujian di lingkungan produksi yang lebih kompleks.

Kesimpulan

Penerapan sistem pendataan dan pelacakan material berbasis IoT dengan teknologi RFID di PT PAL Indonesia (Persero) terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi dan akurasi manajemen material. Sistem ini mampu mempercepat proses pendataan, mengurangi kesalahan pencatatan, dan



menyediakan data secara *real-time* melalui integrasi digital. Hasil evaluasi terhadap aspek QCDSM menunjukkan peningkatan signifikan pada kualitas data, efisiensi biaya, kecepatan pelaporan, keamanan penanganan material, serta kenyamanan kerja personel.

Secara keseluruhan, implementasi sistem ini menjadi langkah strategis dalam transformasi digital dan sustainability PT PAL Indonesia menuju *Smart Shipyard* dan penerapan *Industry 4.0* di sektor maritim nasional.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT PAL Indonesia (Persero) atas izin dan dukungan dalam pelaksanaan studi ini, serta kepada Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas bimbingan dan fasilitas penelitian serta kepada PT PAL Indonesia atas bimbingan dan pengambilan data.

Referensi

- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660.
- Heizer, J., Render, B., & Munson, C. (2017). *Operations management: Sustainability and supply chain management*. Pearson Education Limited.
- Kementerian Perindustrian Republik Indonesia. (2020). *Peta jalan implementasi industri 4.0 di sektor manufaktur nasional*. Jakarta: Direktorat Jenderal Ketahanan, Perwilayahan dan Akses Industri Internasional.
- Li, X., & Zhang, Y. (2018). Application of internet of things (IoT) and RFID in smart manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 47, 215–226.
- PT PAL Indonesia (Persero). (2021). *Makalah PSS Karina One Divisi Kapal Perang* (No. Pendaftaran 39). Surabaya: Author.
- Putra, R. A., Nugroho, A. D., & Santoso, B. (2020). Pengembangan sistem monitoring bahan baku berbasis IoT menggunakan NodeMCU ESP8266. *Jurnal Sistem dan Teknologi Informasi*, 8(1), 45–52.
- Ramanathan, U., Subramanian, N., & Parrott, G. (2017). Role of RFID and IoT technologies in supply chain visibility and efficiency. *International Journal of Production Economics*, 193, 1–9.
- Sutrisno, H., & Rahmawati, D. (2019). Implementasi RFID pada sistem manajemen gudang untuk meningkatkan efisiensi operasional. *Jurnal Teknologi dan Industri*, 5(3), 112–120.

Perencanaan Instalasi Penerangan pada Gedung Produksi Pabrik Rokok

Khasbi Muhammad Hikam¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ khasbimuhammad21@gmail.com

Perencanaan instalasi penerangan pada gedung produksi pabrik rokok. Gedung produksi ini memiliki panjang 192 meter dan lebar 28 meter yang terbagi menjadi beberapa ruangan yang berbeda. Laporan studi kasus ini menggunakan metode literatur untuk menganalisis berbagai aspek terkait instalasi gedung, termasuk perhitungan jumlah lampu indeks setiap ruangan, total beban daya penerangan, serta perhitungan KHA yang dibutuhkan dalam perencanaan sistem penerangan yang baik. Analisis perhitungan akan dilakukan dengan menggunakan *software* Microsoft Excel dan hasilnya akan disesuaikan dengan standar Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL). Selain itu, proses perencanaan instalasi listrik ini juga menggunakan *software* AutoCad 2022. Tujuan dari penelitian studi kasus ini adalah untuk meningkatkan produktivitas pekerja, meningkatkan kesehatan, dan suasana kerja yang nyaman sesuai dengan standar yang berlaku.

Kata kunci: Instalasi Listrik, Perencanaan, Penerangan

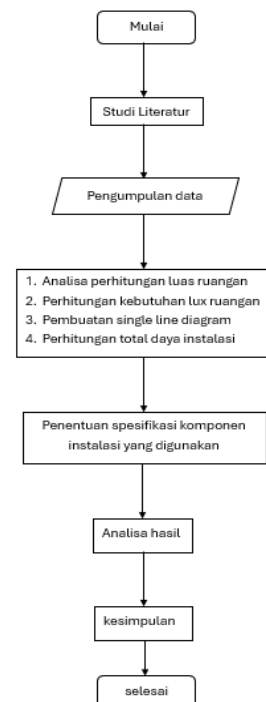
Pendahuluan

Jawa Timur menjadi produsen tembakau terbesar di Indonesia dan menyumbang hampir 50% dari total produksi tembakau. Kota Kediri dikenal sebagai pusat industri tembakau, terutama karena menjadi kantor pusat salah satu produsen rokok besar di Indonesia. Industri pengolahan tembakau ini menjadi pendorong utama perekonomian Kota Kediri dengan adanya pabrik-pabrik rokok dan industri pengolahan tembakau. Pendapatan dari cukai tembakau juga memberikan kontribusi yang sangat signifikan untuk berbagai program pembangunan di Kota Kediri.

Banyaknya pembangunan pabrik ini mendorong pembangunan di kota tersebut, sehingga mendorong penulis merencanakan instalasi penerangan untuk pembangunan pabrik rokok. Studi kasus ini bertujuan untuk mengetahui banyaknya intensitas cahaya yang diperlukan guna mendukung proses produksi pembuatan rokok agar para pekerja/karwayan dapat bekerja dengan nyaman dan produksi rokok dapat berjalan dengan optimal.

Metode

Metode analisis dalam studi kasus "Perencanaan Instalasi Penerangan pada Gedung Produksi Pabrik Rokok", dimulai dengan pengumpulan data, seperti denah arsitektur, *layout* pada gedung gudang produksi, serta mengetahui panjang, lebar, tinggi, dan luas dari setiap ruangan. Selanjutnya, akan dilakukan perhitungan data yang nantinya akan dilakukan analisa data serta perbandingan dengan standar pencahayaan dan kebutuhan yang ada di gudang produksi tersebut.



Gambar 1. Flowchart Metode Analisis

1. Tahap persiapan
Tahap awal penelitian mencakup penentuan topik, latar belakang, identifikasi masalah, serta penyusunan proposal. Referensi dari sumber seperti jurnal, buku, dan penelitian sebelumnya digunakan dalam penyusunan laporan studi kasus.
2. Tahap pengumpulan data
Pada tahap ini, pengumpulan data yang dilakukan berupa denah arsitektur, *layout* gedung gudang produksi, serta panjang, lebar, tinggi, dan luas dari setiap ruangan. Pengambilan data pada tahap ini bertujuan untuk memudahkan perencanaan instalasi listrik dan analisis data pada tahap berikutnya.

3. Tahap analisis perencanaan instalasi listrik
Pada tahap ini dilakukan perhitungan data menggunakan rumus dan satuan, seperti perhitungan luas ruangan, kebutuhan lux penerangan, dan total daya. Selain itu, pada tahap ini juga dilakukan pembuatan *single line diagram* (SLD).
4. Analisa hasil
Pada tahap ini, dilakukan analisa apakah hasil dari perencanaan instalasi listrik tersebut telah memenuhi standar PUIL dan indeks penerangan sudah terpenuhi.
5. Tahap akhir
Pada tahap akhir dari penelitian ini, penulis menuliskan hasil analisis dari tahap sebelumnya ke dalam laporan studi kasus.



Gambar 2. Layout

Denah *layout* gudang produksi memiliki panjang 192 meter dan lebar 28 meter yang terbagi menjadi area produksi, area transit, ruang tamu, ruang *meeting*, dan toilet. Agar proses produksi nantinya bisa berjalan dengan lancar, akan diperhitungkan jumlah lux penerangan dan beban listrik yang akan digunakan.

Hasil Analisa Perancangan Sistem Kelistrikan

Penentuan Kebutuhan Penerangan

Instalasi penerangan merupakan satu hal yang sangat penting dalam sebuah bangunan, instalasi ini berkaitan dengan tingkat pencahayaan pada suatu ruangan. Terdapat standar yang berbeda untuk setiap ruangan sesuai dengan fungsinya. Ada beberapa ruangan yang harus memiliki tingkat pencahayaan yang cukup tinggi agar dapat memaksimalkan fungsi ruangan tersebut.

Tabel 1. Standar Tingkat Penerangan

Fungsi Ruangan	Tingkat Pencahayaan Lux
Teras	60
Ruang Tamu	120 – 250
Ruang Makan	120 – 250
Ruang Kerja	120-250 (aktivitas biasa) atau 300-500 (aktivitas dengan layar atau ketelitian)
Ruang Rapat	300-500 (atau lebih tinggi, tergantung aktivitas)
Gudang	100-400 (tergantung area)

Rumus menentukan jumlah titik lampu penerangan yang dibutuhkan untuk pencahayaan suatu ruangan adalah sebagai berikut:

$$N = \frac{E \times L \times W}{\Phi \times LLF \times CU \times n}$$

Dimana :

- N = Jumlah titik lampu
- L = Lebar ruangan
- W = Panjang ruangan
- Φ = Total lumen lampu
- LLF = *Light Loss Factor* (0.9)
- CU = *Coeffisien of Utilization* /faktor pemanfaatan
- n = Jumlah lampu dalam satu titik

Tabel 2. Penentuan Kebutuhan Penerangan

Nama Ruangan	Panjang	Lebar	Kuat Penerangan	Lumen Lampu	Jumlah Titik	Jenis Lampu
R. Produksi	175	28	350	3.000	636,2	TL LED 30W
R. Transit	17	20	300	14.000	9,4	Highbay 100W
R. Tamu	4	3	300	900	4,4	Down light 9W
R. Meeting	6	5	300	1600	6,25	Down light 15W
Toilet	2	3	150	900	1,1	Down light 9W

Perhitungan Total Daya

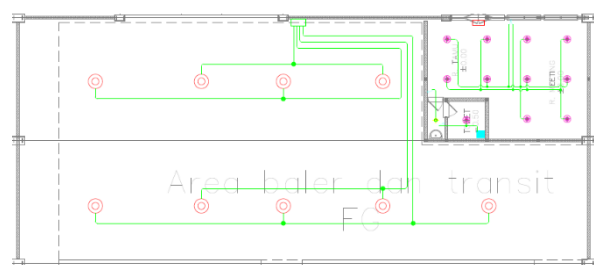
Tabel 3. Perhitungan Total Daya

Nama Ruangan	Panjang	Lebar	Jumlah Titik Lampu	Jenis Lampu	Daya (W)
R. Produksi	175	28	636	TL LED 30W	19.080
R. Transit	17	20	8	Highbay 100W	800
R. Tamu	4	3	4	Down light 9W	36
R. Meeting	6	5	6	Down light 15W	90
Toilet	2	3	1	Down light 9W	9

Perhitungan Rencana Beban Listrik Penerangan

Tabel 4. Perhitungan Rencana Beban Listrik Penerangan

Nama Ruangan	Beban/ Lampu	Pembagian Lampu			Daya		
		R	S	T	R	S	T
R. Produksi	30 W	212	212	212	6.360	6.360	6.360
R. Transit	100 W	3	3	2	300	300	200
R. Tamu	9 W			4			36
R. Meeting	15 W			6			90
Toilet	9 W			9			9
Total Daya (W)					6.660	6.660	6.695
					20.015 W		



Gambar 3. Instalasi Lampu Penerangan R. Transit, R. Tamu, R. Meeting, dan Toilet



Gambar 4. Instalasi Lampu Penerangan Gedung Produksi

Perhitungan Rencana Beban Listrik Kotak Kontak

Stop Kontak atau disebut juga kotak kontak listrik merupakan kotak tempat sumber arus listrik yang siap pakai. Stop kontak merupakan perangkat listrik yang berfungsi sebagai titik sambung antara sumber Listrik dan peralatan elektronik untuk mengalirkan daya listrik. Agar alat listrik terhubung dengan stop kontak, maka diperlukan kabel dan steker atau colokan yang nantinya akan ditancapkan pada stop kontak. Penempatan dan pemasangan stopkontak telah diatur dalam PUIL bahwa pemasangan kotak kontak dinding pada instalasi listrik domestik (rumah tangga) harus dipasang dengan ketinggian sekurang-kurangnya 1,25 m dari lantai. Adapun pengecualian untuk stop kontak yang dipasang kurang dari 1,25 m dari lantai harus dengan penutup atau pengaman tambahan.

Tabel 5. Perhitungan Rencana Beban Listrik Kotak Kontak

Nama Ruang	Jumlah Kotak Kontak	Beban	Daya (W)		
			R	S	T
R. Produksi	30	200 W	2.000	2.000	2.000
R. Transit	5	200 W	600	400	
R. Tamu	1	200 W		200	
R. Meeting	3	200 W			600
Toilet		200 W			
Total Daya			2.600	2.600	2.600
			7.800 W		

Rencana Distribusi Listrik

Rencana distribusi listrik menggunakan sumber Listrik dari PLN. Nantinya panel pendistribusian akan dipisah antara panel untuk penerangan dan untuk kotak kontak pada meja. Listrik dari PLN akan menuju ke panel utama *Main Distribution Panel* (MDP). Kemudian akan didistribusikan menuju *Sub Distribution Panel* (SDP) Penerangan dan *Sub Distribution Panel* (SDP) kotak kontak.

Rencana Distribusi Listrik

Panel listrik merupakan pusat distribusi dan pengendalian aliran listrik dari sumber utama (seperti PLN atau genset) ke berbagai titik beban dalam suatu instalasi. Fungsinya mencakup pembagian dan penyaluran daya, pengaman instalasi dari gangguan seperti korsleting, dan pemantauan konsumsi listrik. Panel ini berisi komponen-komponen listrik penting seperti MCB (*Miniature Circuit Breaker*) dan busbar dalam satu wadah yang terintegrasi dan aman.

Panel MDP berisi MCCB yang dengan semua sub-panel. Beban yang tersambung pada MDP yaitu:

- Panel Penerangan = 20.015 W
- Panel Kotak Kontak = 7.800 W

Kapasitas Pengaman

Main Distribution Panel (MDP)

Panel *Low Voltage Main Distribution Panel* (LVMDP) adalah panel distribusi utama yang berfungsi mendistribusikan daya dari sumber utama ke panel-panel lain. Panel ini bertindak sebagai pusat kontrol dan distribusi utama untuk seluruh bangunan atau instalasi, mengontrol, mengamankan, dan menyalurkan daya dari sumber utama

(seperti PLN atau genset) ke berbagai sub-panel dan perangkat.

- Menentukan nilai daya terpasang
 - Panel Penerangan = 20.015 W
 - Panel Kotak Kontak = 7.800 W
 - Total kebutuhan = 27.815 W
 - $S = \frac{P}{\cos \phi} = \frac{27.815}{0,85} = 32.723 \text{ VA}$
- Menentukan Nilai Arus Nominal
 - $I_n = \frac{S}{V \times \sqrt{3}} = \frac{32.723}{380 \times 1,73} = 49,72 \text{ A}$
- Menentukan kapasitas MCCB
 - $I_{MCCB} = 125\% \times I_n = 125\% \times 49,72 \text{ A} = 62,15 \text{ A}$

Tabel 6. Daftar Beban Panel

Nama Panel	Daya			Total Daya		Nilai Kapasitas MCCB	MCCB Terpasang
	R	S	T	W	VA		
MDP	9.260	9.260	9.295	27.815	32.723	62,15	63 A
Panel Penerangan	6.660	6.660	6.695	20.015	23.547	44,72	50 A
Panel Kotak Kontak	2.600	2.600	2.600	7.800	6.630	12,6	20 A

Menentukan KHA (Kuat Hantar Arus) Kabel feeder

$$I_{KHA} = 125\% \times I_n = 125\% \times 49,72 \text{ A} = 62,15 \text{ A}$$

Tabel 7. Perhitungan KHA Kabel Feeder

Nama Panel	Arus	KHA Kabel	Luas Penampang Kabel
MDP	49,72	62,15	16 mm
Panel Penerangan	35,77	44,72	10 mm
Panel Kotak Kontak	10,1	12,6	4 mm

Alternatif Solusi

Penerangan pada gudang umumnya berfokus pada efisiensi energi, penghematan biaya operasional, dan peningkatan lingkungan kerja. Solusi yang ditawarkan meliputi penggunaan teknologi lampu LED (*Light Emitting Diode*) yang merupakan jenis lampu hemat energi, ramah lingkungan, dan umur lampu yang lebih panjang dari pada lampu jenis lain.

Rekomendasi Solusi

Solusi penerangan gudang terbaik menggunakan lampu LED *High Bay* karena efisiensi energi dan memiliki daya tahan tinggi, serta memiliki kualitas cahaya yang terang dan merata. Selanjutnya, untuk ruang produksi menggunakan lampu TL LED (*Tube Light*) yang lebih hemat energi dibandingkan dengan neon tradisional. Untuk pemilihan warna lampu sebaiknya menggunakan tipe CDL (*Cool Daylight*) yang menghasilkan cahaya lampu berwarna putih kebiruan (6500 K).

Kesimpulan

Dari perencanaan dan perhitungan, serta pembahasan yang telah diuraikan di atas, maka dapat ditarik kesimpulan:

- Sistem penerangan yang digunakan adalah sistem penerangan langsung, yaitu cahaya yang dipancarkan sumber cahaya (lampu) seluruhnya ke bidang kerja yang harus diberikan penerangan, karena sistem penerangan langsung memiliki faktor efisiensi dan flux cahaya yang optimal sebesar 90%.



2. Pada ruangan produksi diperlukan 636 lampu, menggunakan jenis lampu TL LED 30 watt.
3. Pada ruangan transit diperlukan 8 lampu, menggunakan jenis lampu *highbay* 100 W.
4. Pada ruang tamu diperlukan 4 lampu, menggunakan jenis lampu *down light* 9 W.
5. Pada ruang *meeting* diperlukan 6 lampu, menggunakan jenis lampu *down light* 15 W.
6. Pada toilet diperlukan 1 lampu, menggunakan jenis lampu *down light* 9 W.
7. Jumlah konsumsi daya yang diperlukan gedung adalah sebesar 27.815 W.

Ningsar. (2013). Perhitungan dan rancangan penerangan buatan pada ruang dubbing suatu studio produksi film (Calculation and design of artificial lighting system of a dubbing room). *Jurnal Arsitektur DASENG*, 2(1), 67–73.

Ucapan Terimakasih

Pada kesempatan kali ini, penyusun mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng. selaku Ketua Prodi Program Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya.
2. Ir. Andrew Joewono, ST., MT., IPU., ASEAN Eng., APEC Eng. selaku dosen pembimbing yang telah membimbing penulis hingga selesainya laporan studi kasus ini.
3. Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya beserta staff.
4. Kedua orang tua yang telah mendukung dan *support* saya agar bisa menyelesaikan program insinyur ini dengan baik.
5. Rekan-rekan Program Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya yang saling *support*.
6. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu, yang telah banyak memberi dukungan, arahan, dan bantuan.

Penulis menyadari adanya keterbatasan di dalam penyusunan laporan studi kasus ini. Besar harapan penulis akan saran dan kritik yang sifatnya membangun. Selanjutnya, semoga tulisan ini dapat bermanfaat.

Ucapan terimakasih ditujukan kepada orang-orang yang berperan penting membantu proyek penulis. Ucapan terimakasih juga dapat ditujukan kepada instansi yang mendanai proyek penulis.

Referensi

- Badan Standardisasi Nasional. (2000). *SNI 03-6197-2000: Konservasi energi pada sistem pencahayaan* (17 hlm.). Badan Standardisasi Nasional.
- Banurea, R. D. U., Simanjuntak, R. E., Siagian, R., & Turnip, H. (2022). *Perencanaan pendidikan*. *Jurnal Pendidikan Sosial dan Humaniora*, 2(1), 88–99.
- Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. (2011). *Persyaratan umum instalasi listrik 2011 (PUIL 2011)* (133 hlm.). Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Hariansyah, M. (2015). Perencanaan dan pemasangan instalasi listrik penerangan dan tenaga di gedung workshop PT Basuh Power Electric. *JuTEKS (Jurnal Teknik Elektro dan Sains)*, 2(2).
- Karyanta, E., Santoso, B., & Tukiman. (2015). Perancangan sistem penerangan bangunan iradiator gamma kapasitas 200 kCi. *Prima*, 12(1), 38–44.
- Kartika, K., Nugroho, D. T., & Zulfa, M. I. (2024). Perencanaan instalasi penerangan pada gedung Fakultas Biologi Universitas Jenderal Soedirman. *Jurnal SINTA: Sistem Informasi dan Teknologi Komputasi*, 1(2), 78–89.



Optimalisasi Pengelolaan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Sampah melalui Perubahan Tata Kelola dari *Open Dumping* menjadi *Sanitary Landfill* pada TPA Belaw Kabupaten Kutai Barat, Kalimantan Timur

Sutrisno^{1,2}, Tarsisius Dwi Wibawa Budianta³

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

² Fungsional PEDAL Ahli Muda Dinas Lingkungan Hidup Kutai Barat, Kaltim

³ Dosen Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ trieso975@yahoo.com.au

Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Belaw merupakan TPA yang dikelola oleh Kabupaten Kutai Barat, dibangun pada tahun 2014, dioperasikan mulai tahun 2015 dengan sistem *open dumping*. Penelitian ini dilaksanakan mulai bulan Juli sampai Oktober 2025 berlokasi di Kabupaten Kutai Barat Kalimantan Timur, menggunakan analisis deskripsi dan *gap analysis*. Penelitian diawali dengan studi literatur dan peraturan terkait. Selanjutnya dilakukan evaluasi kapasitas, luas dan umur operasional TPA, perhitungan kebutuhan waktu untuk melakukan optimalisasi zona I, review dokumen *Detail Engineering Design* zona II, analisis kebutuhan Standar Operasional Prosedur (SOP) dan melakukan *gap analysis*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa TPA Belaw dioperasikan tahun 2015 dengan luas 0,74 Ha dengan kapasitas 29.600 m³, hingga tahun 2023 volume sampah telah mencapai 33.696 m³. Hasil perhitungan menggunakan foto *drone* dan ArcGIS, bulan Juli 2025 volume sampah di luar zona I mencapai 31.538 m³. Penataan ulang sampah menggunakan 5 unit *Dump Truck* (DT) dengan kapasitas 3 m³/ret, dengan 15 ret/unit/hari membutuhkan waktu 140 hari atau 4,7 bulan. Jika menggunakan 10 unit DT dengan 20 ret/unit/hari maka dibutuhkan waktu 53 hari atau 2,3 bulan. Tindakan perbaikan yang diperlukan adalah penataan ulang sampah, penimbunan tanah secara periodik, pemantauan lingkungan, melengkapi SOP, revitalisasi IPAL, pemasangan ulang *methane capture*, kelembagaan menjadi UPTD dan pelatihan teknis *landfill*.

Kata kunci : *Open Dumping, Sanitary Landfill, Gap Analysis, Foto Drone, ArcGIS, Re-Handling*

Pendahuluan

Sebagian besar TPA di Indonesia masih menggunakan sistem *open dumping*, yaitu pembuangan sampah secara terbuka tanpa pengelolaan yang memadai. Praktik ini menimbulkan berbagai permasalahan, antara lain pencemaran lingkungan yang disebabkan air lindi (*leachate*) merembes mencemari air tanah dan badan air; gangguan kesehatan seperti berkembangnya vektor penyakit (lalat, tikus, nyamuk) dan penyebaran bau; emisi gas rumah kaca yang disebabkan oleh pembusukan sampah menghasilkan gas metana (CH₄) yang berkontribusi besar terhadap pemanasan global; dan penurunan kualitas estetika karena tumpukan sampah terbuka merusak keindahan lingkungan dan menimbulkan konflik sosial.

Sejalan dengan amanat UU No. 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah dan PP No. 81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sejenis Sampah Rumah Tangga, sistem *open dumping* dilarang karena tidak ramah lingkungan. Pemerintah mewajibkan penerapan teknologi pengelolaan yang lebih baik, salah satunya *sanitary landfill*.

Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Belaw merupakan TPA yang dikelola oleh Pemerintah Kabupaten Kutai Barat yang didesain sudah menggunakan sistem *Sanitary Landfill* (Lahan Urug Saniter) dibangun pada tahun 2014, namun

dioperasikan dengan sistem *open dumping*. Pada bulan Maret 2025 sesuai dengan Surat Keputusan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup RI Nomor 375 Tahun 2025 tanggal 17 Maret 2025 tentang Penerapan Sanksi Administratif Berupa Paksaan Pemerintah Penghentian Kepada Pengelolaan Sampah Sistem Pembuangan terbuka (*Open Dumping*) pada Tempat Pemrosesan Akhir Sampah Belaw.

Oleh karena itu, diperlukan tindakan perbaikan langkah strategis untuk mewujudkan pengelolaan sampah yang berkelanjutan, ramah lingkungan, sesuai regulasi nasional, menyelesaikan sanksi administratif pemerintah, sekaligus mendukung pencapaian target pembangunan berkelanjutan.

Metode

Penelitian ini dilaksanakan di TPA Belaw, Kecamatan Barong Tongkok, Kabupaten Kutai Barat, dilakukan mulai bulan Mei sampai Oktober 2025, menggunakan data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari TPA Belaw, sementara data sekunder berasal dari Dinas Lingkungan Hidup dan DPUPR Kabupaten Kutai Barat.

Metode penelitian yang digunakan adalah analisis deskriptif observasional yang dilanjutkan dengan *gap analysis* (analisis kesenjangan) sementara untuk

evaluasi kondisi spasial digunakan foto *drone* dan ArcGIS.

Gap analysis (analisis kesenjangan) mengacu pada UU Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, PP No. 81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis, Peraturan Pemerintah Nomor 27 Tahun 2020 tentang Pengelolaan Sampah Spesifik, Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia nomor 03 tahun 2013 tentang Penyelenggaraan Prasarana dan Sarana Persampahan dalam Penanganan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga, Permen LHK No. 59 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Kegiatan TPA, SNI 03-3241-1994 – Tata Cara Pemilihan Lokasi TPA.

Hasil Kerja

Evaluasi Kondisi Eksisting TPA Belaw

Hasil penelitian menunjukkan bahwa TPA Belaw dibangun tahun 2013 dengan desain *Sanitary Landfill* dengan luas 0,74 Ha dengan kapasitas 29.600 m³, diperasikan dengan sistem *open dumping* mulai tahun 2015. Berdasarkan data sampah hingga tahun 2023 volume sampah telah mencapai 33.696 m³. Hasil perhitungan menggunakan foto *drone* dan ArcGIS, bulan Juli 2025 volume sampah di luar zona I mencapai 31.538 m³.

Kondisi ini yang menyebabkan operasional TPA memerlukan tambahan waktu, tenaga dan biaya untuk melakukan penataan ulang sampah yang di luar zona I untuk ditumpuk ke dalam zona I dan dilakukan penutupan tanah. Hal ini sesuai dengan pendapat Damanhuri (2019) bahwa metode *landfill* memerlukan lebih banyak biaya operasional, namun lebih ramah terhadap lingkungan. Berdasarkan kondisi sampah di luar zona I TPA Belaw secara otomatis menyebabkan penambahan biaya karena melakukan penanganan ulang (*re-handling*). Pembagian Zona TPA Belaw dapat disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pembagian Zona TPA Belaw dan Kondisi Sampah Hasil Foto *Drone* Tanggal 16 Mei 2025

Analisis Kebutuhan Waktu

Penataan ulang sampah menggunakan 5 unit *dump truck* (DT) dengan kapasitas 3 m³/ret, dengan 15 ret/unit/hari membutuhkan waktu 140 hari atau 4,7 bulan. Jika menggunakan 10 unit DT dengan 20 ret/unit/hari, maka

dibutuhkan waktu 53 hari atau 2,3 bulan, secara rinci disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Waktu Penyelesaian Penataan Sampah

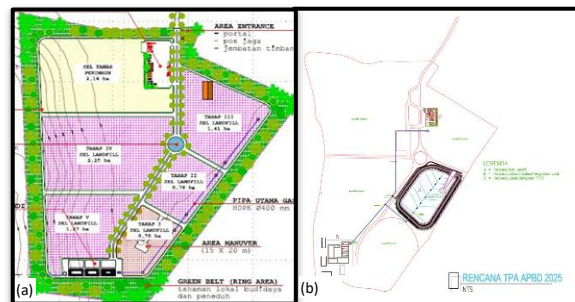
NO	Zona	Volume Sampah (m ³)	Jarak Ke Zona I (m)	DT 136 (3 m ³ /ret)	Jumlah Hari (5 Unit DT @ 10 ret)	Jumlah Hari (10 Unit DT @ 20 ret)
1	Zona II	2.443	100	814	16	4
2	Zona III	15.978	250	5.326	107	27
3	Zona IV	5.740	270	1.913	38	10
4	Zona V	4.748	100	1.583	32	8
5	Bank Soil	2.629	350	876	18	4
Total		31.538	1070	10.513	210	53

Sumber : Hasil Perhitungan dan simulasi di lapangan

Review *Detail Engineering Design* (DED) Zona II

Berdasarkan laporan akhir konsepsi rancangan TPA Belaw Zona II yang telah disusun oleh Dinas PUPR Kabupaten Kutai Barat, dokumen telah dilengkapi dengan : (a) Gambar Kerja, RAB, BQ dan RKS (rencana kerja dan syarat-syarat); (b) Spesifikasi teknis yang berisi paling sedikit detail material yang digunakan, tenaga personil, peralatan, dan kualifikasi badan usaha; dan (c) Dokumen SMKK (Sistem manajemen Keselamatan Konstruksi). *Layout* TPA Belaw dan DED Zona II dapat disajikan pada Gambar 2.

Setelah dilakukan *review*, selanjutnya dilakukan kegiatan penentuan titik awal pekerjaan fisik (MC-O) di lokasi TPA bersama dengan dinas PUPR, Dinas Lingkungan Hidup, kontraktor pelaksana, dan kontraktor pengawas. Kegiatan tersebut dapat disajikan pada Gambar 3.



Gambar 2. Gambar (a) Pembagian Zona TPA Belaw dan (b) Rencana TPA Zona II



Gambar 3. Dokumentasi Kegiatan Lapangan TPA Belaw MC-O Pembangunan Zona II (30 Juli 2025)



Analisis Kebutuhan Standar Operasional Prosedur (SOP)

Analisis kebutuhan SOP mengacu pada UU No. 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, PP No. 81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga, Permen LHK No. P.59/MenLHK/Setjen/Kum.1/2016 tentang Baku Mutu Air Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir, SNI 19-3241-1994: Tata Cara Pemilihan Lokasi TPA dan SNI 03-3242-1994: Tata Cara Teknik Operasional *Landfill*.

Berdasarkan acuan tersebut diperlukan 9 (Sembilan) SOP yaitu : (1) SOP Penerimaan Sampah; (2) SOP Pemilahan sampah; (3) SOP Pengolahan Sampah; (4) SOP Pengelolaan Lindi; (5) SOP Pengelolaan Gas Metana; (6) SOP Pengelolaan Hama dan Bau; (7) SOP Keamanan dan Keselamatan; (8) SOP Penutupan dan Reklamasi; dan (9) SOP *Monitoring* dan Evaluasi.

Analisis Kebutuhan Biaya dan Anggaran

Perubahan operasional menjadi *Controlled/sanitary landfill* memerlukan tambahan biaya berupa biaya pengadaan tanah penutup, pemasangan ulang penangkap gas metana, revitalisasi IPAL, anggaran BBM, dan pembangunan zona II, yang secara lengkap disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kebutuhan Penambahan Anggaran Penutupan Open Dumping TPA Belaw

No.	Komponen Biaya	Total (Rupiah)
1	Pengadaan Tanah Urug	
a.	Jasa Konsultan Perencanaan Teknis	38.904.000,00
b.	Jasa Konsultan Pengawasan Teknis	65.047.999,00
c.	Pekerjaan fisik Tanah Urug	399.989.700,00
2	Pemasangan Ulang Instalasi <i>Methan Capture</i>	
a.	Jasa Konsultan Perencanaan Teknis	35.314.500,00
b.	Jasa Konsultan Pengawasan Teknis	20.650.500,00
c.	Pekerjaan fisik	199.583.976,00
3	Revitalisasi IPAL	
a.	Jasa Konsultan Perencanaan Teknis	29.881.500,00
b.	Jasa Konsultan Pengawasan Teknis	17.473.500,00
c.	Pekerjaan Fisik	166.000.000,00
4	Pembangunan Zona II	25.730.100.000,00
5	Penambahan BBM untuk Penataan Sampah dan Operasional	1.814.611.400,00
TOTAL		28.517.557.075,00

Sumber : DPA-P Tahun 2025 DLH dan DPA tahun 2025 DPUPR Kabupaten Kutai Barat.

Analisis Kesenjangan (*Gap Analysis*)

Untuk mengetahui kesenjangan antara operasional *open dumping* dengan kondisi yang diinginkan (*sanitary/controlled landfill*), dilakukan *gap analysis* terutama dari aspek pengendalian gas metana, penutupan harian/mingguan, drainase permukaan, pengawasan operasional, kelembagaan, *monitoring* kualitas lingkungan, dan rencana penutupan/rehabilitasi.

Hasil analisis kesenjangan pada beberapa aspek tersebut di atas dapat disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Analisis Kesenjangan (*Gap Analysis*) TPA Belaw

No.	Aspek Pengelolaan TPA	Kondisi Saat Ini (<i>Open Dumping</i>)	Kondisi Ideal (<i>Sanitary Landfill</i>)	Gap (<i>Kesenjangan</i>)	Rencana Tindak Lanjut (<i>Action Plan</i>)
1	Sistem Pembuangan	Sampah dibuang tanpa penataan sel	Sampah dibuang per sel dengan lapisan dasar	Tidak ada pemisahan sel dan dasar kedap	Rancang bangun sel <i>landfill</i> baru dengan lapisan kedap
2	Pengendalian Lindi	Kolam IPAL dan akses tidak terawat, belum dilakukan pengambilan dan analisis sample air secara rutin	Ada sistem drainase, kolam pengumpul, dan IPAL lindi	IPAL terawat dengan baik dan dilakukan pengambilan dan analisis sample air secara rutin	Revitalisasi IPAL melalui perawatan kolam dan akses serta dilakukan pengambilan dan analisis sample
3	Pengendalian Gas	Tidak ada sistem ventilasi, gas metana keluar bebas	Ada pipa ventilasi gas dan sistem flare	Potensi gas metana dapat dikendalikan dan dimanfaatkan	Pasang pipa gas venting sederhana (<i>methane capture</i>)
4	Penutupan Harian (<i>Daily Cover</i>) atau 7 (tujuh) hari sekali	belum dilakukan penutupan lapisan tanah	penutupan tanah tiap hari 15-20 cm (<i>sanitary landfill</i>) dan 7 (tujuh) hari sekali (<i>controlled landfill</i>)	bau dan populasi lalat meningkat	Jadwalkan penutupan harian atau 7 (tujuh) hari dengan tanah lokal
5	Drainase Permukaan	Air hujan masuk ke timbunan sampah	Air hujan dialirkan keluar melalui drainase	Tidak ada saluran pengarah air	Bangun drainase keliling TPA terutama zona aktif
6	Pengawasan Operasional	Tidak ada SOP, pengawasan manual	Operasional sesuai SOP dan pemantauan rutin	Tidak ada standar dan data	susun dan terapkan SOP operasional TPA
7	Alat Berat dan Infrastruktur	Alat berat minim, timbangan digital sering rusak dan tidak terkoneksi dengan komputer	Jumlah <i>excavator</i> dan <i>bulldozer</i> cukup, timbangan berfungsi normal, jalan operasional memadai	Kekurangan alat berat dan fasilitas pendukung	Penambahan alat berat dan perbaikan jalan operasional ke zona aktif, perbaikan timbangan dan koneksi ke komputer.
8	Kelembagaan dan SDM	Belum menjadi UPTD, masih di bawah bidang Persampahan, DLH	Menjadi UPTD dan struktur organisasi lengkap dan petugas terlatih	Kelembagaan dan SDM belum kompeten	Tindaklanjuti pengusulan menjadi UPTD dan Pelatihan Pengelolaan TPA dan teknis
9	Monitoring Kualitas Lingkungan	belum dilakukan monitoring kualitas air lindi dan udara	Memiliki data harian, bulanan kualitas air lindi dan ambien	Tidak dilakukan monitoring	monitoring kualitas air, udara, rutin sesuai dokumen lingkungan
10	Rencana Penutupan dan Rehabilitasi	Tidak ada dokumen penutupan	Ada rencana penutupan dan Pasca-TPA	Belum direncanakan	Susun rencana penutupan sesuai dengan pedoman KLH

Rekomendasi Solusi

Beberapa hal dapat direkomendasikan untuk perbaikan operasional TPA Belaw adalah perubahan operasional *open dumping* menjadi *controlled landfill* atau *sanitary landfill*, Penataan ulang sampah yang ditempatkan di luar zona I, penimbunan/pelapisan tanah pada zona I, secara periodik, pemantauan kualitas air lindi secara rutin setiap bulan, pemantauan kualitas Udara ambien secara rutin setiap 6 (enam) bulan, melengkapi dan menerapkan SOP, perbaikan/revitalisasi IPAL/IPL, pemasangan ulang instalasi *methane capture*, tindak lanjut pengusulan TPA Belaw menjadi UPTD, serta melengkapi pelatihan Pengelolaan TPA dan teknis *landfill* terhadap petugas TPA.

Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat disampaikan dari hasil penelitian ini adalah:

1. TPA Belaw dibangun tahun 2013 dengan kapasitas 29.600 m³, tahun 2023 volume total sampah mencapai 33.696 m³, sehingga perlu membangun zona II;
2. Berdasarkan analisis pada ArcGIS, foto *drone* dan pengukuran tinggi di lapangan, volume sampah di luar zona I sebesar 31.538 m³;
3. Penataan ulang sampah yang berada di luar zona I jika menggunakan 5 unit *Dump Truck* (DT) berkapasitas 3

- m³/ret dan 15 ret/hari diperlukan 140 hari atau 4,7 bulan dan jika menggunakan 10 unit DT dengan retase 20 ret/hari diperlukan waktu 53 hari atau 2,3 bulan;
4. Kebutuhan SOP yang perlu dilengkapi : (1) SOP Pengolahan Sampah; (2) SOP Pengelolaan Lindi; (3) SOP Pengelolaan Gas Metana; (4) SOP Pengelolaan Hama dan Bau; (5) SOP Keamanan dan Keselamatan; (6) SOP Penutupan dan Reklamasi; dan (7) SOP *Monitoring* dan Evaluasi
 5. Penambahan biaya untuk pengadaan tanah, pemasangan ulang penangkap gas metana, revitalisasi IPAL, penambahan anggaran BBM, dan pembangunan zona II sebesar Rp28.517.557.075,-;
 6. Berdasarkan hasil gap analisis, tindakan yang diperlukan untuk perbaikan pengelolaan TPA Belaw adalah penataan ulang sampah yang ditempatkan di luar zona I, penimbunan tanah pada zona I, secara periodik, pemantauan kualitas air lindi secara rutin setiap bulan, melakukan pemantauan kualitas udara ambien secara rutin setiap 6 (enam) bulan, melengkapi dan menerapkan SOP, revitalisasi IPAL, pemasangan ulang instalasi *methane capture*, meningkatkan kelembagaan TPA Belaw menjadi UPTD, serta membekali petugas dengan pelatihan pengelolaan TPA dan teknis *landfill*.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada Ketua Program Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya (UKWMS), Dosen Pembimbing dan semua sivitas akademik UKWMS, Kepala Dinas Lingkungan Hidup, Kepala Bidang PSLB3PK Dinas Lingkungan Hidup dan staf, Dinas PUPR Kutai Barat beserta PPTK Kegiatan Pembangunan Zona II, Kepala Bapeda-Litbang Kabupaten Kutai Barat yang telah berkontribusi terhadap pelaksanaan proyek ini.

Semoga tulisan ini bermanfaat bagi perbaikan pengelolaan TPA Belaw dan bagi siapa saja yang membacanya.

Referensi

- Chalid, S., & Rasman. (2019). Studi kualitas udara ambien sulfur dioksida (SO₂) di TPA Tamangapa Makassar. *Jurnal Sulolipu: Media Komunikasi Sivitas Akademika dan Masyarakat*, 19(1), 83–88.
- Damanhuri, E. (2008). *Diktat landfilling limbah*. Bandung: FTSL ITB.
- Damanhuri, E. (2022). *Seminar nasional pengelolaan sampah terpadu*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Damanhuri, E., & Padmi, T. (2005). *Diktat kuliah pengelolaan sampah*. Bandung: Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung.
- Damanhuri, E., & Padmi, T. (2010). *Diktat kuliah TL-3104 pengelolaan sampah*. Bandung: Teknik Lingkungan ITB.
- Damanhuri, E., & Padmi, T. (2019). *Pengelolaan sampah terpadu* (Cetakan ke-2). Bandung: ITB Press.
- Direktorat Jenderal Cipta Karya. (2013). *Pedoman pengoperasian tempat pemrosesan akhir (TPA)*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum.
- 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.
- Handono, M. (2010). *Model pengelolaan TPA sampah secara berkelanjutan*. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Harjanti, I., & Anggraini, P. (2020). Pengelolaan sampah di tempat pembuangan akhir (TPA) Jatibarang Kota Semarang. *Jurnal Planologi*, 17(2), 185–197.
- Hidayatullah, F., & Mulasari, S. (2020). Literature review: Gangguan saluran pernapasan akibat pencemaran udara di lingkungan tempat pembuangan akhir (TPA). *Jurnal Kesehatan*, 13(2), 119–130.
- Hidayati, D. Y. (2020, November 9). *Analisis risiko kesehatan lingkungan terhadap pekerja yang terpapar nitrogen dioksida di TPA Cipayung Depok*. <https://repository.uinikt.ac.id/dspace/handle/123456789/66386>
- Izharsyah, J. (2020). Analisis strategis Pemko Medan dalam melakukan sistem pengelolaan sampah berbasis open dumping menjadi sanitary landfill. *Jurnal Ilmiah Muqoddimah*, 4(2), 109–117.
- Kasam. (2011). Analisis risiko lingkungan pada tempat pembuangan akhir (TPA). *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, 3(1), 19–30.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2023). *Data pengelolaan sampah nasional*. <https://sipsn.menlhk.go.id>
- Kementerian Lingkungan Hidup. (2025, September 12). *Akhiri open dumping sampah, bangun peradaban harmonis dengan lingkungan, alam, dan budaya*. <https://www.kemenvh.go.id/news/detail/akhiri-open-dumping-sampah-bangun-peradaban-harmonis-dengan-lingkungan-alam-dan-budaya>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 14 Tahun 2021 Tentang Pengelolaan Sampah Pada Bank Sampah*.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2013). *Peraturan Menteri PUPR Nomor 03/PRT/M/2013 Tentang Penyelenggaraan Prasarana Dan Sarana Persampahan Dalam Penanganan Sampah Rumah Tangga Dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga*.
- Kementerian Pendayagunaan Aparatur Negara dan Reformasi Birokrasi Republik Indonesia. (2012). *Peraturan Menteri PANRB Nomor 35 Tahun 2012 Tentang Pedoman Penyusunan Standar Operasional Prosedur Administrasi Pemerintahan*.
- Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. (2005). *Kajian penyebab tragedi TPA Leuwigajah*.
- Mahyudin, R. (2017). Kajian permasalahan pengelolaan sampah dan dampak lingkungan di TPA. *Jukung: Jurnal Teknik Lingkungan*, 3(1), 66–74.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2012). *Peraturan Pemerintah Nomor 81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga Dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga*.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2008). *Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah*.
- Puspa, A. (2022, November 23). KLHK: 35% TPA di Indonesia masih terapkan sistem open dumping. *Media Indonesia*. <https://mediaindonesia.com/humaniora/539547/klhk->



35-tpa-di-indonesia-masih-terapkan-sistem-open-dumping

- Rachman, M. R., et al. (2024). *Optimalisasi sistem pengelolaan sampah perkotaan: Strategi dan implementasi*. Makassar: CV Tohar Media.
- Ridwan, A. (2020). *Penanganan dan pengelolaan sampah (Studi implementasi kebijakan pengelolaan sampah di Kabupaten Banjar, Kalimantan Selatan)*. Yogyakarta: Bintang Pustaka Madani.
- Soemarwoto, O. (2001). *Ekologi, lingkungan hidup, dan pembangunan*. Jakarta: Djambatan.
- Subarsono, A. G. (2008). *Analisis kebijakan publik*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Sugiharto. (1987). *Dasar-dasar pengolahan air limbah*. Jakarta: UI Press.
- Thobanoglous, G., & Theisen, H. (2002). *Handbook of solid waste management*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Winarno, B. (2005). *Teori dan proses kebijakan publik*. Yogyakarta: MedPress.

Analisis Kebutuhan Perjalanan Kereta Api Bengawan Relasi Purwosari – Pasarsenen Berdasarkan Permintaan Pengguna Jasa

Windi Nopriyanto^{1,2} Andrew Joewono¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

² Politeknik Perkeretaapian Indonesia Madiun

✉ windi.nopriyanto@gmail.com

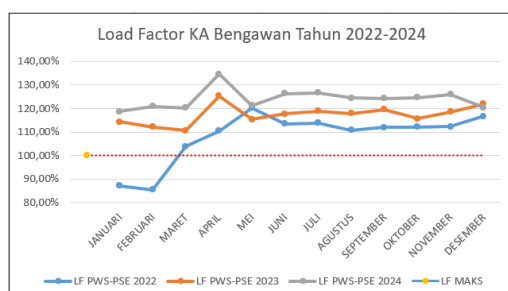
✉ andrew_sby@ukwms.ac.id

KA Bengawan merupakan layanan kelas ekonomi dengan relasi Purwosari–Pasar Senen yang diminati masyarakat karena tarifnya yang terjangkau dengan rata-rata *load factor* tahun 2024 sebesar 124%. Penelitian ini bertujuan mengkaji kebutuhan perjalanan KA Bengawan tahun 2025–2027 dan menganalisis karakteristik penumpang serta perjalanannya. Analisis yang dilakukan mencakup analisis deskriptif karakteristik penumpang dan perjalanan, perhitungan *load factor*, kebutuhan perjalanan tahun 2025, serta peramalan jumlah penumpang tahun 2026–2027 menggunakan metode *Holt's Winters Exponential Smoothing* model aditif. Hasil penelitian menunjukkan mayoritas penumpang adalah laki-laki usia 30–34 tahun, bekerja sebagai karyawan swasta, berpenghasilan di atas Rp3.500.000, dengan tujuan perjalanan untuk liburan. Pada tahun 2025, satu perjalanan KA Bengawan masih mencukupi. Namun, mulai Februari 2026 hingga Desember 2027 diperlukan penambahan frekuensi menjadi dua perjalanan per hari dimana masih sesuai dengan kapasitas lintas yang tersedia.

Kata kunci: Kereta Api, *Load Factor*, Kebutuhan Perjalanan, Peramalan

Pendahuluan

Peran pemerintah dalam menciptakan layanan publik yang berkualitas sangatlah penting, termasuk di antaranya layanan transportasi umum, seperti kereta api (Nurvianti, Setiawan, & Bachtiar, 2019). PT Kereta Api Indonesia (selanjutnya disebut PT KAI) merupakan salah satu perusahaan transportasi darat yang melayani perjalanan kereta api jarak jauh (Sitepu, Sutarman, & Siregar, 2024). Sebagai badan usaha penyelenggara sarana perkeretaapian atau operator, PT KAI memiliki beberapa sarana kereta sebagai angkutan orang salah satunya adalah kereta api Bengawan. KA Bengawan merupakan salah satu dari pilihan layanan KA Ekonomi jarak jauh yang melayani relasi Purwosari – Pasarsenen (PP) (Bramasta & Hardiyanto, 2023). Kereta ini memiliki jarak 567,026 kilometer, perjalanan dari Stasiun Purwosari berangkat mulai jam 22.45 – 07.34 kemudian dari Stasiun Pasar Senen kembali ke Stasiun Purwosari dimulai jam 08.55 – 18.05 dengan waktu perjalanan sekitar 9 jam 10 menit (Gapeka, 2025). KA Bengawan termasuk dalam salah satu kereta jarak jauh yang menerima subsidi *Public Service Obligation* (selanjutnya disebut PSO). KA Bengawan memiliki tingkat peminat yang tinggi. Ditambah dengan kereta ini merupakan satu-satunya kereta ekonomi PSO yang melayani relasi Purwosari – Pasar Senen.



Gambar 1. Load Factor KA Bengawan

Tingginya minat penumpang dapat dibuktikan pada Gambar 1 yang menunjukkan bahwa *load factor* KA Bengawan pada tahun 2022–2024 melebihi garis batas kapasitas angkut yang berwarna merah yaitu 100%. Dalam (Keputusan Direksi PT Kereta Api Indonesia, 2015) tentang Syarat-Syarat dan Tarif Angkutan Kereta Api Penumpang menetapkan kapasitas maksimum sesuai dengan jumlah tempat duduk tersedia. Berdasarkan grafik okupansi penumpang, didapatkan hasil rata-rata okupansi pada tahun 2024 sebesar 124%. Pembukaan Stasiun Kebasen di Kabupaten Banyumas pada tanggal 18 Desember 2024 juga dapat menjadi salah satu faktor yang berkontribusi terhadap potensi peningkatan permintaan KA Bengawan (Zain & Krisiandi, 2024). Hal ini berpotensi semakin meningkatkan minat masyarakat terhadap KA Bengawan sebagai moda transportasi utama untuk perjalanan jarak jauh.

Selain itu, untuk mendapatkan pemahaman yang lebih mendalam mengenai permintaan penumpang KA Bengawan, akan dilakukan survei terhadap permintaan yang ada saat ini. Survei ini bertujuan untuk mengidentifikasi tingkat permintaan penumpang saat ini, sehingga dapat memberikan data mengenai volume permintaan perjalanan. Berdasarkan beberapa fenomena yang telah dipaparkan, dapat disimpulkan bahwa minat, permintaan, dan kebutuhan masyarakat terhadap KA Bengawan sangat tinggi dan terus meningkat. Hal ini dibuktikan dengan tingginya okupansi penumpang dan keterbatasan tiket kereta yang selalu habis terjual jauh sebelum hari keberangkatan. Selain itu, pembukaan Stasiun Kebasen di Banyumas juga diperkirakan dapat meningkatkan permintaan terhadap layanan KA Bengawan, karena memberikan akses yang lebih mudah bagi masyarakat di wilayah tersebut. Untuk menjaga dan menstabilkan frekuensi perjalanan setiap hari

diperlukan adanya penyesuaian guna memenuhi kebutuhan perjalanan.

Metode

Metode pengumpulan data primer diperoleh melalui survei kuesioner terhadap 412 penumpang, yang ditentukan berdasarkan metode *Krejcie-Morgan*. Adapun data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini mencakup:

- Data jumlah penumpang KA Bengawan tahun 2022 – 2024
- Grafik perjalanan kereta api dan kapasitas lintas
- Kapasitas angkut sarana KA Bengawan

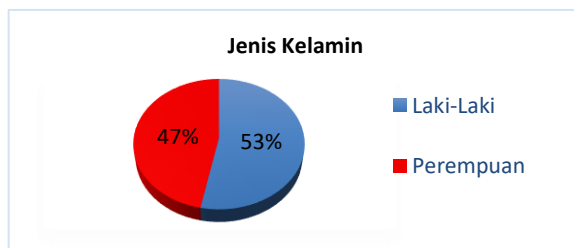
Metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini meliputi analisis deskriptif untuk menggambarkan karakteristik penumpang dan perjalanan, perhitungan *load factor*, analisis kebutuhan perjalanan, serta peramalan jumlah penumpang menggunakan metode *Holt's Winters Exponential Smoothing* model aditif.

Hasil Kerja

Karakteristik Penumpang dan Karakteristik Perjalanan

a. Jenis Kelamin

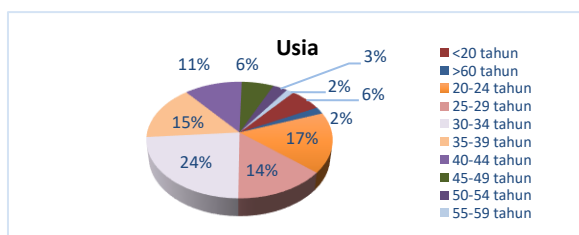
Berdasarkan hasil survei dapat diidentifikasi bahwa penumpang KA Bengawan sebanyak 219 laki-laki dengan presentase 53% dan 193 perempuan dengan presentase 47%.



Gambar 2. Diagram Responden Berdasarkan Jenis Kelamin

b. Usia

Berdasarkan hasil survei, kelompok usia yang paling dominan adalah 30–34 tahun, yaitu sebanyak 97 orang (24%). Kelompok usia berikutnya terdiri dari penumpang berusia 20–24 tahun sebanyak 69 orang, 35–39 tahun sebanyak 63 orang, dan 25–29 tahun sebanyak 58 orang. Adapun kelompok usia dengan jumlah penumpang paling sedikit adalah usia 55–59 tahun, yaitu sebanyak 6 orang (2%). Hasil ini menunjukkan bahwa KA Bengawan umumnya digunakan oleh penumpang dari kelompok usia produktif.

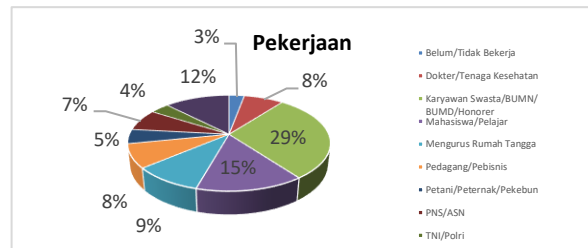


Gambar 3. Diagram Responden Berdasarkan Usia

c. Pekerjaan

Pekerjaan yang paling banyak berdasarkan hasil survei karakteristik penumpang KA Bengawan adalah karyawan

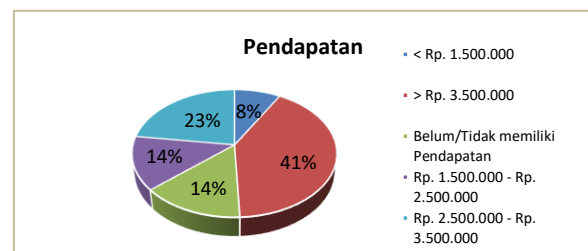
swasta/BUMN/BUMD/honorer, yaitu sebanyak 121 orang (29%). Sedangkan yang paling sedikit adalah belum/tidak bekerja sebanyak 12 orang (3%).



Gambar 4. Diagram Responden Berdasarkan Pekerjaan

d. Pendapatan

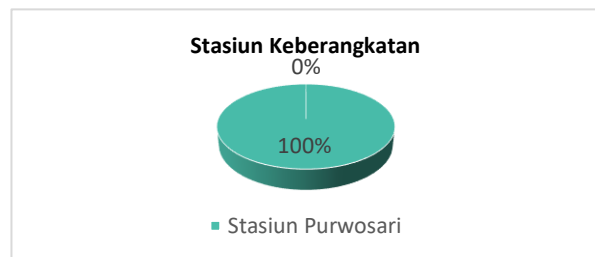
Berdasarkan data yang didapatkan dari hasil survei pendapatan paling besar dari penumpang KA Bengawan adalah > Rp. 3.500.000, yaitu sebanyak 169 orang (41%). Sedangkan yang paling sedikit adalah < Rp. 1.500.000, yaitu sebanyak 34 orang (8%).



Gambar 5. Diagram Responden Berdasarkan Pendapatan

e. Stasiun Keberangkatan

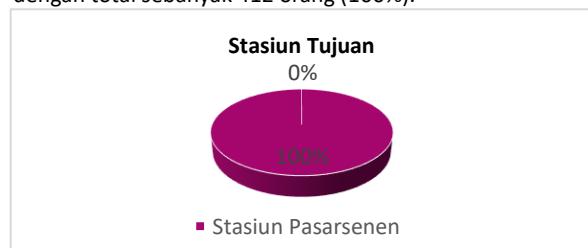
Berdasarkan populasi dan sampel untuk survei kuesioner seluruh responden berangkat dari Stasiun Purwosari menurut arah asal KA Bengawan dengan jumlah responden 412 orang (100%).



Gambar 6. Diagram Responden Berdasarkan Stasiun Keberangkatan

f. Stasiun Tujuan

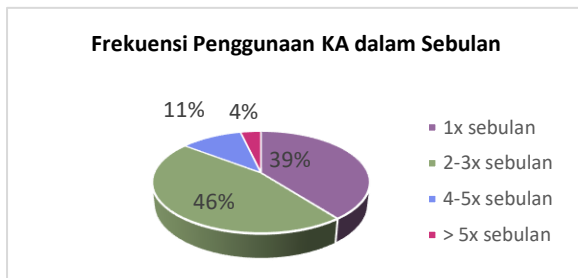
Berdasarkan data populasi dan sampel pada survei kuesioner, seluruh responden melakukan perjalanan dengan tujuan akhir di Stasiun Pasar Senen, yang merupakan stasiun tujuan akhir KA Bengawan sesuai dengan relasi resminya, dengan total sebanyak 412 orang (100%).



Gambar 7. Diagram Responden Berdasarkan Stasiun Tujuan

g. Frekuensi Perjalanan

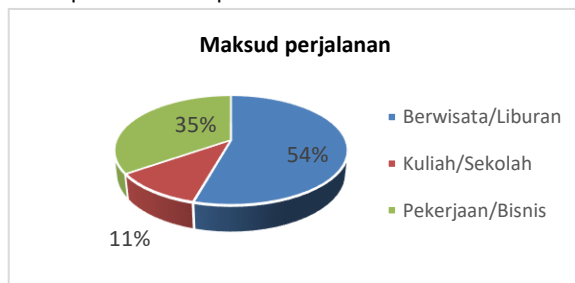
Berdasarkan data hasil pelaksanaan survei kuesioner menunjukkan bahwa mayoritas penumpang KA Bengawan menggunakan layanan KA Bengawan 2-3 kali dalam satu bulan dengan jumlah sebanyak 189 orang (46%).



Gambar 8 Diagram Responden Berdasarkan Frekuensi Perjalanan

h. Maksud Perjalanan

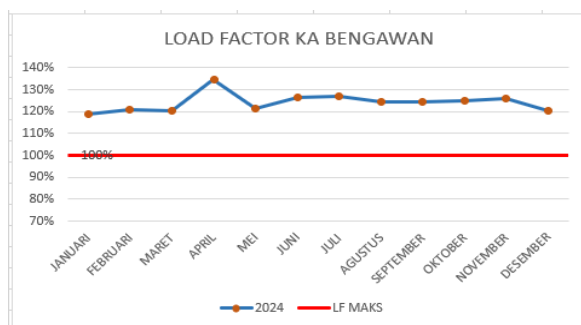
Berdasarkan hasil survei yang diperoleh, mayoritas penumpang Kereta Api Bengawan melakukan perjalanan dengan tujuan berwisata atau berlibur, yaitu sebanyak 224 penumpang atau sekitar 54% dari total responden. Sementara itu, 143 penumpang (35%) menggunakan kereta untuk keperluan pekerjaan atau bisnis, dan 45 penumpang (11%) melakukan perjalanan untuk pendidikan seperti kuliah atau sekolah.



Gambar 9. Diagram Responden Berdasarkan Maksud Perjalanan

Perhitungan Load Factor

Load factor merupakan indikator yang digunakan untuk mengukur efektivitas penggunaan kapasitas angkut suatu sarana transportasi, termasuk pada layanan kereta api. Perhitungan load factor dilakukan menggunakan rumus (1) dengan bantuan Microsoft Excel. Berikut merupakan plotting hasil perhitungan load factor.



Gambar 10. Plotting Data Load Factor

Perhitungan Kebutuhan Perjalanan

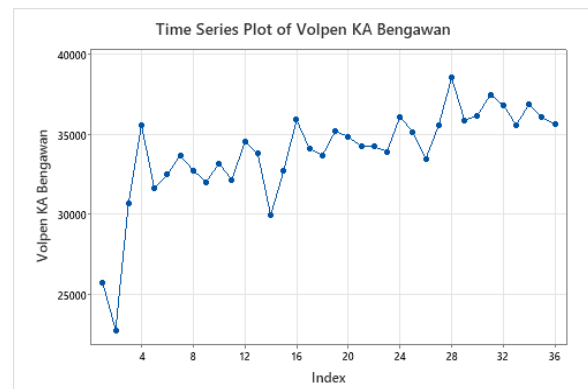
Untuk menghitung kebutuhan perjalanan, perlu mengetahui jumlah penumpang dan kapasitas tempat duduk dari KA Bengawan. Perhitungan kebutuhan perjalanan menggunakan rumus (2) dengan bantuan Microsoft Excel. Berikut merupakan hasil perhitungan kebutuhan perjalanan tahun 2025.

Tabel 8. Kebutuhan Perjalanan Tahun 2025				
No	Bulan	Jumlah Penumpang	Kapasitas	Kebutuhan Perjalanan
1	Januari	34716	29574	1
2	Februari	32338	26712	1
3	Maret	37013	29574	1
4	April	41124	28620	1
5	Mei	38767	29574	1
6	Juni	39448	28620	1
7	Juli	41226	29574	1
8	Agustus	41015	29574	1
9	September	40604	28620	1
10	Oktober	41853	29574	1
11	November	41571	28620	1
12	Desember	43383	29574	1

Perhitungan tersebut mengacu pada kapasitas angkut maksimum (100%). Hasilnya menunjukkan kebutuhan perjalanan sebanyak 1 kali perjalanan per hari, yang berarti jadwal perjalanan saat ini sudah mencukupi untuk memenuhi permintaan penumpang di tahun 2025

Peramalan Jumlah Penumpang

Plotting data dilakukan menggunakan software Minitab untuk mengidentifikasi jenis data yang akan digunakan untuk peramalan, seperti tren, musiman, horizontal, siklus dan acak. Berikut hasil Identifikasi pola data.

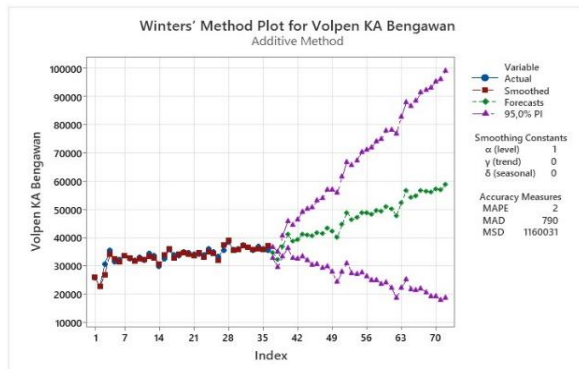


Gambar 11. Plotting Volume Penumpang Tahun 2022-2024

Berdasarkan hasil identifikasi pola data, data volume penumpang KA Bengawan dipengaruhi oleh kombinasi pola musiman dan pola tren. Metode Holt's-Winters Exponential Smoothing memiliki dua jenis model peramalan, yaitu model aditif dan model multiplikatif. Untuk menentukan model yang paling sesuai, dilakukan perhitungan berdasarkan nilai MAPE (Mean Absolute Percentage Error), MAD (Mean Absolute Deviation), dan MSD (Mean Squared Deviation), di mana model terbaik ditunjukkan oleh nilai ketiga ukuran kesalahan tersebut yang paling kecil. Penentuan nilai error

dilakukan menggunakan *software Eviews dan Minitab*. Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan MAPE terendah dari model aditif dengan nilai MAPE sebesar 2%, MAD sebesar 790, dan MSD sebesar 1160031. Nilai MAPE yang rendah menunjukkan bahwa model ini memiliki tingkat kesalahan peramalan yang kecil (Nurvianti, Setiawan, & Bachtiar, 2019). Oleh karena itu, metode dan model peramalan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Holt's-Winters Exponential Smoothing (additive)*.

Hasil Perhitungan



Gambar 12. Hasil Peramalan Jumlah Penumpang

Berdasarkan hasil peramalan tersebut volume penumpang KA Bengawan diproyeksikan mengalami peningkatan secara perlahan, sejalan dengan data aktual. Oleh karena itu, perhitungan kebutuhan perjalanan di masa depan diperlukan guna memperkirakan potensi kebutuhan perjalanan tambahan. Berikut merupakan hasil perhitungan kebutuhan perjalanan tahun 2026-2027 menggunakan *Microsoft Excel*.

Dari hasil perhitungan dapat diidentifikasi pada bulan Januari tahun 2026, frekuensi perjalanan satu kali per hari masih mampu mengakomodasi jumlah penumpang. Namun, mulai Februari 2026 - Desember 2027, diperlukan penambahan satu kali perjalanan tambahan per hari, menjadi dua kali perjalanan setiap harinya. Penambahan frekuensi perjalanan berkaitan dengan ketersediaan kapasitas lintas di jalur tersebut. Kapasitas lintas merujuk pada kemampuan suatu jalur untuk menampung perjalanan kereta api, yang biasanya diukur dalam periode waktu 24 jam atau 1440 menit (Erlangga, Istiantara, & Nugroho, 2020). Berdasarkan Gapeka 2025 kapasitas lintas di lintas Purwosari-Pasar Senen masih tersedia dan cukup untuk memungkinkan penambahan perjalanan. Maka dari itu, secara operasional masih terdapat kapasitas yang memadai untuk mendukung adanya penambahan perjalanan KA Bengawan.

Tabel 9. Kebutuhan Jumlah Perjalanan KA Begawan Tahun 2026-2027

No	Periode	Hasil Perhitungan Peramalan Jumlah Penumpang	Kebutuhan Perjalanan
1	Jan-26	42469	1
2	Feb-26	40090	2
3	Mar-26	44766	2
4	Apr-26	48876	2
5	Mei-26	46519	2
6	Jun-26	47200	2

7	Jul-26	48978	2
8	Ags-26	48767	2
9	Sep-26	48356	2
10	Okt-26	49605	2
11	Nov-26	49323	2
12	Des-26	51135	2
13	Jan-27	50220	2
14	Feb-27	47842	2
15	Mar-27	52518	2
16	Apr-27	56628	2
17	May-27	54271	2
18	Jun-27	54952	2
19	Jul-27	56730	2
20	Aug-27	56519	2
21	Sep-27	56108	2
22	Oct-27	57357	2
23	Nov-27	57075	2
24	Dec-27	58887	2

Kesimpulan

Karakteristik penumpang KA Bengawan mayoritas berjenis kelamin laki-laki berusia 30–34 tahun, bekerja sebagai karyawan swasta, BUMN, BUMD, atau honorer, serta memiliki penghasilan di atas Rp3.500.000. Sebagian besar penumpang melakukan perjalanan sebanyak dua hingga tiga kali dalam sebulan dengan tujuan berwisata atau berlibur. Seluruh responden dalam penelitian ini berangkat dari Stasiun Purwosari dan memiliki tujuan akhir di Stasiun Pasar Senen.

Berdasarkan hasil analisis, kebutuhan perjalanan KA Bengawan pada tahun 2025 masih dapat dipenuhi dengan satu perjalanan per hari. Namun, hasil peramalan jumlah penumpang menunjukkan adanya peningkatan signifikan mulai Februari 2026, sehingga diperlukan penambahan frekuensi perjalanan menjadi dua kali per hari untuk menjaga kualitas layanan dan menghindari kelebihan kapasitas. Berdasarkan hasil analisis kapasitas lintas, diketahui bahwa jalur Purwosari–Pasar Senen masih memiliki kapasitas yang mencukupi untuk mendukung penambahan frekuensi perjalanan tersebut.

Ucapan Terimakasih

Penyelesaian penelitian ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada:

1. Direktur dan sivitas akademika Politeknik Perkeretaapian Indonesia Madiun;
2. Kepala Daerah Operasi (DAOP) 6 Yogyakarta PT. Kereta Api Indonesia (Persero) beserta seluruh jajaran;
3. Bapak Dr. Ir. Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng. selaku Kepala Program Studi Profesi Insinyur;
4. Bapak Ir. Andrew Joewono, S.T., M.T., IPU., ASEAN Eng., APEC Eng. selaku dosen pembimbing;
5. Istri dan Anakku serta Orang Tua tercinta yang selalu memberikan doa, dukungan dan motivasi, sehingga dapat terselesaikannya artikel penelitian ini;
6. Semua pihak yang telah membantu penulis.



Referensi

- Anggorowati, E. A., Nurfadhilla, A. M., Wibowo, A. W., & Anggana, E. P. (2021). Perpanjangan lintas dan rencana pola operasi Kereta Api Lembah Anai wilayah Divre II Sumatera Barat. *Jurnal Penelitian Transportasi Darat*, 23(1), 72-78.
- Bramasta, D. B., & Hardiyanto, S. (2023, May 30). Jadwal terbaru Kereta Api Bengawan 2023 Purwosari–Pasar Senen PP. *Kompas*.
<https://www.kompas.com/tren/read/2023/05/30/210000965/jadwal-terbaru-kereta-api-bengawan-2023-purwosari-pasar-senen-pp?page=all>
- Darmadi, & Wiryawan, M. R. (2021). Analisis kebutuhan perjalanan terhadap demand penumpang KA Bandara Soekarno Hatta. *Jurnal Teknik Sipil Arsitektur*, 20(1), 53-64. <https://doi.org/10.54564/jtsa.v20i1.63>
- Erlangga, A. W., Istiantara, D. T., & Nugroho, I. (2020). Analisis load factor perjalanan KRL Commuter Line berdasarkan titik jenuh lintas (studi kasus lintas Bogor–Manggarai). *Jurnal Perkeretaapian Indonesia*, 4(2), 83–90. <https://doi.org/10.37367/jpi.v4i2.99>
- Febriyanti, A. N., & Rifai, N. K. (2022). Metode triple exponential smoothing Holt–Winters untuk peramalan jumlah penumpang kereta api di Pulau Jawa. *Bandung Conference Series: Statistics*, 2(2), 152-158. <https://doi.org/10.29313/bcss.v2i2.3560>
- Gapeka. (2025). *Grafik perjalanan kereta api pada jaringan jalur kereta api nasional di Jawa tahun 2025*.
- Heizer, J., & Render, B. (2015). *Manajemen operasi: Manajemen keberlangsungan dan rantai pasokan*. Jakarta: Salemba Empat.
- Herjanto, E. (2007). *Manajemen operasi* (Edisi ke-3). Jakarta: PT Gramedia.
- Imron, N. A., & Aghastya, A. (2020). Evaluasi tarif kereta api perintis dengan metode ATP-WTP (Studi kasus: KA Jenggala). *Jurnal Perkeretaapian Indonesia*, 4(1), 43–52. <https://doi.org/10.37367/jpi.v4i1.86>
- Keputusan Direksi PT Kereta Api Indonesia. (2015). *Syarat-syarat dan tarif angkutan kereta api penumpang*. PT Kereta Api Indonesia (Persero).
- Lusiana, A., & Yuliarty, P. (2020). Penerapan metode peramalan (forecasting) pada permintaan atap di PT X. *Jurnal Teknik Industri ITN Malang*, 10(1), 11-20. <https://doi.org/10.36040/industri.v10i1.2530>
- Mutiarasari, K. A. (2024, November 12). Tentang kereta api subsidi: Aturan hingga daftar perjalanan di 2024. *detikNews*. <https://news.detik.com/berita/d-7634163/tentang-kereta-api-subsidi-aturan-hingga-daftar-perjalanan-di-2024>
- Nurvianti, I., Setiawan, B. D., & Bachtiar, F. A. (2019). Perbandingan peramalan jumlah penumpang keberangkatan kereta api di DKI Jakarta menggunakan metode double exponential smoothing dan triple exponential smoothing. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 3(6), 5257-5263.
- Pratama, U., Ardiansyah, A. H., & Schouten, F. (2024). Kajian tingkat okupansi Kereta Api Penataran relasi Sidoarjo–Malang. *Jurnal Penelitian Sekolah Tinggi Transportasi Darat*, 11(2), 1–11.
- Setiawan, I. (2021). Rancang bangun aplikasi peramalan persediaan stok barang menggunakan metode weighted moving average (WMA) pada Toko Barang XYZ. *Jurnal Teknik Informatika*, 13(3), 1-9.
- Sugiyono. (2022). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Wasita, A. (2023, December 11). KA relasi Stasiun Purwosari Solo–Pasarsenen jadi favorit penumpang. *ANTARA News*.
<https://www.antaranews.com/berita/3866376/ka-relasi-stasiun-purwosari-solo-pasarsenen-jadi-favorit-penumpang>

Optimalisasi Kadar FFA pada PFAD pada Proses Deodorization di Proses Refinery CPO

Kevin¹ Martha Kartika Sari¹ Shella
Permatasari Santoso¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ 23kevinsantoso@gmail.com

Proses *refinery Crude Palm Oil* (CPO) terdiri atas beberapa tahap utama, yaitu *degumming*, *bleaching*, *filtration*, dan *deodorization*. Tahap *deodorization* berperan penting dalam menurunkan kadar *Free Fatty Acid* (FFA) sehingga dihasilkan *Refined Bleached Deodorized Palm Oil* (RBDPO) dan produk samping *Palm Fatty Acid Distillate* (PFAD). Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan kondisi operasi *deodorization* guna meningkatkan kadar FFA pada PFAD melalui pengaturan suhu, tekanan vakum, dan laju alir PFAD. Parameter yang dikaji meliputi suhu minyak masuk *pre-stripper* (240–260°C), tekanan vakum (0,1–0,3 kPa), suhu PFAD (63–65°C), serta tekanan *steam sparging*. Hasil menunjukkan bahwa kadar FFA tertinggi pada PFAD dicapai pada suhu PFAD 63–65°C, tekanan vakum 0,3 kPa, dan laju alir PFAD tinggi, dengan tetap mempertahankan kualitas RBDPO. Optimasi ini berpotensi meningkatkan nilai ekonomi PFAD yang biasa digunakan sebagai bahan baku industri biodiesel dan oleokimia.

Kata kunci: *Palm Fatty Acid Distillate*, *Free Fatty Acid*, *Deodorization*, *Refinery*

Pendahuluan

Refinery merupakan suatu tahapan paling utama dalam proses pengolahan di industri kelapa sawit. Terdapat 2 jenis *refinery* yang sering digunakan secara umum, yaitu *physical refinery* dan *chemical refinery*. *Physical refinery* adalah jenis *refinery* tanpa menggunakan tahapan netralisasi sedangkan *chemical refinery* menggunakan tahapan netralisasi dengan bantuan senyawa basa untuk menghasilkan sabun. *Refinery* seringkali disebut sebagai tahapan pemurnian *Crude Palm Oil* (CPO). Pada umumnya, komposisi CPO memiliki nilai yang berbeda-beda. Berikut ini adalah komposisi CPO menurut (Aparamarta et al, 2025).

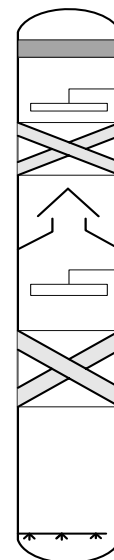
Tabel 1. Komposisi CPO

Komponen	Komposisi
Trigliserida	>90%
Digliserida	5,3 – 7,7%
Monogliserida	0,21 – 0,34%
Free Fatty Acid (FFA)	2,4 – 4,5%
Senyawa lain	~1%

Berdasarkan tabel tersebut, terdapat kandungan FFA pada CPO yang akan diproses di *refinery* untuk diturunkan kadarnya. Pada umumnya, kadar FFA dari setiap CPO memiliki nilai berbeda-beda.

Tahapan-tahapan pokok pada proses *refinery* ada 4, yaitu *degumming*, *bleaching*, *filtration*, dan *deodorization*. *Degumming* merupakan tahapan penambahan asam fosfat ke dalam CPO dalam kondisi suhu panas yang kemudian dilakukan pencampuran dengan bantuan *mixer* (Zin, 2006). *Bleaching* merupakan tahapan penyerapan pigmen warna dengan menggunakan prinsip adsorpsi dan menggunakan bahan pembantu yang dapat berperan sebagai adsorban (Gibon et al, 2007). *Deodorization* merupakan proses distilasi dengan bantuan sistem *vacuum* menggunakan air dan steam dalam suhu tinggi untuk mengurangi kadar warna pada minyak serta penekanan kadar FFA (Gibon, 2012). *Deodorization* pada umumnya terdapat beberapa tahap seperti *pre-stripper*, *deodorizer*, dan *vacuum scrubber* (Bahrun, 2022). Pada *pre-stripper*, *Bleached Palm Oil* (BPO)

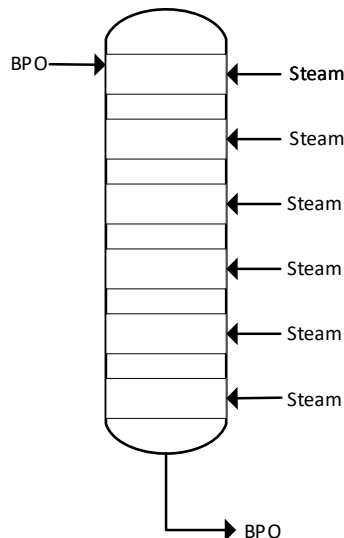
akan masuk menuju kolom distilasi dengan suhu tinggi, yaitu sekitar 240°C dengan bantuan steam berupa *sparging* dengan tujuan utama untuk menurunkan kadar FFA dari BPO (Bahrun, 2022). Setelah melalui *pre-stripper*, minyak tersebut akan dipanasi kembali hingga mencapai suhu sekitar 240 – 260°C dan dalam kondisi *vacuum* dengan kisaran 0,1 – 0,3 kPa dengan tujuan utama untuk menurunkan kadar FFA, menghilangkan komponen penyebab bau, dan karotenoid agar minyak yang keluar dari *deodorizer* memiliki kandungan warna merah yang rendah (Bahrun, 2022). Minyak yang mengalir turun pada tangki *pre-stripper* merupakan produk bawah sedangkan fasa gas FFA yang telah terpisahkan pada kolom *pre-stripper* akan tertarik oleh *vacuum* dan menghasilkan produk samping yaitu *Palm Fatty Acid Distillate* (PFAD). PFAD tersebut kemudian akan didinginkan dan disirkulasi melalui *vacuum scrubber* untuk masuk kembali ke sistem *deodorizer* untuk menangkap fasa gas FFA secara kontinyu (Bahrun, 2022).



Gambar 1. Ilustrasi Sistem Tangki Pre-Stripper

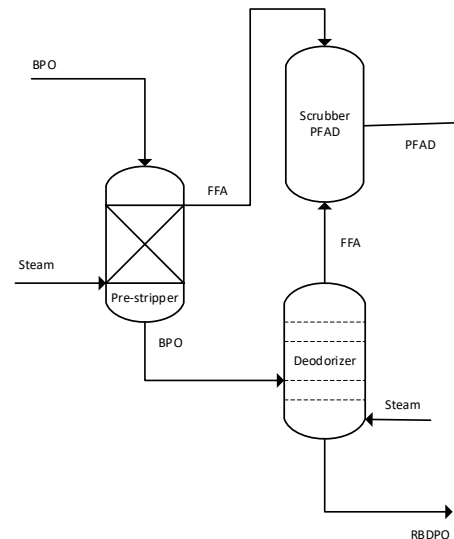
Pada tangki *pre-stripper*, terdapat *demister* pada bagian paling atas tangki yang berfungsi untuk menahan FFA dan PFAD agar tidak ikut bergerak naik sesuai arah *vacuum*. Kemudian di bawah *demister*, terdapat distributor PFAD yang masuk dalam suhu 60-70°C dan berfungsi untuk menangkap FFA dalam fasa gas yang bergerak naik dari BPO di bawahnya. Pada bagian bawah distributor baik BPO maupun PFAD, terdapat bagian dengan tanda “X” yang merupakan *mellapack*. *Mellapack* berfungsi untuk memperluas permukaan baik BPO maupun PFAD agar pemisahan FFA pada BPO dan penangkapan FFA pada PFAD menjadi lebih optimal (Mahmud, 2019).

Sama halnya dengan *pre-stripper*, pada tangki *deodorizer* produk bawah yang dihasilkan adalah *Refined Bleached Deodorized Palm Oil* (RBDPO) yang merupakan minyak yang bergerak turun ke ujung bawah tangki. Untuk fasa uap yang terangkat oleh dorongan *steam* yang berupa *sparging* dan terpisahkan dari fasa cairnya yaitu FFA, akan bergerak naik dan menuju ke *vacuum scrubber* untuk didinginkan dan disirkulasi kembali menuju ke tangki *pre-stripper*. Sedangkan untuk RBDPO, akan didinginkan terlebih dahulu sebelum ditransfer dan disimpan pada tangki penyimpanan (Bahrun, 2022).



Gambar 2. Ilustrasi Tangki Deodorizer

Dari Gambar 1 tersebut, BPO akan secara kontinyu masuk dari atas kemudian akan mengisi dan memenuhi *tray* paling atas. BPO yang sudah memenuhi *tray* paling atas, akan mengalami *overflow* melalui jalur *overflow* yang telah didesain tingginya dan mengalir ke *tray* selanjutnya yang berada di bawah. BPO akan mengalir terus dengan sistem yang sama pada tiap *tray* hingga *tray* paling bawah (Laval, 2016). Pada setiap *tray* yang dilalui oleh BPO, terdapat *steam* yang berupa *sparging*. *Sparging* tersebut akan berfungsi untuk mengangkat FFA yang terkandung pada BPO sehingga FFA tersebut akan terangkat dan tehisap oleh *vacuum* (Salleh et al., 2023).



Gambar 3. Ilustrasi Sistem Deodorizer dalam Proses Refinery

Gambar 3 menggambarkan skema pada proses *deodorizer*. BPO masuk ke tangki *pre-stripper* melalui distributor pada suhu kisaran 240 - 260°C dengan kondisi tekanan *vacuum* sebesar 1 – 3mbar (Bahrun, 2022). Kondisi suhu dan tekanan *vacuum* tersebut, digunakan untuk memisahkan FFA dari BPO. Titik didih FFA pada BPO berkisar pada suhu 250 - 255°C untuk kondisi *vacuum* dengan tekanan 1 – 3mbar. BPO kemudian mengalir turun melalui *mellapack* dan dibantu oleh *steam sparging* untuk memisahkan FFA yang terkandung pada BPO tersebut. Dari *pre-stripper*, BPO akan dipompa menuju *heat exchanger* terlebih dahulu untuk meningkatkan suhu nya menjadi 250-260°C sebelum masuk ke tangki *deodorizer*.

Pada *deodorizer*, BPO akan mengalir dengan sistem yang telah dijelaskan pada Gambar 2. Pada *deodorizer*, terjadi pemecahan antara BPO dengan FFA. FFA dalam fasa uap merupakan komponen ringan yang akan terangkat dan terhisap oleh *vacuum* dengan bantuan dari *steam sparging*. FFA yang masuk ke dalam sistem *vacuum*, akan masuk ke dalam *scrubber* PFAD yang nantinya akan disirkulasikan kembali dan masuk ke dalam tangki *pre-stripper* sebagai PFAD.

PFAD merupakan produk samping pada proses *refinery* yang juga memiliki nilai ekonomis dan dapat dipergunakan di berbagai bidang. PFAD pada umumnya memiliki komposisi utama yaitu FFA dengan kadar di kisaran 80%, trigliserida 5-15% dan sebagian sebagian kecil senyawa *volatile* (Abdul Kapor et al, 2017). Berdasarkan komposisi kandungannya, PFAD dapat digunakan di berbagai bidang industri seperti industri oleokimia yaitu pembuatan sabun dan lilin, industri biodiesel sebagai bahan baku karena harga PFAD yang cenderung jauh lebih murah daripada RBDPO yang umum digunakan sebagai *raw material* pada biodiesel walaupun dibutuhkan tahapan yang lebih kompleks karena membutuhkan proses esterifikasi (Rajo et al, 2020), bahan pakan ternak karena memiliki nilai kalori yang tinggi (Tay et al, 2009), dan sebagai sumber vitamin E (Eng & Ahmed, 2022).

Menilik dari banyaknya nilai kegunaan dan nilai ekonomi PFAD, sangat disayangkan apabila kadar FFA pada PFAD belum optimal terutama akibat kondisi operasi. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan percobaan untuk

mengoptimalkan kadar FFA pada PFAD melalui pengaturan pada kondisi operasi agar PFAD yang dihasilkan memiliki nilai jual yang lebih tinggi.

Metode

Sebagai bentuk upaya dalam melakukan optimalisasi meningkatkan kadar FFA pada PFAD, diperlukan beberapa perubahan dalam pengaturan selama proses *refinery* CPO berlangsung. Tindakan-tindakan yang perlu dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Mengatur suhu minyak masuk ke tangki *pre-stripper*

Pre-stripper pada umumnya merupakan tempat pertama terjadinya pengangkatan FFA dari BPO. Pada *pre-stripper*, BPO masuk pada suhu tinggi dengan kisaran antara 240 – 260°C untuk proses dengan sistem kontinyu (Bahrun, 2022). Pada beberapa proses *refinery* yang menggunakan sistem *batch*, proses berada pada kisaran suhu 250 - 260°C selama 20 – 40 menit (Kreps et al, 2017).

2. Mengatur kondisi tekanan *vacuum* dalam sistem *deodorization*

Pada umumnya *vacuum* dalam sistem *deodorization* dibuat berada di antara 0,1 – 0,3 kPa atau 1 – 3 mbar (Bahrun, 2022). Dalam penelitian ini, akan digunakan batas atas dari ketentuan tersebut yaitu *vacuum* berada di kisaran 0,3 kPa atau 3 mbar.

3. Mengatur suhu dan laju alir PFAD yang masuk ke *pre-stripper*

Suhu PFAD dibuat rendah tetapi tetap berada di atas titik bekunya yaitu sebesar 62°C (Sabarman et al, 2019). Oleh karena itu, suhu PFAD dibuat di kisaran 63-65°C. Semakin rendah suhu PFAD yang masuk ke *pre-stripper* akan semakin mudah PFAD menangkap dan menkondensasi fasa gas FFA dari produk bawah. Selain itu, laju alir PFAD juga dibuat dalam jumlah besar agar semua FFA dalam fasa gas dapat tertangkap oleh PFAD (Tan et al, 2021).

4. Mengatur tekanan *steam* pada *sparging*

Minyak yang memasuki *tray deodorization*, akan melewati *sparging* yang menggunakan media steam. *Steam sparging* pada proses *deodorization* sudah dikenal sebagai *stripping agent* yang mana merupakan media pembantu untuk memisahkan suatu komponen yang memiliki bobot ringan dan yang tidak diinginkan dari suatu aliran (Greyt, 2004). Oleh karena itu, apabila *steam sparging* dipasang dengan *pressure* yang terlalu tinggi, tidak hanya komponen dengan bobot ringan (FFA fasa gas) yang terangkat melainkan sebagian kecil minyak yang berada pada fasa cair juga akan ikut terangkat dan menyebabkan *carry over* (Bahrun, 2022).

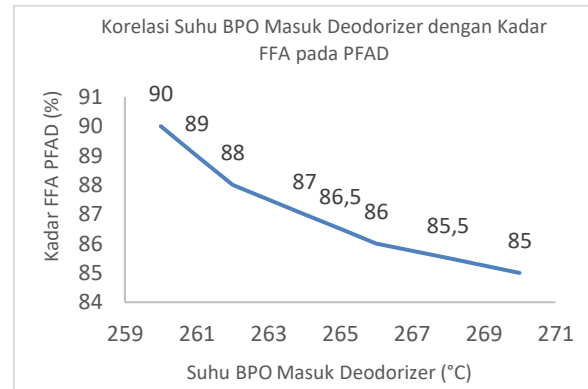
Metode-metode tersebut merupakan metode yang diperoleh berdasarkan observasi dan simulasi di dunia industri secara langsung dengan didukung oleh beberapa teori dari literatur.

Hasil Kerja

Berdasarkan metode-metode yang telah disebutkan di atas, maka diperoleh hasil kerja sebagai berikut:

Korelasi Suhu Minyak Masuk ke Tangki *Pre-Stripper* dengan Kadar FFA pada PFAD

Hasil dari pengaturan suhu minyak masuk ke dalam tangki *pre-stripper* dan kaitannya terhadap kadar FFA pada PFAD dapat dilihat berdasarkan grafik berikut.

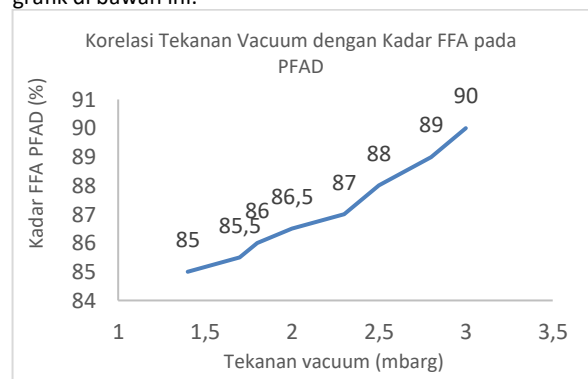


Gambar 4. Grafik Korelasi Suhu BPO Masuk *Pre-Stripper* dengan Kadar FFA pada PFAD

Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa semakin tinggi suhu BPO yang masuk ke dalam *pre-stripper*, maka semakin rendah juga kadar FFA pada PFAD. Hal tersebut dikarenakan semakin tingginya suhu BPO, maka BPO juga akan mulai mencapai titik didihnya dan juga ikut terangkat sehingga mengakibatkan terjadinya *carry over*. Akan tetapi, suhu BPO juga tidak boleh terlalu rendah. Suhu BPO yang terlalu rendah, terutama dibawah 240°C, karena pada kondisi *vacuum* 2 – 3 mbar titik didih FFA berada di kisaran suhu 240°C (Chuk, 2019). Oleh karena itu, apabila suhu BPO masuk *pre-stripper* dibawah 240°C, maka dikhawatirkan FFA pada produk RBDPO akan terlalu tinggi karena proses pemurniannya kurang optimal.

Korelasi Kondisi *Vacuum* Dalam Sistem *Deodorizer* dengan Kadar FFA pada PFAD

Setelah melakukan pengaturan pada kondisi tekanan *vacuum*, diperoleh korelasi sebagaimana yang tertera pada grafik di bawah ini.



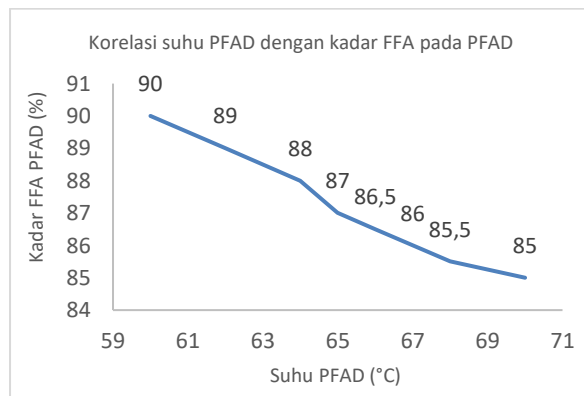
Gambar 5. Grafik Korelasi Tekanan *Vacuum* dengan Kadar FFA pada PFAD

Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa tekanan *vacuum* dengan kadar FFA PFAD berbanding lurus. Pada kondisi tekanan absolut yang tinggi, daya hisap *vacuum* akan terlalu kuat karena memiliki tekanan yang jauh lebih kecil daripada tekanan atmosferik. Daya hisap tersebut, akan mengakibatkan terjadinya *carry over* BPO dan akan

menurunkan kadar FFA pada PFAD. Akan tetapi, hal tersebut memiliki batasan. Kondisi *vacuum* dalam proses tidak boleh terlalu tinggi. Tekanan *vacuum* yang terlalu tinggi akan menyebabkan pemisahan FFA pada BPO tidak optimal. Berdasarkan prinsip kesetimbangan gas – cair, apabila tekanan *vacuum* terlalu tinggi maka hal tersebut akan menaikkan nilai titik didih FFA (Jasim Hadi, 2010).

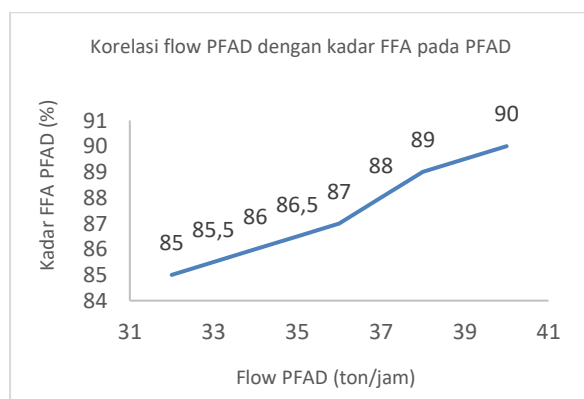
Korelasi Suhu dan Laju Alir PFAD yang Masuk ke *Pre-stripper*

Suhu dan lajur alir PFAD berhubungan dengan kadar FFA pada PFAD. Korelasi tersebut tergambar pada grafik di bawah ini.



Gambar 6. Grafik Korelasi Suhu PFAD dengan Kadar FFA pada PFAD

Berdasarkan Gambar 6, dapat terlihat bahwa semakin rendah suhu PFAD akan semakin tinggi juga kadar FFA yang diperoleh. Hal tersebut sesuai dengan prinsip kondensasi dimana fasa gas akan lebih mudah untuk tertangkap dan terkondensasi bila berkontak dengan media dengan suhu rendah. Akan tetapi, suhu PFAD perlu diperhatikan. PFAD merupakan media cair yang komposisi utamanya merupakan FFA. Apabila PFAD disirkulasi pada suhu di bawah 60°C yang merupakan titik cair dari PFAD maka PFAD akan beresiko untuk terjadi *block* karena berada di bawah titik cairnya (Yujaroen et al, 2009). Berbeda dengan suhu, korelasi antara *flow* PFAD dengan kadar FFA berbanding lurus sebagaimana digambarkan pada grafik berikut.

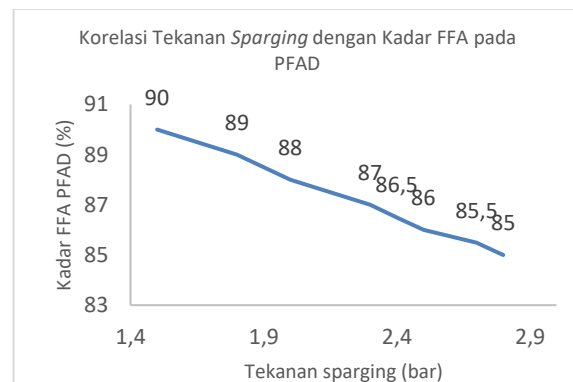


Gambar 7. Grafik Korelasi *Flow* PFAD dengan Kadar FFA pada PFAD

Flow PFAD yang tinggi akan menghasilkan kadar FFA pada PFAD yang tinggi juga. Semakin tinggi *flow* PFAD, maka PFAD tersebut dapat menangkap lebih banyak FFA dalam fasa gas.

Korelasi Tekanan *Steam* pada *Sparging* dengan Kadar FFA pada PFAD

Korelasi antara tekanan pada *steam sparging* dengan kadar FFA pada PFAD adalah sebagai berikut.



Gambar 8. Grafik Korelasi Tekanan *Steam Sparging* dengan Kadar FFA pada PFAD

Tekanan *steam sparging* dan kadar FFA PFAD berbanding terbalik. Hal tersebut disebabkan karena apabila tekanan sparging semakin besar, maka dorongan *sparging* pada BPO akan jauh lebih besar. Dorongan tersebut akan mengakibatkan BPO ikut terangkat dalam bentuk partikel-partikel kecil yang mana akan mempermudah *vacuum* untuk menarik partikel tersebut. Hal tersebut menyebabkan *carry over* dan akan mempengaruhi kadar FFA pada PFAD.

Dengan melakukan metode-metode tersebut untuk meningkatkan kadar FFA pada PFAD dapat meningkat hingga 4 – 6,5% dari kadar awalnya yang bernilai 85%. Peningkatan kadar FFA pada PFAD tersebut dapat dicapai pada kondisi *vacuum* dengan tekanan 2 – 2,5 mbar, suhu BPO masuk ke *pre-stripper* 258 – 260°C, laju alir PFAD 38 – 40 ton/jam pada suhu 61 – 62°C, serta tekanan *sparging* pada 1 – 1,5 bar. Dengan kondisi operasional tersebut, FFA pada PFAD akan mencapai minimal 88,5% dan FFA pada RBDPO akan tetap terjaga di bawah 0,1% sesuai dengan *standard* PORAM (Lestari et al, 2024). Dengan kadar FFA yang mencapai 88,5%, PFAD yang dihasilkan memiliki nilai jual yang lebih tinggi terutama pada bidang industri oleokimia karena bidang tersebut membutuhkan kadar FFA yang tinggi. Selain industri oleokimia, PFAD yang memiliki kadar FFA yang tinggi memiliki nilai lebih apabila digunakan sebagai bahan baku proses biodiesel.

Kesimpulan

Dalam melakukan optimalisasi kadar FFA pada PFAD, banyak aspek yang perlu diperhatikan. Seperti halnya suhu BPO masuk ke *pre-stripper*, tekanan *vacuum* dalam sistem *deodorizer*, suhu dan laju alir PFAD masuk ke dalam sistem *deodorizer*, serta tekanan *sparging* yang digunakan dalam sistem *deodorizer*. Dalam upaya meningkatkan kadar FFA pada PFAD, perlu diperhatikan juga FFA pada produk RBDPO. Karena pada dasarnya, FFA PFAD dan RBDPO perlu diseimbangkan agar produk RBDPO tidak *outspec* karena terlalu fokus dalam optimalisasi FFA pada PFAD.

Untuk memperoleh hasil yang optimal dan seimbang antara FFA pada PFAD dan RBDPO, maka disarankan untuk tekanan *vacuum* berada di kisaran 2 – 2,5 mbar, suhu BPO masuk ke *pre-stripper* di kisaran 258 – 260°C, laju alir PFAD di 1,2x laju alir BPO yaitu ada pada kisaran 38 – 30 ton/jam

dan pada suhu PFAD di kisaran 61 – 62°C, serta tekanan *sparging* pada *deodorizer* dan *pre-stripper* pada 1 – 1,5 bar. Dalam optimalisasi kadar FFA pada PFAD menjadi lebih tinggi, PFAD dapat mencakup lebih banyak sektor penjualan seperti pada bidang oleokimia yang membutuhkan PFAD dengan kadar FFA yang tinggi seperti pada industri sabun. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mempelajari lebih dalam terkait desain kolom *deodorizer* agar masa tinggal BPO pada *deodorizer* dapat lebih lama.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terima kasih disampaikan penulis kepada Ibu Ir. Shella Permatasari Santoso, S.T., Ph.D., IPM. selaku dosen pembimbing yang membantu penulis dalam menyelesaikan karya tulis ilmiah ini; Ibu Ir. Martha Kartika Sari, S.T., IPM. sebagai pembimbing lapangan; Bapak Suhariono Soedjono, S.T. yang telah memberikan kesempatan bagi penulis untuk melaksanakan praktik keinsinyuran; serta semua pihak yang telah mendukung penulis dalam menyelesaikan praktik keinsinyurannya.

Referensi

- Abdul Kapor, N. Z., Maniam, G. P., Rahim, M. H. A., & Yusoff, M. M. (2017). Palm fatty acid distillate as a potential source for biodiesel production: A review. *Journal of Cleaner Production*, 143, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.163>
- Aparamarta, H. W., Gunawan, S., Ibrahim, R., Hariawan, M., Haq, F. B., & Supriadiputra, M. F. (2025). Making healthy cooking oil from crude palm oil (CPO) by combination method microwave-assisted extraction (MAE)–batchwise solvent extraction (BSE). *South African Journal of Chemical Engineering*, 52, 311–324. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2025.03.011>
- Bahrnun, M. H. V. (2022). Process simulation of steam stripping of bleached palm oil deodorization for removing free fatty acids using DWSIM. *Journal of Physics: Conference Series*, 2314(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2314/1/012016>
- Chuk, C. I. (2019). *Oil deodorising: New technologies and solutions to improve final edible oil quality* [Technical presentation]. Desmet Ballestra Malaysia.
- Eng, C., & Ahmed, M. (2022). Optimization process for the synthesis of polyol-oleates from Malaysian unsaturated palm fatty acid distillate. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 41(9), 2961–2971.
- Gibon, V. (2012). Palm oil and palm kernel oil refining and fractionation technology. In F. D. Gunstone (Ed.), *Palm oil: Production, processing, characterization, and uses* (pp. xxx–xxx). AOCS Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-9818936-9-3.50015-0>
- Gibon, V., De Greyt, W., & Kellens, M. (2007). Palm oil refining. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 109(4), 315–335. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200600307>
- Jasim Hadi, A. (2010). Gas-liquid equilibrium prediction of CO₂–ethanol system at moderate pressures and

- different temperatures. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 3(1), 90–105. <https://doi.org/10.24237/djes.2010.03107>
- Laval, A. (2016). *Impacting the heart of deodorization processes* [Industry report].
- Lestari, P., Yusuf, F., & Fahdi, F. (2024). Quality analysis of cooking oil (RBD palm olein) based on PORAM standard specifications. *Science Midwifery*, 12(2), 1040–1046. <https://midwifery.iocspublisher.org/index.php/midwife/article/view/1597>
- Mahmud, F. S. (2019). Proses pengolahan CPO menjadi RBDPO di PT XYZ Dumai. *Jurnal UNITEK*, 12(1), 55–64.
- Rajo, M. H. A., Zin, A. F. M., & Asmuin, N. (2020). Palm fatty acid distillate (PFAD) as source of biofuel: Availability and suitability analysis. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 76(1), 156–163. <https://doi.org/10.37934/arfm.76.1.156163>
- Salleh, I. S., Ali, N. S., Hourfar, F., Yusof, K. M., Sulaiman, N. S., Jamaluddin, H., Zahedi, G., Almansoori, A., & Elkamel, A. (2023). Fuzzy expert system for troubleshooting of the deodorizer unit in a palm oil refining plant. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 101(6), 3351–3361. <https://doi.org/10.1002/cjce.24701>
- Tay, B., Ping, Y., & Yusof, M. (2009). Characteristics and properties of fatty acid distillates from palm oil. *Oil Palm Bulletin*, 59, 5–11.
- Yujaroen, D., Goto, M., Sasaki, M., & Shotipruk, A. (2009). Esterification of palm fatty acid distillate (PFAD) in supercritical methanol: Effect of hydrolysis on reaction reactivity. *Fuel*, 88(10), 2011–2016. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.02.040>
- Zin, M. (2006). *Process design in degumming and bleaching of palm oil* (Research Vote No. 74198). Centre of Lipids Engineering and Applied Research.



Evaluasi dan *Re-Mapping* APAR di Bangunan 2 (Gudang Bahan Baku & Barang Jadi) di PT Sumber Lancar Cemerlang

Elshandy Agastya¹ Dian Retno Sari Dewi¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ irelshandy@gmail.com

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kecukupan jumlah serta efektivitas penempatan Alat Pemadam Api Ringan (APAR) di Bangunan 2 PT Sumber Lancar Cemerlang yang memiliki risiko kebakaran tinggi akibat penyimpanan benang, plastik, dan sarung tangan rajut. Metode yang digunakan berupa pendekatan deskriptif kualitatif melalui observasi, wawancara, dan dokumentasi untuk menilai kesesuaian kondisi eksisting dengan Permenaker No. PER.04/MEN/1980. Hasil analisis menunjukkan bahwa dari total luas area $\pm 1.943 \text{ m}^2$, kebutuhan APAR mencapai 15 unit, sedangkan jumlah aktual hanya empat unit dan beberapa di antaranya tidak mudah diakses. Kondisi tersebut berpotensi menurunkan efektivitas penanganan awal kebakaran. Melalui perhitungan kebutuhan dan pemetaan ulang, diusulkan penataan posisi APAR yang lebih strategis sesuai klasifikasi risiko kebakaran golongan A. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penambahan jumlah APAR, perbaikan tata letak, dan pemeliharaan berkala diperlukan untuk meningkatkan kesiapsiagaan dan keselamatan kerja.

Kata kunci: Kesehatan dan Keselamatan Kerja; APAR; Proteksi Kebakaran; Industri, Inovasi, dan Infrastruktur

Pendahuluan

Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan aspek fundamental dalam sistem manajemen operasional perusahaan yang berfungsi untuk menjamin perlindungan terhadap tenaga kerja, aset, dan lingkungan dari potensi bahaya yang dapat menimbulkan kerugian material maupun nonmaterial (Suma'mur, 2019). Implementasi K3 tidak hanya menjadi kewajiban moral perusahaan terhadap pekerjanya, tetapi juga merupakan elemen strategis dalam menjaga keberlanjutan operasional dan reputasi perusahaan di sektor industri. Salah satu ancaman signifikan yang sering dihadapi dalam aktivitas manufaktur adalah kebakaran, terutama di sektor yang memanfaatkan bahan-bahan mudah terbakar seperti tekstil dan plastik (Ridley, 2014). Kejadian kebakaran di lingkungan kerja tidak hanya mengakibatkan kerusakan fasilitas dan gangguan produksi, tetapi juga berpotensi menimbulkan korban jiwa serta pencemaran lingkungan. Oleh karena itu, penerapan sistem proteksi kebakaran yang memadai menjadi komponen penting dalam sistem manajemen keselamatan industri modern.

PT Sumber Lancar Cemerlang sebagai salah satu perusahaan manufaktur yang memproduksi sarung tangan rajut menghadapi potensi bahaya kebakaran yang cukup tinggi karena dalam proses produksinya melibatkan bahan-bahan yang mudah terbakar seperti benang, kain, plastik kemasan, serta bahan *dotting* berbasis karet. Bangunan 2 dengan luas $\pm 1.943 \text{ m}^2$ berfungsi sebagai gudang penyimpanan bahan baku

dan barang jadi, serta menjadi area yang memiliki risiko kebakaran paling tinggi. Berdasarkan hasil observasi lapangan, diketahui bahwa jumlah Alat Pemadam Api Ringan (APAR) yang tersedia di area tersebut masih terbatas dan penempatannya belum sesuai dengan ketentuan teknis yang berlaku. Kondisi ini menyebabkan rendahnya efektivitas penanganan awal apabila terjadi kebakaran, karena beberapa unit APAR tertutup oleh tumpukan bahan produksi dan tidak mudah dijangkau oleh pekerja. Situasi tersebut menandakan lemahnya sistem proteksi pasif di area penyimpanan, yang dapat meningkatkan risiko terhadap keselamatan pekerja dan memperbesar potensi kerugian perusahaan.

Sesuai dengan Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor PER.04/MEN/1980, setiap tempat kerja wajib menyediakan APAR dalam jumlah yang memadai dan menempatkannya di lokasi yang mudah dijangkau untuk memastikan kesiapsiagaan terhadap bahaya kebakaran (Kemenaker RI, 1980). Selain itu, regulasi terbaru melalui Peraturan Menteri Perindustrian Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2024 menegaskan bahwa seluruh alat pemadam api portabel harus memenuhi Standar Nasional Indonesia (SNI) sebagai jaminan mutu dan efektivitas (Kemenperin RI, 2024). Hasil studi sebelumnya menunjukkan bahwa kepatuhan terhadap standar penempatan APAR berpengaruh langsung terhadap tingkat keselamatan kerja dan efektivitas mitigasi bahaya kebakaran di lingkungan industri (Puspitasari & Rahmawati, 2022).

Namun, kondisi di Bangunan 2 PT Sumber Lancar Cemerlang menunjukkan masih adanya kekurangan

dalam jumlah maupun penempatan APAR yang tidak strategis, sebagaimana diungkapkan oleh Rahardjo (2021) bahwa penempatan alat pemadam yang tertutup bahan produksi dapat menurunkan efektivitas sistem proteksi kebakaran. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi menyeluruh dan kegiatan *remapping* lokasi APAR berdasarkan tata letak bangunan serta klasifikasi risiko kebakaran golongan A yang berasal dari bahan padat nonlogam seperti kain dan plastik guna meningkatkan efektivitas sistem keselamatan kerja dan menjamin kesiapsiagaan terhadap potensi kebakaran di lingkungan perusahaan.

Metode

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kualitatif yang bertujuan untuk menggambarkan kondisi eksisting jumlah dan penempatan Alat Pemadam Api Ringan (APAR) di Bangunan 2 PT Sumber Lancar Cemerlang serta menilai kesesuaiannya dengan ketentuan dalam Permenaker No. PER.04/MEN/1980. Pengumpulan data dilakukan melalui tiga teknik utama, yaitu observasi, wawancara, dan dokumentasi. Observasi dilakukan untuk meninjau secara langsung jumlah, kondisi, serta posisi penempatan APAR dan kesesuaiannya dengan jarak serta aksesibilitas yang dipersyaratkan. Wawancara dilakukan dengan staf gudang, supervisor gudang, dan petugas keamanan guna memperoleh informasi mengenai tingkat pemahaman serta kendala dalam penggunaan dan penempatan APAR. Sementara itu, dokumentasi meliputi pengumpulan denah bangunan, foto lapangan, serta catatan inspeksi APAR yang digunakan untuk memperkuat hasil observasi dan wawancara.

Hasil Kerja

Kondisi Eksisting

Bangunan 2 PT Sumber Lancar Cemerlang dengan luas $\pm 1.943 \text{ m}^2$ berfungsi sebagai area penyimpanan dan fasilitas pendukung perusahaan, yang terdiri atas mes karyawan, gudang barang sisa produksi, serta gudang bahan baku dan barang jadi. Area bahan baku menyimpan benang dalam karung, plastik kemasan, dan bahan *dotting* untuk pelapisan sarung tangan, sedangkan gudang barang jadi berisi sarung tangan rajut yang telah dikemas rapi untuk siap dikirim. Seluruh material yang disimpan bersifat mudah terbakar, terutama benang dan sarung tangan berbahan tekstil.

Tabel 1. Golongan Kebakaran

No	Golongan	Keterangan	Contoh
1	Golongan A	Kebakaran bahan padat kecuali logam	Gudang tekstil, gudang sarung tangan, gudang kemasan
2	Golongan B	Kebakaran bahan cair atau gas yang mudah terbakar	Bengkel, pabrik cat, penyimpanan bahan kimia

3	Golongan C	Kebakaran instalasi listrik bertegangan	Area dapur industri, pabrik gas
4	Golongan D	Kebakaran logam	Industri logam, bengkel pesawat

Berdasarkan jenis material tersebut, yaitu benang, sarung tangan rajut, plastik kemasan, dan bahan *dotting*, Bangunan 2 dikategorikan ke dalam Golongan A karena sebagian besar materialnya merupakan bahan padat organik non-logam yang mudah terbakar.

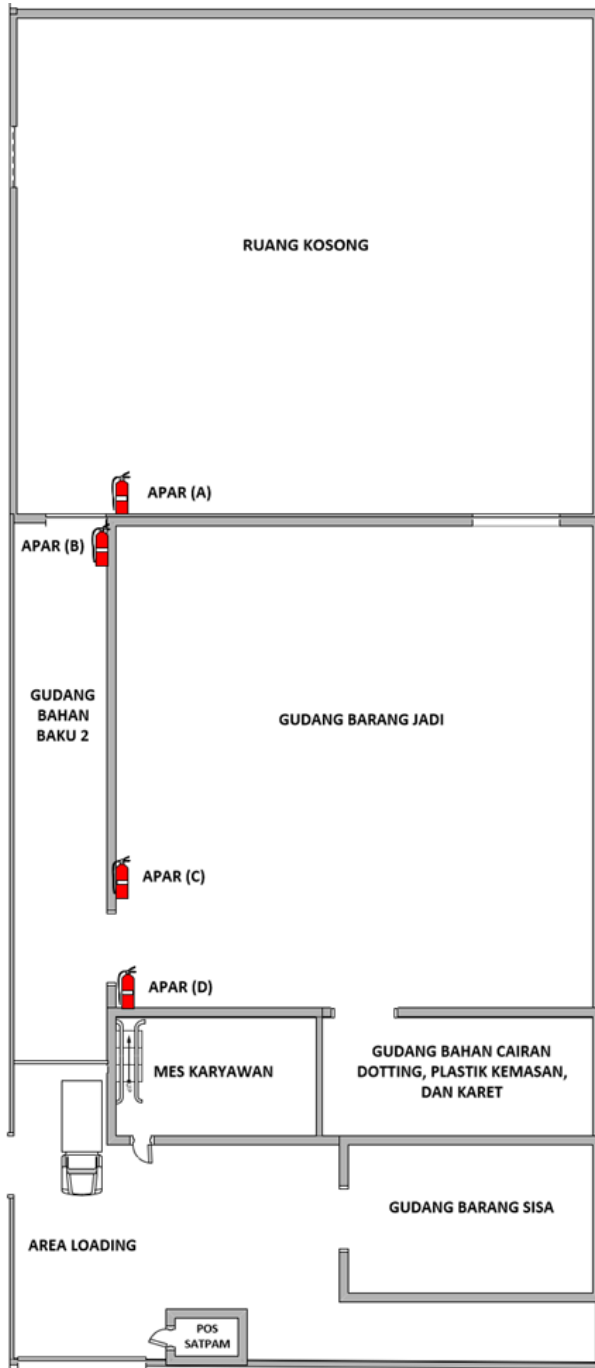
Dengan mempertimbangkan klasifikasi bangunan yang termasuk dalam Golongan A, maka pemilihan jenis Alat Pemadam Api Ringan (APAR) di area Bangunan 2 PT Sumber Lancar Cemerlang perlu disesuaikan dengan potensi bahaya kebakaran yang berasal dari bahan padat mudah terbakar. Jenis material seperti benang, sarung tangan rajut, plastik kemasan, dan bahan *dotting* memiliki karakteristik yang dapat menimbulkan api dengan cepat apabila terjadi percikan atau sumber panas. Berikut adalah beberapa jenis APAR:



Gambar 1. Jenis APAR

APAR jenis *ABC powder* dinilai paling sesuai untuk Bangunan 2 PT Sumber Lancar Cemerlang karena efektif memadamkan berbagai kelas kebakaran, termasuk kelas A yang berasal dari bahan padat mudah terbakar seperti benang, sarung tangan rajut, plastik, dan bahan *dotting*. Media *dry chemical* mampu memutus reaksi kimia pembakaran dengan cepat tanpa meninggalkan residu air yang berisiko merusak material. Selain serbaguna untuk kebakaran akibat korsleting listrik maupun bahan cair mudah terbakar, jenis ini juga dinilai paling praktis dan efisien untuk area produksi dan penyimpanan perusahaan.

Posisi penempatan APAR di area bangunan 2 PT Sumber Lancar Cemerlang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Posisi Eksisting APAR

Namun, jumlah Alat Pemadam Api Ringan (APAR) yang tersedia di area ini hanya empat unit, yang secara kuantitas tidak memadai untuk menjangkau seluruh titik risiko sesuai dengan standar proteksi kebakaran industri.

Perhitungan Jumlah APAR

Menurut Peraturan Menteri Tenaga Kerja No. PER 04/MEN/1980, ketentuan pemasangan APAR satu dengan yang lainnya tidak boleh melebihi 15 meter (dengan kata lain jarak antar APAR 15 meter). Sehingga didapatkan cara menghitung jumlah APAR. Jumlah kebutuhan APAR sesuai dengan Peraturan Menteri

Tenaga Kerja No. PER 04/MEN/1980 untuk Bangunan 2 PT Sumber Lancar Cemerlang akan dihitung menggunakan rumus berikut:

1. Rumus luas area yang dapat dijangkau 1 APAR:

$$L = \frac{\pi}{4} \times (D^2) \quad (1)$$

$$L = \frac{3,14}{4} \times (15^2)$$

$$L = 176,265$$

2. Rumus perhitungan jumlah APAR yang diperlukan:

$$\Sigma \text{APAR} = \frac{\text{Luas Ruangan}}{\text{Luas Area Jangkauan}} \quad (2)$$

Berikut hasil perhitungan kebutuhan APAR di tiap ruangan:

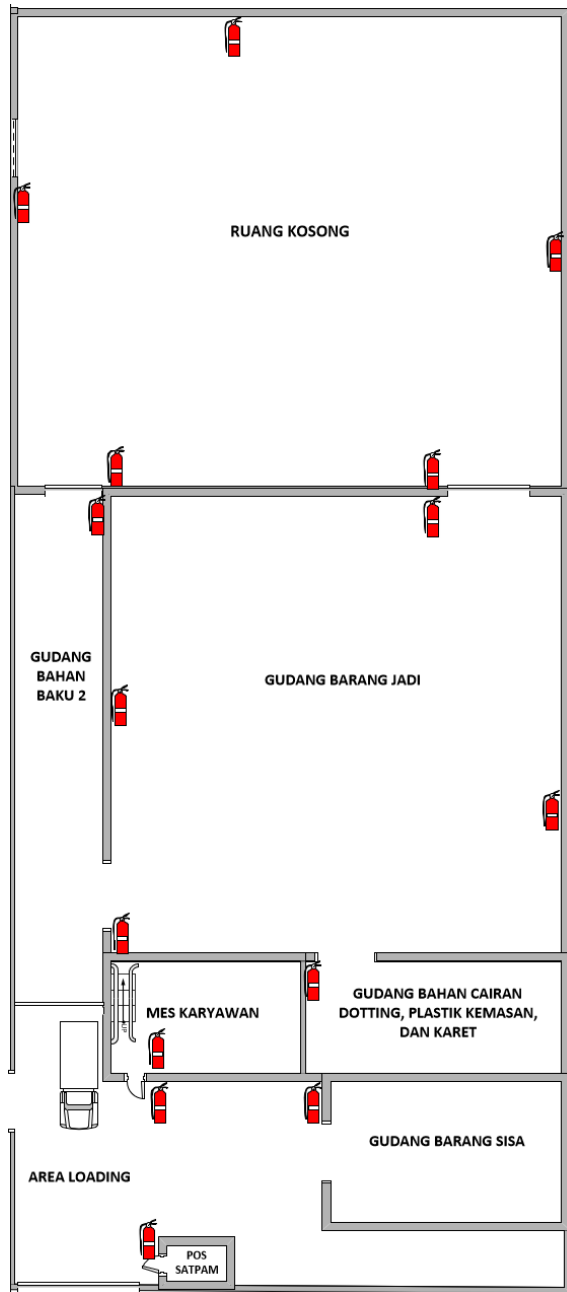
Tabel 2. Perhitungan Jumlah Kebutuhan APAR

No.	Nama Ruang	Ukuran Area (m)		Jumlah APAR
		Panjang	Lebar	
1	Gudang Barang Jadi	24	24	4 Unit
2	Ruang Kosong (Gudang WIP)	29	25	5 Unit
3	Gudang Bahan Baku 2	30	5	1 Unit
4	Mes Karyawan Gudang Cairan Dotting, Plastik Kemasan, dan Karet	6	12	1 Unit
5	Gudang Barang Sisa	9	12	1 Unit
6	Area Loading	14	17	2 Unit
Total Kebutuhan APAR				15 Unit

Dari hasil perhitungan kebutuhan, total APAR yang seharusnya tersedia di seluruh area bangunan yaitu sebanyak 15 unit, mencakup seluruh area.

Re-Mapping Penempatan APAR

Berdasarkan hasil observasi, analisis dan perhitungan terhadap kondisi eksisting sistem proteksi kebakaran di Bangunan 2 PT Sumber Lancar Cemerlang, dilakukan kegiatan *re-mapping* posisi APAR sesuai dengan Permenaker No. PER.04/MEN/1980. Pemetaan dilakukan dengan mempertimbangkan aksesibilitas jalur evakuasi, area penyimpanan bahan baku benang dan produk jadi, serta titik-titik dengan potensi risiko kebakaran lebih tinggi.



Gambar 3. Denah Penempatan APAR Baru

Untuk memastikan hasil *re-mapping* sesuai standar keselamatan kerja, penempatan APAR di Bangunan 2 PT Sumber Lancar Cemerlang harus mengikuti ketentuan dalam Permenaker No. PER.04/MEN/1980. Berikut adalah poin-poin utama syarat penempatan APAR yang perlu diperhatikan di area gudang:

1. Mudah dilihat dan dijangkau.
2. Jarak jangkauan efektif maksimal 15 meter.
3. Ketinggian pemasangan antara 0,15–1,25 meter dari lantai.
4. Terpasang di tempat yang tidak lembap dan terhindar dari panas langsung.
5. Ditempatkan di dekat potensi sumber bahaya kebakaran.
6. Dilengkapi rambu lokasi APAR yang jelas.
7. Pemeriksaan dan pemeliharaan APAR berkala.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil observasi dan analisis terhadap kondisi sistem proteksi kebakaran di Bangunan 2 PT Sumber Lancar Cemerlang, dapat disimpulkan bahwa jumlah dan penempatan Alat Pemadam Api Ringan (APAR) masih belum memenuhi ketentuan Permenaker No. PER.04/MEN/1980. Dengan luas area sebesar 1.943 m² dan klasifikasi kebakaran golongan A, bangunan ini idealnya membutuhkan sekitar 15 unit APAR yang ditempatkan secara merata di titik-titik strategis. Kondisi eksisting menunjukkan jumlah APAR yang terbatas dan sebagian penempatannya tidak sesuai standar, seperti tertutup tumpukan bahan dan berada jauh dari jalur evakuasi.

Perusahaan disarankan untuk menambah jumlah APAR sesuai hasil *re-mapping*, memastikan seluruh unit mudah diakses, serta melengkapi dengan sistem proteksi aktif tambahan seperti *hydrant* atau *sprinkler* untuk meningkatkan kecepatan respon terhadap potensi kebakaran berskala besar. Selain itu, perlu dilakukan inspeksi rutin, pengecekan tekanan tabung APAR, dan pelatihan penggunaan APAR bagi karyawan gudang agar kesiapsiagaan tetap terjaga. Pemasangan rambu lokasi APAR serta penyediaan sarana pendukung seperti jalur evakuasi yang jelas juga perlu diperhatikan untuk meminimalkan risiko kerugian dan memastikan keselamatan seluruh pekerja.

Ucapan Terimakasih

1. Bapak Dr. Ir. Ivan Gunawan S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng. selaku ketua Program Studi Program Profesi Insinyur Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya. Yang telah meluangkan waktu dan tenaga untuk memberikan masukan, arahan dan semangat dalam menyusun Laporan Praktik Keinsinyuran ini.
2. Ibu Ir. Dian Retno Sari Dewi P, S.T., M.T., Ph.D., IPM. selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu, pikiran, tenaga dan mengupayakan kesempatan untuk membantu serta membimbing penulis menyelesaikan artikel keinsinyuran.
3. Bapak Ir. Sutarmin, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng. selaku Pembimbing Lapangan yang membantu serta membimbing penulis menyelesaikan penulisan artikel keinsinyuran.
4. PT Sumber Lancar Cemerlang yang sudah memberikan wadah dan kesempatan untuk penulis banyak belajar pengetahuan baru dalam kegiatan Praktik Keinsinyuran.

Referensi

Kemenaker RI. (1980). *Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor PER.04/MEN/1980 tentang syarat-syarat pemasangan dan pemeliharaan alat pemadam api ringan*. Jakarta: Kementerian Tenaga Kerja Republik Indonesia.



- Kemenperin RI. (2024). *Peraturan Menteri Perindustrian Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2024 tentang penerapan Standar Nasional Indonesia (SNI) alat pemadam api portabel secara wajib*. Jakarta: Kementerian Perindustrian Republik Indonesia.
- Puspitasari, D., & Rahmawati, N. (2022). Analisis kepatuhan penerapan proteksi kebakaran pada bangunan industri. *Jurnal Keselamatan dan Kesehatan Kerja Indonesia*, 13(2).
- Rahardjo, R. (2021). Evaluasi efektivitas sistem proteksi kebakaran di area pergudangan industri. *Jurnal Teknologi dan Keselamatan Kerja*, 8(1).
- Ridley, J. (2014). *Safety at work* (8th ed.). New York: Routledge.
- Suma'mur, P. K. (2019). *Keselamatan kerja dan pencegahan kecelakaan*. Jakarta: Gunung Agung.



Implementasi Kode Etik dan Profesionalisme Keinsinyuran dalam Kegiatan Pengawasan Infrastruktur di Lingkungan Pemerintah Kabupaten Sumenep

Mohammad Hariyanto^{1,1}Novita Sari^{1,2}
Dewi Ernawati^{1,3} Mohammad Hefni Roziqi^{1,4}

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ mohammadhariyanto9298@gmail.com

✉ novi.arch8@gmail.com

✉ dernawati496@gmail.com

✉ hfnrzi@gmail.com

Untuk memastikan proses pembangunan infrastruktur yang dilakukan penyedia jasa telah menghasilkan barang yang tepat dari aspek mutu, volume, dan waktu dari setiap pengeluaran uang yang telah dibelanjakan oleh pemerintah daerah Kabupaten Sumenep, Inspektorat Kabupaten Sumenep melaksanakan pemeriksaan kepatuhan dalam rangka Program Kerja Pengawasan Tahunan berupa pelaksanaan pemeriksaan infrastruktur. Pelaksanaan pemeriksaan kepatuhan atas belanja pemerintah daerah Kabupaten Sumenep terkait pembangunan infrastruktur di dalamnya banyak melibatkan praktik keinsinyuran. Oleh karena itu, tujuan dari penulisan ini adalah untuk mengetahui implementasi etika dan profesionalisme keinsinyuran dalam prosedur pemeriksaan atas pembangunan infrastruktur. Pemeriksa melaksanakan prosedur pemeriksaan yang efektif sejalan dengan rencana pemeriksaan untuk mengumpulkan bukti pemeriksaan dan memenuhi tujuan pemeriksaan. Metode pengumpulan bukti yang digunakan dalam pelaksanaan pemeriksaan belanja daerah dalam studi kasus ini di antaranya adalah inspeksi, konfirmasi ekstern, perhitungan ulang, pengujian substantif, dan pengujian pengendalian. Implementasi etika dan profesionalisme keinsinyuran dalam pelaksanaan pemeriksaan diwujudkan dengan melaksanakan prosedur pemeriksaan secara obyektif, jujur dan bertanggung jawab dalam memberikan penilaian atas pelaksanaan Pembangunan infrastruktur yang diperiksa, simpulan atas permasalahan/ penyimpangan yang terjadi dan rekomendasi atas hasil pemeriksaan sehingga akan memberikan keyakinan terbaik atas kualitas hasil pemeriksaan

Kata kunci: Etika, Profesionalisme, Pemeriksaan, Infrastruktur

Pendahuluan

Infrastruktur menjadi salah satu upaya pemerintah daerah dalam meningkatkan kemajuan perekonomian dan kesejahteraan masyarakat serta pemerataan pembangunan nasional. Untuk itu, pemerintah daerah terus meningkatkan anggaran belanja untuk pembangunan infrastruktur. Untuk memastikan pengadaan belanja pemerintah daerah dalam hal ini pembangunan infrastruktur telah menghasilkan barang yang tepat dari aspek mutu, volume, dan waktu dari setiap pengeluaran uang yang telah dibelanjakan oleh pemerintah daerah, maka perlu dilakukan pemeriksaan dari internal pemerintah daerah yang dilaksanakan oleh Inspektorat sebagai Aparat Pengawasan Intern Pemerintah.

Inspektorat Kabupaten Sumenep melaksanakan pemeriksaan atas pengelolaan dan tanggung jawab keuangan daerah. Selain itu, pemeriksaan adalah proses identifikasi masalah, analisis, dan evaluasi yang dilakukan secara independen, obyektif, dan profesional berdasarkan standar pemeriksaan untuk menilai kebenaran, kecermatan, kredibilitas, dan keandalan informasi mengenai pengelolaan dan tanggung jawab keuangan. Inspektorat Kabupaten Sumenep melakukan pemeriksaan kepatuhan pada proses Pembangunan infrastruktur. Pemeriksaan kepatuhan bertujuan untuk menyediakan informasi ke pengguna laporan hasil pemeriksaan mengenai kepatuhan entitas yang diperiksa dalam mengikuti/mematuhi ketentuan

peraturan perundangundangan, keputusan legislatif, kontrak, dan kode etik yang ditetapkan.

Pemeriksa Inspektorat Kabupaten Sumenep melakukan langkah/prosedur pemeriksaan untuk mengumpulkan bukti pemeriksaan dan memenuhi tujuan pemeriksaan dengan menerapkan nilai-nilai dasar kode etik auditor yakni independensi, integritas, dan profesional. Pelaksanaan pemeriksaan kepatuhan atas belanja pemerintah daerah terkait pembangunan infrastruktur di dalamnya banyak melibatkan praktik keinsinyuran. Praktik keinsinyuran merupakan kegiatan keinsinyuran dimana keinsinyuran adalah kegiatan teknik dengan menggunakan kepakaran dan keahlian berdasarkan penguasaan ilmu pengetahuan dan teknologi untuk meningkatkan nilai tambah dan daya guna secara berkelanjutan dengan memperhatikan keselamatan, kesehatan, kemaslahatan, serta kesejahteraan masyarakat dan kelestarian lingkungan (Republik Indonesia, 2014).

Oleh karena itu, tujuan dari penulisan ini adalah untuk mengetahui implementasi etika dan profesionalisme keinsinyuran dalam prosedur/langkah pemeriksaan kepatuhan atas belanja pemerintah terkait pengadaan infrastruktur dengan mengambil studi kasus pemeriksaan pada Pekerjaan Peningkatan Saluran Drainase Perkotaan dan Lingkungan Jl. Dr. Cipto (Lanjutan) yang dilaksanakan oleh Dinas Pekerjaan Umum dan Tata Ruang Kabupaten Sumenep.



Gambar 1. Pekerjaan Peningkatan Saluran Drainase
Perkotaan dan Lingkungan Jl. Dr. Cipto (Lanjutan)

Metode

Pengumpulan Bukti

Pemeriksa harus menggunakan kemahiran profesional secara cermat dan seksama dalam menentukan jenis pemeriksaan yang akan dilaksanakan, menentukan lingkup pemeriksaan, memilih metodologi, menentukan jenis dan jumlah bukti yang akan dikumpulkan, atau memilih pengujian dan prosedur untuk melaksanakan pemeriksaan, serta melakukan penilaian dan pelaporan hasil pemeriksaan. Dalam tahap pelaksanaan pemeriksaan, salah satu langkah dalam metodologi pemeriksaan yaitu pemerolehan dan analisis bukti. Pemeriksa melaksanakan prosedur pemeriksaan yang efektif sejalan dengan rencana pemeriksaan untuk mengumpulkan bukti pemeriksaan dan memenuhi tujuan pemeriksaan. Pemeriksa perlu menggabungkan dan membandingkan bukti dari berbagai sumber dengan menggunakan beberapa teknik/metode agar dapat memenuhi persyaratan kecukupan bukti serta kualitas bukti yang relevan, valid, dan andal.

Metode pengumpulan bukti yang digunakan dalam pelaksanaan pemeriksaan belanja daerah dalam studi kasus ini di antaranya adalah:

1. Inspeksi

Inspeksi meliputi pemeriksaan dokumen dan/atau pemeriksaan fisik. Pemeriksa mempertimbangkan keandalan dokumen yang diperiksa dan tetap memperhatikan risiko kecurangan serta kemungkinan adanya pemalsuan dokumen. Pemeriksa dapat menerapkan prosedur pemeriksaan fisik untuk melihat eksistensi pekerjaan, menilai efektivitas pengendalian dan untuk menguji ketepatan mutu, volume, dan waktu.

2. Konfirmasi ekstern

Konfirmasi ekstern merepresentasikan bukti pemeriksaan yang diperoleh pemeriksa sebagai tanggapan tertulis dari pihak ketiga untuk menguji validitas bukti pemeriksaan.

3. Pengujian pengendalian

Uji pengendalian merupakan pengujian atas pengendalian yang telah dilakukan manajemen untuk mengurangi risiko ketidakpatuhan

4. Pengujian substantif

Pengujian substantif melibatkan pengujian transaksi atau kegiatan rinci terhadap kriteria pemeriksaan. Pengujian substantif akan efektif jika dikombinasikan dengan metode pengumpulan bukti lainnya.

5. Perhitungan ulang

Perhitungan ulang merupakan pemeriksaan akurasi matematika suatu dokumen atau catatan. Perhitungan ulang dapat dilakukan secara manual atau elektronik. Perhitungan ulang dilakukan berdasarkan hasil pengukuran Bersama antara pemilik proyek, penyedia jasa, konsultan pengawas dan pemeriksa.

Prinsip Dasar Kode Etik Insinyur

Prinsip dasar kode etik Insinyur menurut (PII, 2021) adalah sebagai berikut:

1. Mengutamakan keluhuran budi, keamanan, keselamatan, kesehatan, dan kemaslahatan masyarakat serta lingkungan.
2. Berpraktik hanya di bidang kompetensinya.
3. Menyatakan pendapat kepada publik hanya secara objektif dan berdasarkan kebenaran menyeluruh.
4. Bertindak sebagai pihak yang jujur dan dapat dipercaya kepada Pemberi Tugas atau Pemberi Pekerjaan.
5. Menghindari perbuatan yang mengelabui.
6. Berperilaku terhormat, penuh tanggung jawab, berbudi luhur, dan taat hukum demi menjunjung tinggi martabat, reputasi, dan kedayagunaan profesi.

Hasil Kerja

Dalam studi kasus ini, pemeriksaan kepatuhan atas belanja daerah bertujuan untuk menguji dan menilai apakah pemerintah daerah telah merancang dan mengimplementasikan sistem pengendalian intern (SPI) atas kegiatan belanja daerah secara memadai serta perencanaan dan pelaksanaan belanja daerah telah sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Pengujian Pengendalian

Tim Pemeriksa melakukan analisis atas hasil pemeriksaan terdahulu dan informasi lainnya untuk mengetahui efektivitas SPI pelaksanaan kegiatan pengadaan belanja daerah pada entitas yang diperiksa. Evaluasi SPI dilakukan dengan pendekatan *Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission* (COSO) terhadap lingkungan pengendalian, penilaian risiko, kegiatan pengendalian, informasi dan komunikasi, serta pemantauan.

Hasil evaluasi SPI dalam studi kasus ini diketahui bahwa SPI telah dirancang cukup memadai, akan tetapi dilaksanakan kurang efektif khususnya pada unsur lingkungan pengendalian dalam hal ini pengawasan yang dilakukan oleh Pejabat Pembuat Komitmen (PPK) selaku penanggungjawab kegiatan melalui Pengawas Internal dan Pengawasan Eksternal (Konsultan Pengawas) belum dilakukan dengan maksimal dimana masih terjadinya pelaksanaan kegiatan yang tidak sesuai dengan yang diperjanjikan dalam surat perjanjian kerja (SPK)/kontrak.

Atas dasar hasil pengujian pengendalian yang telah dilakukan, pemeriksa melakukan identifikasi atas pengadaan yang memiliki risiko pengendalian yang kurang efektif. Dalam studi kasus ini, risiko tersebut terdapat pada Pekerjaan Peningkatan Saluran Drainase Perkotaan dan Lingkungan Jl. Dr. Cipto (Lanjutan) senilai Rp.1.352.012.000,- yang dilaksanakan oleh Dinas Pekerjaan Umum dan Tata Ruang Kabupaten Sumenep.

Pengujian Substantif

Tahap pelaksanaan kontrak atas pekerjaan konstruksi merupakan tahapan yang sering dipilih Pemeriksa sebagai fokus utama dalam penugasan pemeriksaan. Hal ini sejalan dengan hasil pemetaan risiko ketidakpatuhan dalam tahapan pelaksanaan kontrak yang dapat menjadi titik kritis dalam pemeriksaan di antaranya yaitu:

1. Hasil pekerjaan yang diserahkan tidak memenuhi ketentuan volume terpasang yang diatur dalam kontrak.
2. Mutu hasil pekerjaan tidak sesuai dengan spesifikasi yang diatur dalam kontrak.
3. Pembayaran dilakukan tidak sesuai dengan hasil pekerjaan/ketentuan yang diatur dalam kontrak.

Dalam pengujian substantif, dilakukan pengujian bukti untuk mengidentifikasi adanya perbedaan yang signifikan antara kondisi dan kriteria. Pengujian substantif akan efektif jika dikombinasikan dengan metode pengumpulan bukti lainnya seperti inspeksi, perhitungan ulang, dan konfirmasi ekstern.

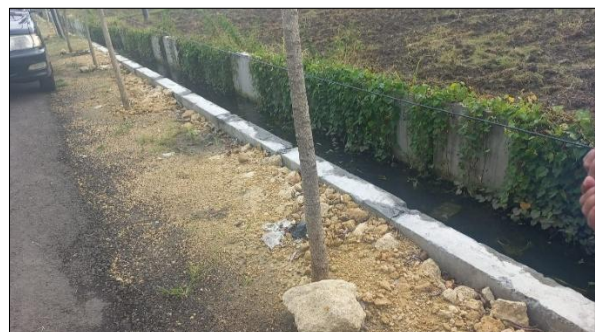
Pengujian Ketepatan Volume Terpasang

Pemeriksaan volume merupakan upaya untuk memastikan bahwa volume bahan, olume pekerjaan, pengukuran hasil, dan pekerjaan dilakukan sesuai volume yang ditentukan dalam dokumen kontrak. Langkah pemeriksaan pekerjaan konstruksi yang diterapkan sesuai dengan metode pengumpulan bukti, di antaranya adalah:

1. Melakukan pemeriksaan dan analisis dokumen untuk memastikan rincian dan volume pekerjaan telah sesuai antara kontrak/amandemen kontrak, *bill of quantity*, Berita Acara Serah Terima (BAST) Pekerjaan, *mutual check*, laporan kemajuan pekerjaan, dan *back up data*. Dokumen pelaksanaan pekerjaan tersebut, harus dipastikan telah disetujui dan otorisasi oleh pejabat yang berwenang, penyedia, dan konsultan. Hasil pengujian menunjukkan Dokumen Berita Acara Serah Terima Pekerjaan sudah dilampiri hasil pengukuran dan perhitungan yang memadai.
2. Pemeriksaan fisik di lapangan dilakukan dengan mengukur dimensi bangunan dan melakukan perhitungan jumlah atau volume fisik terpasang pekerjaan bersama PPK, Pejabat Pelaksana Teknis Kegiatan (PPTK), Penyedia, dan Konsultan Pengawas untuk memastikan kesesuaian antara kondisi lapangan dengan *as built drawing*, *back up data*, dan rincian item pekerjaan pada *bill of quantity* yang tercantum dalam kontrak/amandemen kontrak. Pengukuran yang dilakukan meliputi jumlah *U-Ditch*, volume penghamparan aspal emulsi (CPHMA), dan pengadaan tabebuya. Hasil pemeriksaan fisik dituangkan dalam Berita Acara Hasil Pengujian Fisik. Hasil pemeriksaan fisik dapat menggunakan aplikasi untuk mempermudah perhitungan volume pekerjaan konstruksi.
3. Melakukan perhitungan ulang volume *back up data* berdasarkan hasil pemeriksaan fisik. Jika tidak dimungkinkan mengukur dimensi pekerjaan konstruksi secara langsung di lapangan, kontrol pengukuran dimensi pekerjaan konstruksi dapat dilakukan dengan pengujian atas *as built drawing*. Perhitungan volume pada *back up data* kemudian dibandingkan dengan foto pelaksanaan dan *as built drawing* untuk memastikan jumlah dan dimensi setiap item pekerjaan telah sesuai. Perlu dipastikan bahwa perhitungan volume pada *back up data* telah menggunakan perhitungan yang memadai

yaitu menghitung jumlah *U-ditch* terpasang, menghitung jumlah tanaman tabebuya yang hidup dan sesuai spesifikasi ketinggian yang ditetapkan dalam kontrak. Untuk pengukuran volume penghamparan aspal emulsi (CPHMA) dilakukan dengan mengukur Panjang, lebar dan ketebalan yang sudah terlaksana di lapangan. Pengujian dapat juga dilakukan dengan menggunakan foto-foto pelaksanaan untuk melihat material konstruksi yang digunakan. Jika dari hasil analisis ditemukan pekerjaan konstruksi tidak dihitung dengan volume yang benar dan tidak dikerjakan dengan material yang sesuai, maka dilakukan perhitungan ulang untuk mengoreksi volume dan biaya pekerjaan tersebut. Hasil pengujian dengan melakukan perhitungan ulang berdasarkan hasil pengukuran Bersama dijumpai kekurangan volume pekerjaan yang dilakukan oleh penyedia jasa sehingga menimbulkan kelebihan pembayaran yang dilakukan pemerintah daerah kepada penyedia jasa. Kekurangan volume terjadi pada item pekerjaan penghamparan aspal emulsi, hasil ini disebabkan karena adanya perbedaan hasil pengukuran yang dilakukan oleh Auditor Bersama penyedia, konsultan pengawas dan PPK dengan data pengukuran sebelumnya. Untuk jumlah pohon tabebuya yang ditanam juga terjadi kekurangan, hal ini disebabkan ada Sebagian pohon yang mati atau hilang pada saat pemeriksaan. Hal ini tetap menjadi tanggung jawab penyedia karena masih dalam masa pemeliharaan.

4. Melakukan konfirmasi dan klarifikasi kepada PPK, Penyedia, dan/atau Konsultan Pengawas jika dari hasil analisis foto-foto pelaksanaan menunjukkan terdapat item pekerjaan tidak dilaksanakan dan/atau material konstruksi yang digunakan tidak sesuai dengan spesifikasi yang diatur dalam kontrak/amandemen kontrak. Selain itu, konfirmasi dan klarifikasi kepada PPK, Penyedia, dan/atau Konsultan Pengawas perlu dilakukan jika terdapat selisih perhitungan volume item pekerjaan terpasang dengan volume *back up data*. Hasil konfirmasi dan klarifikasi dituangkan dalam Berita Acara Konfirmasi. Hasil pengujian diakui terdapat kekurangan volume item pekerjaan yaitu penghamparan aspal emulsi dan penanaman pohon tabebuya.



Gambar 2. Pemasangan U-Ditch dan Penanaman Tabebuya pada Pekerjaan Peningkatan Saluran Drainase Perkotaan dan Lingkungan Jl. Dr. Cipto (Lanjutan)

Pengujian Duplikasi Pekerjaan

Duplikasi pekerjaan merupakan salah satu risiko yang dapat terjadi dalam pengadaan konstruksi dengan amandemen kontrak atas pekerjaan tambah maupun pada pengadaan konstruksi yang dilaksanakan bertahap seperti

pada studi kasus ini. Langkah pemeriksaan pekerjaan konstruksi yang diterapkan sesuai dengan metode pengumpulan bukti, di antaranya adalah melakukan analisis dokumen *bill of quantity* untuk memastikan tidak ada duplikasi pekerjaan yang diakui pada rincian pekerjaan. Duplikasi pekerjaan ganda dapat terjadi pada item pekerjaan yang merupakan satu kesatuan pekerjaan, pekerjaan tambah serupa dengan pekerjaan lain yang sudah ada dalam kontrak, ataupun item pekerjaan yang sama diakui sebagai progress pekerjaan pada kedua tahapan pengadaan konstruksi

Hasil pengujian tidak dijumpai duplikasi kegiatan pada item pekerjaan yang merupakan satu kesatuan pekerjaan, pekerjaan tambah serupa dengan pekerjaan lain yang sudah ada dalam kontrak, ataupun item pekerjaan yang sama diakui sebagai progress pekerjaan pada pekerjaan sebelumnya

Pengujian Ketepatan Mutu Pekerjaan

Pemeriksaan mutu pekerjaan antara lain bertujuan untuk menjamin bahwa hasil pekerjaan konstruksi memenuhi syarat umum kontrak, spesifikasi/syarat-syarat teknis, gambar rencana/desain, dan umur rencana. Langkah pemeriksaan pekerjaan konstruksi yang diterapkan sesuai dengan metode pengumpulan bukti, di antaranya adalah sertifikat dari pabrikan dengan spesifikasi teknis kontrak. Hasil pengujian mutu pekerjaan sudah sesuai dengan mutu yang dipersyaratkan dalam kontrak pekerjaan, yaitu Mutu *U-Ditch* K-300. Sedangkan untuk spesifikasi tanaman dipersyaratkan diameter pohon 10–12 cm dengan ketinggian 2 m.

Pengujian Kesesuaian Pembayaran

Langkah pemeriksaan atas kesesuaian pembayaran dan pembentuk harga satuan pekerjaan yang diterapkan sesuai dengan metode pengumpulan bukti, di antaranya adalah:

1. Melakukan *review* atas dokumen *bill of quantity*, *back up data*, dan Harga Perkiraan Sendiri (HPS) serta membandingkannya dengan dokumen pembayaran untuk melihat kesesuaian item pembayaran. Menganalisis pembentuk harga satuan untuk setiap item pekerjaan pada *bill of quantity*, HPS, dan analisis harga satuan pekerjaan sesuai dengan ketentuan dalam kontrak.
2. Dalam studi kasus ini, terdapat kekurangan volume penghamparan aspal emulsi (CPHMA) sehingga terdapat kelebihan pembayaran yang dilakukan oleh pemerintah daerah kepada penyedia jasa.
3. Dalam *study* kasus ini juga dijumpai terdapat tanaman tabebuya yang mati sehingga jumlah tanaman yang bisa diterima tidak sesuai dengan jumlah tanaman yang ada dalam kontrak.

Hasil pengujian yang dilakukan sudah memadai. Pengajuan pembayaran sudah mengacu kepada hasil perhitungan di lapangan yang dilakukan bersama antara penyedia, konsultan pengawas, dan PPK yang dituangkan dalam perhitungan MC 100 dan ditandatangani bersama. Namun hasil pengujian yang dilakukan auditor terdapat koreksi perhitungan volume aspal emulsi yang dihampar oleh rekanan. Sehingga ada pengembalian kelebihan pembayaran yang diterima oleh penyedia jasa yang disetorkan ke kas daerah.



Gambar 3. Penghamparan Aspal Emulsi (CPHMA) pada Pekerjaan Peningkatan Saluran Drainase Perkotaan dan Lingkungan Jl. Dr. Cipto (Lanjutan)

Hasil Pengujian Pemeriksaan

Dari hasil pengujian yang dilakukan dalam pemeriksaan atas belanja daerah dalam studi kasus ini diketahui bahwa terdapat kelebihan pembayaran akibat kekurangan volume atas hasil perhitungan volume terpasang yang diakui pada kedua tahapan pembangunan konstruksi dengan total sebesar Rp.11.312.193,88 atau 0,84% dari nilai kontrak Peningkatan Saluran Drainase Perkotaan dan Lingkungan Jl. Dr. Cipto (Lanjutan) senilai Rp.1.352.012.000,- yang dilaksanakan oleh Dinas Pekerjaan Umum dan Tata Ruang Kab. Sumenep dengan rincian pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Perhitungan Volume Aspal Emulsi (CPHMA) Hasil Pengukuran Bersama di Lapangan pada Pekerjaan Peningkatan Saluran Drainase Perkotaan dan Lingkungan Jl. Dr. Cipto (Lanjutan)

No	Panjang	lebar	Tinggi	Jumlah
1	23,20	0,50	0,06	0,75
2	5,80	1,00	0,06	0,37
3	26,00	0,50	0,06	0,84
4	9,00	0,80	0,06	0,46
5	8,40	2,00	0,06	1,08
6	39,60	0,50	0,06	1,28
7	3,20	0,80	0,06	0,17
8	46,10	0,50	0,06	1,49
9	3,30	1,00	0,06	0,21
Jumlah				6,65

Tabel 2. Kelebihan Pembayaran Akibat Kekurangan Volume Atas Hasil Perhitungan Volume Terpasang dan Penanaman Pohon Tabebuya yang Mati pada Pekerjaan Peningkatan Saluran Drainase Perkotaan dan Lingkungan Jl. Dr. Cipto (Lanjutan)

No	Uraian	Volume	Harsat	Jumlah
1	Aspal Emulsi (CPHMA)	16,00	493.400,00	7.894.400,00
2	Penanaman Tabebuya	1,57	2.177.764,11	3.417.793,88
Jumlah				11.312.193,88



Kesimpulan

Implementasi etika dan profesionalisme keinsinyuran dalam pelaksanaan pemeriksaan diwujudkan dengan melaksanakan prosedur pemeriksaan secara jujur dan bertanggung jawab serta obyektif dalam memberikan penilaian atas pelaksanaan pengadaan yang diperiksa, simpulan atas permasalahan/penyimpangan yang terjadi dan rekomendasi atas hasil pemeriksaan sehingga akan memberikan keyakinan terbaik atas kualitas hasil pemeriksaan.

Ucapan Terimakasih

Ungkapan terima kasih yang terutama kepada ALLAH SWT yang telah meridhoi penulisan artikel ini sebagai piranti penyelesaian Program Studi Program Profesi Insinyur. Ucapan terima kasih kepada para dosen pembimbing pada Program Studi Program 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 Pemkab Sumenep dan Inspektorat Kabupaten Sumenep yang telah memfasilitasi dalam penyelesaian program studi Program Profesi insinyur.

Terima kasih kepada teman - teman tim penyusun artikel sesama mahasiswa Program Studi Profesi Insinyur Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya, atas dukungan moril dan bantuan selama proses penyusunan artikel ini.

Referensi

- Badan Pemeriksa Keuangan Republik Indonesia. (2021). *Pemeriksaan kepatuhan pelaksanaan pekerjaan konstruksi* (No. P02.0/XII.3.4/2021). Direktorat Litbang, Ditama Revbang, Jakarta, Indonesia.
- Persatuan Insinyur Indonesia. *Kode etik insinyur Indonesia*. <https://www.scribd.com/doc/251115386/KODE-ETIK-PII>
- Republik Indonesia. (2004). *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 15 Tahun 2004 tentang pemeriksaan pengelolaan dan tanggung jawab keuangan negara* (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2004 Nomor 66). Jakarta, Indonesia.
- Republik Indonesia. (2014). *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2014 tentang keinsinyuran* (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2014 Nomor 61). Jakarta, Indonesia.

Implementasi Algoritma *Best-Fit Decreasing* pada *One-Dimensional Cutting Stock Problem* untuk Produksi Tower BTS

Okie Anita Candra Dewi^{1,2} Eka Wisnu
Wardhana^{1,3} Awang Djohan Bachtiar^{1,4}
Lusia P. S. Hartanti¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

² Program Studi Teknik Logistik, Universitas Internasional Semen Indonesia

³ Komisioner KPU Provinsi Jawa Timur

⁴ PT. Petrokimia Gresik

✉ okie.dewi@uisi.ac.id

Permasalahan *cutting stock* merupakan isu penting dalam proses manufaktur yang menuntut efisiensi material untuk mendukung praktik produksi berkelanjutan. Pada industri konstruksi menara BTS, baja siku perlu dipotong sesuai kebutuhan produksi dengan meminimalkan limbah material. Penelitian ini mengimplementasikan algoritma heuristik *Best-Fit Decreasing* (BFD) berbasis *Visual Basic for Applications* (VBA) di Microsoft Excel untuk menghasilkan pola pemotongan optimal. Algoritma bekerja dengan mengurutkan ukuran potongan secara menurun dan menempatkannya pada batang dengan ruang tersisa paling sesuai, sehingga sisa potongan (*waste*) dapat ditekan seminimal mungkin. Hasil implementasi menunjukkan bahwa metode BFD-VBA mampu menghasilkan pola pemotongan yang efisien, realistis, dan mudah diterapkan di lingkungan industri tanpa memerlukan perangkat lunak optimasi kompleks. Sistem ini mempercepat proses perencanaan hingga tiga kali lebih cepat dibandingkan metode manual, sekaligus mendukung efisiensi material dan pengurangan limbah produksi. Temuan ini menegaskan bahwa penerapan algoritma heuristik adaptif dapat menjadi solusi berkelanjutan dalam manajemen produksi, sejalan dengan prinsip *lean manufacturing* dan efisiensi sumber daya di sektor manufaktur logam.

Kata kunci: *Cutting Stock Problem, Best-Fit Decreasing, Baja Siku, Berkelanjutan, Visual Basic Application*

Pendahuluan

Dalam industri manufaktur, efisiensi penggunaan material merupakan aspek yang sangat penting karena berpengaruh langsung terhadap biaya produksi dan daya saing perusahaan. Salah satu proses yang menentukan tingkat efisiensi tersebut adalah proses pemotongan material panjang seperti baja siku (*angle bar*), yang banyak digunakan sebagai elemen struktural dalam berbagai jenis konstruksi, termasuk rangka menara *Base Transceiver Station* (BTS). Dalam praktiknya, setiap batang baja berukuran standar harus dipotong menjadi beberapa bagian sesuai kebutuhan desain struktur (Gazzinelli et al, 2025).

Perencanaan pola pemotongan (*cutting plan*) yang tidak efisien akan menyebabkan meningkatnya sisa material (*leftover*) yang tidak dapat dimanfaatkan kembali, sehingga menimbulkan pemborosan (*waste*) dan berujung pada kenaikan biaya produksi. Kondisi ekonomi global yang fluktuatif dan persaingan industri yang semakin ketat mendorong perusahaan manufaktur untuk menekan biaya operasional dengan cara mengurangi limbah material sebanyak mungkin (Eldein & Sobhi, 2019).

Selain aspek ekonomi, isu efisiensi material juga berhubungan erat dengan prinsip *sustainability* dalam industri manufaktur. Pengurangan limbah material berarti menekan kebutuhan bahan baku baru dan mengurangi emisi karbon dari proses produksi, yang sejalan dengan pilar *environmental sustainability*.

Dengan demikian, optimalisasi proses pemotongan bukan hanya menjadi strategi efisiensi biaya (Umetani et al, 2003), tetapi juga bagian dari implementasi *green manufacturing* untuk mendukung produksi yang lebih ramah lingkungan (Byl & Slawinski, 2015).

Permasalahan tersebut dikenal sebagai *Cutting Stock Problem* (CSP) yang pertama kali diteliti oleh Gilmore & Gomory (1961), Kantorovich (1960), yaitu persoalan optimasi yang bertujuan untuk meminimalkan sisa material dengan tetap memenuhi kebutuhan berbagai ukuran potongan. Beberapa penelitian membahas CSP untuk satu dimensi pada industri otomotif pegas (Silalahi et al, 2022), industri baja (Tanir et al, 2019), aluminium *stock* (Silalahi et al, 2025), lembaran besi (Cui et al, 2015), pemotongan pipa (Savsar, 2021). Sedangkan pemotongan dua dimensi berkaitan tentang Industri lempengan logam (Eldein & Sobhi, 2019), industri kertas (Leao et al, 2017), berbagai objek (Francescatto & Júnior, 2025), serta CSP untuk tiga dimensi, seperti pemotongan *packaging* maupun furniture (Atika et al, 2022).

Secara umum, CSP dapat diselesaikan dengan dua pendekatan utama, yaitu metode optimasi matematis seperti *Integer Linear Programming* (Martinovic et al, 2019; Klosowski et al, 2018), *mixed integer linear programming* (Khamis & Harraz, 2025; Anett, 2025) dan metode heuristik seperti *First-Fit Decreasing* (FFD) (Aguiar & Marques, 2021), dan *Best-Fit Decreasing* (BFD) (Varsamis, 2017). Selain itu, beberapa penelitian menggunakan metaheuristik seperti *genetic algorithm*

(Shahin & Salem, 2004), *particle swarm optimization* (Silalahi et al, 2025), *simulated annealing* (Zheng & Li, 2024).

Meskipun pendekatan matematis menawarkan solusi optimal, penerapannya sering kali memerlukan sumber daya komputasi yang besar dan tidak selalu praktis untuk lingkungan produksi yang dinamis. Sebaliknya, metode heuristik memberikan solusi yang mendekati optimal dengan waktu perhitungan yang jauh lebih cepat dan mudah diimplementasikan, sehingga lebih sesuai untuk kebutuhan manufaktur berkelanjutan (*sustainable manufacturing*) yang menuntut efisiensi dan fleksibilitas.

Penelitian ini memfokuskan pada penerapan algoritma *Best-Fit Decreasing* (BFD) untuk menentukan pola pemotongan baja siku dalam pembuatan tower BTS. Algoritma BFD dipilih karena mampu menempatkan potongan secara efisien ke dalam batang dengan sisa panjang terkecil yang masih memungkinkan, sehingga menghasilkan efisiensi pemakaian material yang lebih baik dibandingkan metode konvensional. Implementasi dilakukan menggunakan *Visual Basic for Applications* (VBA) di Microsoft Excel, yang memungkinkan pengguna industri untuk melakukan perhitungan dan menghasilkan *cutting plan* secara otomatis tanpa memerlukan perangkat lunak khusus atau pengetahuan pemrograman lanjutan (Dewi & Wardhana, 2024).

Keunggulan utama dari sistem berbasis VBA ini adalah kemampuannya untuk langsung menampilkan hasil pemotongan setiap batang baja, termasuk informasi sisa potongan (*leftover*), sehingga operator di lapangan tidak perlu lagi melakukan pengukuran manual terhadap sisa batang. Dengan demikian, waktu pemotongan di pabrik dapat dipangkas hingga tiga kali lebih cepat dibandingkan metode konvensional. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga berkontribusi terhadap *sustainable production* dengan meminimalkan limbah material dan mendukung penerapan prinsip lean manufacturing dalam industri struktur baja (Rocha & Cristina, 2017).

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan tujuan untuk mengimplementasikan dan mengevaluasi efektivitas algoritma *Best-Fit Decreasing* (BFD) dalam menyelesaikan *one-dimensional cutting stock problem* (CSP) pada proses pemotongan batang baja untuk produksi komponen tower BTS. Metode ini berfokus pada penerapan algoritma dalam bentuk *Visual Basic for Applications* (VBA) pada Microsoft Excel, sehingga dapat diaplikasikan langsung oleh operator pabrik tanpa memerlukan perangkat lunak tambahan yang kompleks.

Data dan Objek Penelitian

Objek penelitian adalah data panjang batang baja dan kebutuhan potongan (*demand pattern*) yang diperoleh dari salah satu lini produksi tower BTS. Data terdiri atas:

- Panjang batang standar: 12 meter dan 6 meter.
- Jumlah dan ukuran potongan yang dibutuhkan bervariasi berdasarkan tipe komponen tower.
- Batas toleransi sisa potongan (*leftover*): ≤ 200 mm.
- Kerf 2mm karena lebar potongan yang terbuang karena proses pemotongan menggunakan pisau.

Tabel 1. Contoh Ukuran Potongan Baja Siku L50x50

No	Ukuran	Qty	Marking
1	4.062	1	6.033
2	1.194	8	7.016
3	840	1	7.013
4	840	1	7.012
5	1.217	8	7.011
6	1.701	8	7.010
7	1.707	8	7.009
8	1.217	4	7.008
9	1.217	4	7.007
10	1.000	4	6.044
11	1.000	4	6.043
12	958	2	6.042
13	808	2	6.041
14	402	2	6.040
15	706	2	6.039

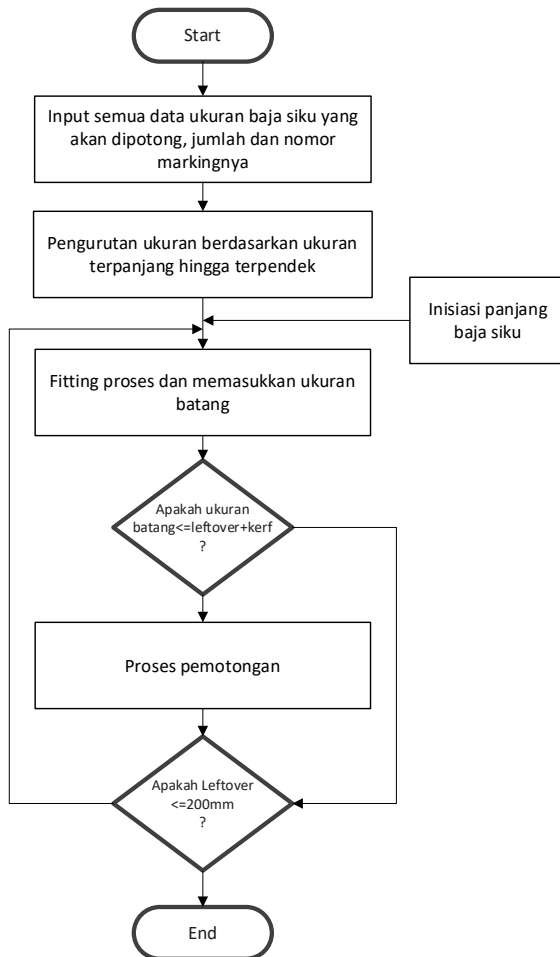
Data tersebut berfungsi sebagai input utama dalam penerapan algoritma *Best Fit Decreasing* (BFD). Contoh data dimensi baja siku yang akan dipotong untuk kebutuhan pembangunan menara BTS setinggi 52 meter dengan spesifikasi baja tipe L50x50 disajikan pada Tabel 1.

Prosedur Algoritma *Best-Fit Decreasing*

Langkah-langkah penyelesaian dengan algoritma BFD dapat dilihat pada Gambar 1 dan penjelasan sebagai berikut adalah sebagai berikut:

1. Pengurutan (*Sorting*) – Semua permintaan panjang potongan diurutkan secara menurun (*decreasing order*).
2. Inisialisasi Batang Baru – Batang pertama disiapkan untuk menampung potongan.
3. Penempatan Potongan (*Fitting Process*) – Setiap potongan dimasukkan ke batang dengan sisa panjang (*leftover*) paling sedikit yang masih dapat menampung potongan tersebut.
4. Pembentukan Batang Baru – Jika tidak ada batang yang dapat menampung potongan, maka batang baru ditambahkan.
5. Evaluasi Efisiensi – Total batang yang digunakan dan rata-rata *leftover* dihitung untuk mengukur tingkat efisiensi pemotongan.

Adapun konsep algoritma BFD dapat dilihat pada gambar di bawah ini:

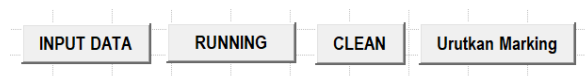


Gambar 1. Model Konseptual Best Fit Decreasing

Implementasi dalam Visual Basic for Applications (VBA)

Algoritma diimplementasikan menggunakan VBA Excel untuk menghasilkan hasil pemotongan secara otomatis. Fitur utama meliputi:

- *Input* otomatis data panjang potongan dari lembar kerja Excel.
- Proses komputasi BFD secara langsung menggunakan modul VBA.
- *Output* visual berupa daftar batang dan rincian ukuran potongan dalam setiap batang.
- Perhitungan *leftover* secara *real-time*.
- Implementasi ini memungkinkan hasil pemotongan langsung ditampilkan dan disesuaikan secara interaktif, tanpa perlu melakukan perhitungan manual.



Gambar 2. Tombol untuk Menjalankan VBA

Pada Gambar 2, dapat dilihat tombol yang disiapkan untuk memudahkan menjalankan VBA dengan sekali klik. Pada gambar tersebut terdapat tombol "Input Data" digunakan untuk menyimpan data sekaligus mengurutkan dari angka terbesar hingga paling kecil.

Hasil Kerja

Implementasi algoritma Best-Fit Decreasing

Algoritma BFD diimplementasikan menggunakan Visual Basic for Applications (VBA) di Microsoft Excel dengan modul yang memproses data panjang potongan dan panjang batang standar. Gambar 3 Berikut merupakan bahasa pemrograman yang digunakan untuk mengurutkan data ukuran baja siku dari nilai terbesar hingga terkecil. Selanjutnya, perintah "clean" berfungsi untuk membersihkan hasil eksekusi data pada lembar kerja Excel secara otomatis, sehingga meminimalkan kemungkinan terjadinya duplikasi atau kesalahan *input*.

Sementara itu, perintah "marking" digunakan untuk mengelompokkan dan menandai kode baja siku berdasarkan ukuran tertentu, yang sekaligus berfungsi sebagai penanda posisi atau lokasi setiap potongan pada rangka menara BTS. Pendekatan ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi proses pemotongan serta memastikan keteraturan dalam penyusunan elemen struktur tower.

```

Sub Descending()
Range("B4:C254").Select
Selection.Sort Key1:=Range("B4"),
Order1:=xlDescending, Header:=xlGuess, _
OrderCustom:=1, MatchCase:=False,
Orientation:=xlTopToBottom, _
DataOption1:=xlSortNormal
Range("D1").Select
End Sub
  
```

Gambar 3. Coding Descending

```

x = x + ukuran(j)
If ukuran(j) = 0 Then
GoTo 130
Else
If batang - x < 0 Then
x = Sheet4.Cells(56, 5 + a)
GoTo 110
ElseIf batang - x >= 20 Then
x = x + 20
Punch = Punch + 20
Sheet4.Cells(56, 5 + a) = x
Sheet4.Cells(57, 5 + a) = batang - x
looping(j) = looping(j) - 1
Sheet4.Cells(3 + j, 4) = looping(j)
angka2(j) = angka2(j) + 1
Sheet4.Cells(3 + j, 5 + a) = angka2(j)
y = y + 1
Sheet4.Cells(55, 5 + a) = y
Sheet1.Cells(56, 5 + a) = x
Sheet1.Cells(57, 5 + a) = batang - x
Sheet1.Cells(4 + j, 5 + a) = angka2(j)
Sheet1.Cells(55, 5 + a) = y
End If
  
```

Gambar 4. Cuplikan Coding Perhitungan Pemotongan

Setelah proses pengurutan data selesai, sistem kemudian menjalankan tahapan perhitungan pemotongan baja siku secara sistematis. Proses ini diawali dengan pemotongan dari ukuran terpanjang, kemudian sisa material (*leftover*) akan dioptimalkan dengan mencari ukuran potongan berikutnya yang paling mendekati panjang sisa tersebut agar meminimalkan limbah potongan. Setiap ukuran potong memiliki variasi panjang dan jumlah kebutuhan yang berbeda-beda, sehingga sistem berbasis VBA secara otomatis menghitung total batang baja yang diperlukan, serta mengidentifikasi kombinasi ukuran potong yang diambil dari setiap batang seperti pada Gambar 4. Selain itu, sistem juga menentukan panjang sisa (*leftover*) dari tiap batang baja yang belum terpakai. Dengan demikian, pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi pemanfaatan material, tetapi juga memberikan informasi rinci mengenai distribusi pemotongan dan sisa material pada setiap siklus produksi.

Hasil dan Analisis Implementasi Algoritma

Implementasi algoritma *Best-Fit Decreasing* (BFD) dilakukan menggunakan data aktual kebutuhan pemotongan batang baja siku untuk produksi tower BTS. Data ini mencakup dua panjang batang standar, yaitu 12.000 mm dan 6.000 mm, dengan total 207 variasi ukuran potongan. Sistem pemrosesan dikembangkan menggunakan VBA yang berfungsi untuk mengotomatisasi perhitungan pola pemotongan, menentukan urutan pemotongan yang optimal, serta menampilkan sisa material secara langsung untuk setiap batang baja.



PT. Cita Adi Nusantara

Jl. Raya Pahlawan Industri

Drawing No :

Project :

Tower :

Client :

PO Number :

Fabricator :

Date :

CUTTING PLAN

Problem MS L 50 x 50 x 5

Tahap	Drawing Length mm	Jumlah Potong Qty	Length mm	Cutting Faktor mm	Total Proses mm	Presentase %	Waste mm	Kebutuhan Lantai
98 marking 1	1025	720	1	720				
1024	720	1	720					
marking 3	1019	720	1	720				
marking 4	1018	720	1	720				
marking 5	1014	716	3	2 148				
marking 9	1012	716	4	2 864				
marking 7	6030	706	2	1 412				
marking 8	3045	681	1	681				
marking 10	3044	681	2	1 362	336	11 683	97,36	317
99 marking 1	6040	402	1	402				
marking 2	5055	402	2	804	63	1 269	10,58	16 731
Bersat satuan panjang L 50 x 50 x 5					Total waste		16 170	
					Total kebutuhan (Batang)		69	

Gambar 5. Hasil Running VBA

Pada skenario pertama, algoritma BFD diterapkan untuk baja siku L 50x50x5 dengan panjang batang 12.000 mm. Berdasarkan hasil perhitungan yang divisualisasikan pada Gambar 5, sistem menghasilkan kebutuhan sebanyak 69 batang baja untuk memenuhi 523 potongan dengan ukuran bervariasi. Hasil pemotongan menunjukkan rata-rata tingkat pemanfaatan bahan mencapai 99,33%, yang menunjukkan efisiensi pemotongan sangat tinggi. Total sisa material yang dihasilkan adalah 16.761 mm, termasuk *leftover* terbesar pada batang ke-69 sebesar 10.731 mm. Potongan sisa ini tergolong *usable leftover*, yaitu bagian sisa yang masih dapat dimanfaatkan pada

batch produksi berikutnya tanpa menimbulkan pemborosan bahan.

Pada skenario kedua, algoritma BFD diimplementasikan pada batang dengan panjang 6.000 mm dengan variasi ukuran potongan yang sama. Hasil pengolahan menunjukkan kebutuhan sebanyak 137 batang baja, menghasilkan total *waste* sebesar 10.926 mm. Salah satu batang terakhir masih memiliki sisa 3.048 mm yang juga tergolong *usable leftover*. Rata-rata tingkat pemanfaatan bahan mencapai 99,04% dengan efisiensi yang relatif stabil terhadap skenario sebelumnya, meskipun terdapat perbedaan panjang batang dan frekuensi pemotongan. Untuk memperjelas tingkat efisiensi kedua skenario tersebut, perbandingan hasil implementasi disajikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Perbandingan Efisiensi Pemotongan

Panjang Batang	Jumlah Batang	Total Potongan	Total Waste (mm)	Usable Leftover (mm)	Efisiensi Pemanfaatan (%)
12.000 mm	69 batang	523 potongan	16.761	10.731	99,33
6.000 mm	137 batang	523 potongan	10.926	3.048	99,04

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan batang standar yang lebih panjang mengurangi jumlah batang yang dibutuhkan, meskipun *waste absolut* meningkat akibat sisa potongan pada batang terakhir. Namun, proporsi *waste* terhadap total panjang material tetap kecil, sehingga efisiensi keseluruhan tetap tinggi. Algoritma *Best-Fit Decreasing* (BFD) terbukti efektif menangani permasalahan pemotongan satu dimensi dengan variasi ukuran kompleks melalui strategi pemilihan ruang tersisa paling sempit. Implementasi VBA Excel memungkinkan looping otomatis dengan mempertimbangkan *kerf loss* sebesar 2 mm, menghasilkan pola pemotongan yang realistis dan langsung dapat diterapkan di lapangan. Sistem ini mempersingkat waktu pemotongan hingga tiga kali lebih cepat dibandingkan metode manual sekaligus meningkatkan efisiensi material dan produktivitas proses fabrikasi.

Diskusi dan Implikasi

Hasil penelitian ini menegaskan bahwa algoritma heuristik seperti *Best-Fit Decreasing* (BFD) merupakan solusi praktis dan adaptif untuk menyelesaikan *Cutting Stock Problem* (CSP) pada lingkungan manufaktur yang dinamis, seperti produksi menara BTS. Pendekatan ini terbukti efisien dalam menangani variasi ukuran potongan yang kompleks tanpa memerlukan perangkat lunak optimasi tingkat lanjut.

Implementasi berbasis VBA Excel memberikan nilai tambah signifikan dengan menjembatani kebutuhan antara perhitungan matematis dan penerapan di lantai produksi, melalui kemudahan penggunaan, visualisasi hasil, serta kemampuan menyesuaikan data *input* secara fleksibel.

Secara teoretis, penelitian ini memperkuat bukti bahwa algoritma heuristik adaptif mampu menghasilkan solusi mendekati optimal dengan kompleksitas komputasi lebih rendah dibandingkan pendekatan matematis seperti MILP. Secara praktis, hasil ini mendukung penerapan prinsip lean manufacturing melalui peningkatan efisiensi material, produktivitas, dan kecepatan proses fabrikasi di industri logam.

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan algoritma *Best-Fit Decreasing* (BFD) untuk menyelesaikan *one-dimensional cutting stock problem* (CSP) pada pemotongan baja siku dalam produksi tower BTS menggunakan VBA Excel. Hasil menunjukkan efisiensi material di atas 99% pada batang panjang 12.000 mm dan 6.000 mm, dengan waktu proses pemotongan hingga tiga kali lebih cepat dibandingkan metode manual. Sistem ini juga mengurangi kesalahan perhitungan panjang potongan dan *leftover*, sehingga meningkatkan akurasi dan produktivitas proses produksi.

Untuk pengembangan selanjutnya, model dapat diperluas ke *multi-dimensional cutting stock* dengan mempertimbangkan faktor ketebalan, arah pemotongan, serta *kerf loss*. Selain itu, algoritma BFD berpotensi dioptimalkan melalui integrasi dengan metode metaheuristik seperti *Genetic Algorithm* (GA) atau *Particle Swarm Optimization* (PSO), serta dikembangkan menjadi aplikasi mandiri berbasis GUI guna mendukung efisiensi dan transformasi digital di industri manufaktur logam.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Persatuan Insinyur Indonesia (PII) Gresik atas dukungan, arahan, dan fasilitasi yang diberikan selama proses penelitian ini.

Referensi

- Aguiar, S. S., & Marques, M. (2021). Modified Greedy Heuristic for the one-dimensional cutting stock problem. *Journal of Combinatorial Optimization*, 42(3), 657–674. <https://doi.org/10.1007/s10878-021-00695-4>
- Anett, R. (2025). A MILP model for one dimensional cutting stock problem with adjustable *leftover* threshold and cutting cost. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications*, 15(2), 215–224.
- Atika, M., Silalahi, B. P., Bukhari, F., & Sciences, N. (2022). Pattern Generation for Three Dimensional Cutting Stock Problem. *Jurnal Teori Dan Aplikasi Matematika*, 6(4), 991–1003. <https://doi.org/10.31764/jtam.v6i4.9933>
- Byl, C. A. Van Der, & Slawinski, N. (2015). Embracing Tensions in Corporate Sustainability: A Review of Research From Win-Wins and Trade-Offs to Paradoxes and Beyond. *Organization & Environment*, 28(1), 54–79. <https://doi.org/10.1177/1086026615575047>
- Cui, Y., Zhong, C., & Yao, Y. (2015). Pattern-set generation algorithm for the one-dimensional cutting stock problem with setup cost. *European Journal of Operational Research*, 243(2), 540–546. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.015>
- Dewi, O. A. C., & Wardhana, E. W. (2024). Pengembangan Sistem Penghitungan Konversi Suara Kursi Parlemen Metode Sainte Lague Berbasis Visual Basic Application. *Jurnal Tata Kelola Pemilu Indonesia*, 6(1), 71–92. <https://doi.org/https://doi.org/10.46874/tpk.v6i1.1387>
- Eldein, S. A. S., & Sobhi, N. (2019). Waste reduction by linear programming optimizing. In *18th International Conference on Aerospace Science & Aviation Technology*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/610/1/012079>
- Francescatto, M., & Júnior, A. N. (2025). Two-dimensional bin packing, cutting stock, and open dimension problems: A survey of practical requirements. *Computers and Operations Research*, 183, 107209. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107209>
- Gazzinelli, G., Kelly, G., Poldi, C., & Martin, M. (2025). Mathematical models for the one-dimensional cutting stock problem with setups and open stacks. *Journal of Combinatorial Optimization*, 49(3), 1–35. <https://doi.org/10.1007/s10878-025-01276-5>
- Gilmore, P. C., & Gomory, R. E. (1961). Linear programming approach to the cutting-stock problem. *Operations Research*, 9(6), 849–859.
- Kantorovich, L. V. (1960). Mathematical methods of organizing and planning production. *Management Science*, 6(4), 366–422.
- Khamis, N., & Harraz, N. (2025). Minimizing waste and costs in multi-level manufacturing: A Novel integrated lot sizing and cutting stock model using multiple machines. *Modelling*, 6(56), 1–27.
- Kłosowski, G., Kozłowski, E., & Gola, A. (2018). Integer Linear programming in optimization of waste after cutting in the furniture manufacturing. In A. Burduk & D. Mazurkiewicz (Eds.), *Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance* (pp. 260–270). Springer International Publishing.
- Leao, A. A. S., Furlan, M. M., & Toledo, F. M. B. (2017). Decomposition methods for the lot-sizing and cutting-stock problems in paper industries. *Applied Mathematical Modelling*, 48, 250–268. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.04.010>
- Martinovic, J., Hähnle, M., Scheithauer, G., Dargie, W., & Fischer, A. (2019). Cutting stock problems with nondeterministic item lengths: A new approach to server consolidation. *4OR*, 17(2), 173–200. <https://doi.org/10.1007/s10288-018-0384-4>



- Rocha, K., & Cristina, A. (2017). Sustainable operations : The cutting stock problem with usable *leftovers* from a sustainable perspective. *Journal of Cleaner Production*, 167, 545–552.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.153>
- Savsar, M. (2021). A linear programming optimization model to minimize waste in cutting steel rods for table manufacturing. In *3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications*.
- Shahin, A. A., & Salem, O. M. (2004). Using genetic algorithms in solving the one- dimensional cutting stock problem in the construction industry. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31, 321–332.
<https://doi.org/10.1139/L03-101>
- Silalahi, B. P., Aminah, S., Aman, A., & Mayyani, H. (2025). Particle swarm optimization for cutting aluminum stock and its comparison with the. *Journal of Mathematics and Its Applications*, 19(4), 2791–2802.
- Silalahi, B. P., Hanum, F., Setyawan, F., & Supriyo, P. T. (2022). One-dimensional cutting stock problem that minimizes the number of different patterns. *Journal of Mathematics and Its Applications*, 16(3), 805–814.
<https://doi.org/10.30598/barekengvol16iss3pp805-814>
- TTanir, D., Ugurlu, O., Guler, A., & Nuriyev, U. G. (2019). One-dimensional cutting stock problem with divisible items: A case study in steel industry. *TWMS Journal of Applied and Engineering Mathematics*, 9(3), 473–484.
- Umetani, S., Yagiura, M., & Ibaraki, T. (2003). One-dimensional cutting stock problem to minimize the number of different patterns. *European Journal of Operational Research*, 146(2), 388–402.
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00239-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00239-4)
- Varsamis, D. (2017). On the parallel implementation of best fit decreasing algorithm in Matlab. *Contemporary Engineering Sciences*, 10(19), 945–952.
<https://doi.org/10.12988/ces.2017.79120>
- Zheng, Z., & Li, Y. (2024). Automated boarding layout and waste optimization for exterior walls using simulated annealing algorithm. In S. Li (Ed.), *Computational and experimental simulations in engineering* (pp. 747–767). Springer Nature Switzerland.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-44947-5_58



Evaluasi Risiko Operasional Proyek Jalan Masing CPP Senoro Melalui Pendekatan FMEA dan Mitigasi Berbasis Hor 2 pada PT Banggai Sentral Sulawesi (PT BSS)

Richard Renaldy Bukamo¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya
Mandala Surabaya

✉ richard@ptbss.id

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan merumuskan strategi mitigasi untuk risiko operasional pada proyek pembangunan Jalan Masing CPP Senoro. Metode yang digunakan adalah deskriptif kuantitatif dengan pendekatan studi kasus. Data dikumpulkan melalui observasi lapangan, wawancara, kuesioner, dan studi dokumentasi. Analisis risiko dilakukan dengan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk mengidentifikasi 15 risiko operasional dan memprioritaskannya berdasarkan *Risk Priority Number* (RPN). Hasil FMEA menunjukkan tiga risiko prioritas tertinggi, yaitu cuaca ekstrem (RPN 422), kecelakaan kerja berat (RPN 404), dan dampak lingkungan (RPN 353). Selanjutnya, dirancang strategi mitigasi menggunakan *House of Risk* fase 2 (HOR 2) untuk menganalisis efektivitas dan tingkat kesulitan dari enam tindakan pencegahan. Berdasarkan perhitungan rasio *Effectiveness to Difficulty* (ETD), strategi pelatihan, pemantauan, dan kepatuhan berkelanjutan teridentifikasi sebagai prioritas utama mitigasi. Hasil penelitian ini memberikan kerangka kerja yang sistematis dan terukur bagi PT Banggai Sentral Sulawesi dalam mengelola risiko operasional, sehingga dapat meningkatkan kinerja proyek dalam aspek keselamatan, waktu, biaya, dan keberlanjutan lingkungan.

Kata kunci: Manajemen Risiko, FMEA, *House of Risk* (HOR), Proyek Konstruksi dan Migas

Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur jalan memiliki peran penting dalam mendukung kelancaran aktivitas industri migas, terutama pada wilayah operasi strategis seperti *Central Processing Plant* (CPP) Senoro. Sebagai perusahaan yang berperan dalam penyediaan jasa penunjang di sektor energi, PT Banggai Sentral Sulawesi dihadapkan pada berbagai tantangan operasional dalam proyek pembangunan dan pemeliharaan jalan Masing CPP Senoro. Kompleksitas proyek ini tidak hanya berkaitan dengan aspek teknis konstruksi, tetapi juga mencakup faktor lingkungan, keselamatan kerja, sumber daya manusia, serta keterbatasan logistik di area operasi terpencil. Kondisi tersebut menjadikan manajemen risiko sebagai elemen krusial untuk menjamin keberhasilan dan keberlanjutan proyek.

Dalam konteks proyek jalan di lingkungan industri migas, risiko operasional dapat muncul pada berbagai tahapan, mulai dari perencanaan, mobilisasi peralatan, pelaksanaan pekerjaan, hingga tahap pengawasan dan pemeliharaan. Risiko-risiko seperti keterlambatan pasokan material, kerusakan alat berat, kecelakaan kerja, hingga faktor cuaca ekstrem dapat menghambat pencapaian target (Ariyanto et al, 2020). Tanpa adanya sistem evaluasi risiko yang terstruktur, potensi kerugian finansial, penurunan produktivitas, dan dampak terhadap keselamatan kerja dapat meningkat secara signifikan (Mohamad et al, 2024).

Untuk mengantisipasi hal tersebut, pendekatan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) menjadi salah satu metode yang efektif dalam mengidentifikasi, menganalisis, dan memprioritaskan potensi kegagalan berdasarkan tingkat keparahan (*severity*), kemungkinan terjadinya (*occurrence*),

dan kemampuan deteksi (*detection*) proyek (Cornelis et al, 2025). Dengan FMEA, setiap potensi risiko dapat dinilai secara kuantitatif melalui perhitungan *Risk Priority Number* (RPN), sehingga manajemen proyek dapat menentukan fokus mitigasi pada risiko dengan prioritas tertinggi (Mohamad et al, 2025).

Namun demikian, proses mitigasi tidak cukup hanya dengan mengidentifikasi risiko, tetapi juga memerlukan strategi penanganan yang sistematis dan terukur. Oleh karena itu, integrasi dengan metode *House of Risk* (HOR) tahap 2 menjadi langkah lanjutan untuk merumuskan tindakan mitigasi yang efektif dan efisien (Mohamad et al, 2024). Melalui HOR 2, hubungan antara agen penyebab risiko dan tindakan mitigasi dapat dianalisis secara komprehensif sehingga menghasilkan strategi prioritas yang mampu mengurangi kemungkinan terjadinya risiko secara signifikan dengan penggunaan sumber daya yang optimal.

Penerapan kombinasi FMEA dan HOR 2 dalam evaluasi risiko operasional proyek jalan Masing CPP Senoro diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan kinerja proyek, baik dari aspek keselamatan, kualitas, biaya, maupun waktu penyelesaian. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi acuan bagi perusahaan dalam mengembangkan sistem manajemen risiko yang adaptif, terukur, dan berorientasi pada perbaikan berkelanjutan di lingkungan proyek konstruksi sektor energi.

Metode

1. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kuantitatif dengan pendekatan studi kasus (*case study*). Fokus penelitian diarahkan untuk menganalisis dan mengevaluasi risiko operasional pada proyek jalan

Masing CPP Senoro yang dilaksanakan oleh PT Banggai Sentral Sulawesi. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk mengukur tingkat risiko dan menentukan prioritas mitigasi berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) serta *House of Risk* (HOR) tahap 2.

2. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di area proyek Jalan Masing CPP Senoro, yang berlokasi di Kabupaten Banggai, Sulawesi Tengah. Lokasi ini dipilih karena memiliki karakteristik operasional yang kompleks dan berisiko tinggi akibat kondisi geografis, faktor lingkungan, serta keterkaitan dengan aktivitas industri migas di sekitar *Central Processing Plant* (CPP) Senoro. Waktu penelitian dilakukan selama periode September Hingga Oktober 2025, meliputi tahap pengumpulan data, analisis, dan penyusunan rekomendasi mitigasi risiko.

3. Sumber dan Jenis Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari:

- Data primer, diperoleh melalui observasi lapangan, wawancara terstruktur, dan penyebaran kuesioner kepada pihak-pihak yang terlibat langsung dalam proyek, seperti manajer proyek, pengawas lapangan, operator alat berat, serta tenaga teknis PT Banggai Sentral Sulawesi.
- Data sekunder, berupa dokumen perusahaan seperti laporan kemajuan proyek, data kecelakaan kerja, laporan gangguan operasional, serta catatan pemeliharaan alat dan material.

4. Tahapan Penelitian

Langkah-langkah penelitian dilakukan secara sistematis melalui beberapa tahapan berikut:

(1) Identifikasi Risiko Operasional

Dilakukan dengan mengumpulkan seluruh potensi kejadian yang dapat menimbulkan gangguan terhadap keberlangsungan proyek. Proses ini dilakukan melalui wawancara mendalam, observasi langsung, dan telaah dokumen proyek.

(2) Penilaian Risiko dengan FMEA

Setiap risiko yang teridentifikasi dianalisis menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dengan menilai tiga parameter utama:

- *Severity* (S): tingkat keparahan dampak risiko.
- *Occurrence* (O): kemungkinan terjadinya risiko.
- *Detection* (D): kemampuan sistem mendeteksi risiko.

Nilai *Risk Priority Number* (RPN) dihitung menggunakan rumus:

$$RPN = S \times O \times D$$

Risiko dengan nilai RPN tertinggi akan diprioritaskan untuk mitigasi.

(3) Perancangan Strategi Mitigasi dengan *House of Risk* (HOR) Tahap 2

Berdasarkan hasil HOR tahap 1, ditentukan serangkaian tindakan mitigasi (*preventive actions*). HOR tahap 2 digunakan untuk menilai efektivitas relatif tindakan tersebut melalui rasio antara total efektivitas tindakan terhadap tingkat kesulitan

implementasi (*difficulty*), sehingga diperoleh prioritas mitigasi paling efisien.

Hasil Kerja

Tahapan-Tahapan FMEA

Evaluasi risiko operasional pada proyek Jalan Masing CPP Senoro dilakukan melalui beberapa tahapan analisis menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). Tahapan FMEA yang dilakukan dalam penelitian ini terdiri atas lima langkah utama, yaitu identifikasi risiko, penentuan faktor penyebab, penilaian parameter risiko, perhitungan RPN, dan penentuan prioritas risiko. Tahapan penelitian dan hasilnya dapat dilihat sebagai berikut pada Tabel 1.

1. Identifikasi Risiko

Berdasarkan hasil observasi lapangan, wawancara dengan tim proyek, serta kajian terhadap dokumen proyek, diperoleh 15 risiko operasional yang dikelompokkan ke dalam enam kategori utama, yaitu :

- a) K3 dan Keamanan,
- b) Lingkungan dan Cuaca,
- c) Teknis dan Konstruksi,
- d) Manajemen Proyek,
- e) Eksternal dan Logistik, dan
- f) Hukum dan Administratif.

2. Penentuan Faktor Penyebab Resiko

3. Penilaian Parameter Risiko (*Severity, Occurrence, Detection*)

Setiap risiko dinilai menggunakan tiga parameter utama dalam FMEA, yaitu:

- a) *Severity* (S) : tingkat keparahan dampak apabila risiko terjadi.
- b) *Occurrence* (O): kemungkinan terjadinya risiko.
- c) *Detection* (D): kemampuan sistem mendeteksi atau mencegah risiko sebelum menimbulkan dampak.

Penilaian dilakukan dengan skala 1–10, di mana nilai yang lebih tinggi menunjukkan risiko yang lebih serius.

4. Perhitungan Risk Priority Number (RPN)

Nilai RPN dihitung dengan mengalikan ketiga parameter ($RPN = S \times O \times D$). Nilai RPN digunakan untuk menentukan prioritas penanganan risiko.

Tabel 1. Hasil RPN

Kategori Risiko	Risiko	S	O	D	RPN
K3 dan Keamanan	Kecelakaan kerja berat (tabrak alat, keracunan gas)	10	4	4	404
K3 dan Keamanan	Pelanggaran prosedur K3 area berbahaya (<i>hot work</i>)	9	3	3	273
Lingkungan dan Cuaca	Cuaca ekstrem (hujan deras) menghentikan pekerjaan	6	7	2	422
Lingkungan dan Cuaca	Dampak lingkungan (debu, kebisingan, tumpahan)	5	7	3	353
Teknis dan Konstruksi	Kondisi tanah yang tidak terduga	7	3	5	215
Teknis dan Konstruksi	Keterlambatan pengiriman material utama (aspal)	8	2	3	163

Teknis dan Konstruksi	Kualitas material tidak sesuai spesifikasi	8	3	4	244
Teknis dan Konstruksi	Kerusakan/ <i>Breakdown</i> peralatan utama	7	3	3	213
Manajemen Proyek	Koordinasi buruk dengan manajemen CPP	8	2	3	163
Manajemen Proyek	Perencanaan waktu yang tidak realistis	7	2	4	144
Manajemen Proyek	Komunikasi internal yang buruk	6	3	5	185
Eksternal dan Logistik	Fluktuasi harga material yang tajam	8	4	4	324
Eksternal dan Logistik	Gangguan operasional CPP menyebabkan <i>work stoppage</i>	7	4	3	283
Hukum dan Administratif	Klaim dan konflik kontrak	8	2	5	165
Hukum dan Administratif	Keterlambatan perizinan internal CPP	6	2	4	124

Metode FMEA digunakan untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan memprioritaskan risiko operasional dalam proyek Jalan Masing CPP Senoro.

- 1) FMEA berhasil mengidentifikasi 15 risiko operasional yang dikelompokkan ke dalam 6 kategori (K3, Lingkungan, Teknis, Manajemen, Logistik, Hukum). Ini menunjukkan cakupan analisis yang luas.
- 2) Setiap risiko dinilai berdasarkan tiga parameter: *Severity* (keparahan), *Occurrence* (kemungkinan terjadi), dan *Detection* (kemampuan deteksi). Penilaian ini menggunakan skala 1-10, yang memungkinkan perbandingan objektif antar risiko.
- 3) Dengan menghitung *Risk Priority Number* ($RPN = S \times O \times D$), metode ini secara efektif menyortir risiko mana yang paling kritis. Hasilnya, tiga risiko teratas adalah:
 - a) Cuaca Ekstrem (RPN 422): Risiko dengan probabilitas terjadinya ($O=7$) yang tinggi dan dampak signifikan terhadap jadwal proyek.
 - b) Kecelakaan Kerja Berat (RPN 404): Risiko dengan tingkat keparahan ($S=10$) tertinggi, yang menekankan aspek keselamatan manusia.
 - c) Dampak Lingkungan (RPN 353): Risiko dengan probabilitas tinggi ($O=7$) yang dapat mengganggu operasi dan reputasi perusahaan.

Strategi Mitigasi Risiko Berbasis *House of Risk 2* (HOR 2)

Tahapan lanjutan setelah penentuan *Risk Priority Number* (RPN) dengan metode FMEA adalah perancangan strategi mitigasi menggunakan pendekatan *House of Risk 2* (HOR 2). HOR 2 menggabungkan hasil identifikasi hubungan antara *risk agents* (penyebab risiko) dengan *preventive actions*, dengan mempertimbangkan tingkat efektivitas dan tingkat kesulitan implementasinya (*effectiveness to difficulty ratio* / ETD).

Berdasarkan hasil FMEA, tiga risiko dengan nilai RPN tertinggi dipilih untuk tahap mitigasi, yaitu:

- a) Cuaca ekstrem (hujan deras) menghentikan pekerjaan – RPN: 422
- b) Kecelakaan kerja berat (tabrak alat, keracunan gas) – RPN: 404
- c) Dampak lingkungan (debu, kebisingan, tumpahan) – RPN: 353

Risiko-risiko tersebut dipilih karena memiliki dampak signifikan terhadap keselamatan kerja, kelancaran proyek,

serta reputasi perusahaan. Strategi mitigasi yang didapatkan adalah sebagai berikut :

1. Penyusunan Rencana Kerja yang Dinamis dan Fleksibel
2. Penyiapan Perlengkapan dan Infrastruktur Darurat
3. Implementasi Sistem Zona dan Rambu K3 yang Ketat
4. Penerapan Sistem Izin Kerja dan Pengawasan Gas Berkelanjutan
5. Rencana Pengendalian Polusi dan Pengelolaan Limbah
6. Pelatihan, Pemantauan, dan Kepatuhan Berkelanjutan

Tabel 2. Hasil Strategi Mitigasi HOR 2

Risiko	Strategi Mitigasi						RPN
	1	2	3	4	5	6	
Cuaca ekstrem (hujan deras) menghentikan pekerjaan	9	9	0	0	1	3	422
Kecelakaan kerja berat (tabrak alat, keracunan gas)	1	0	9	9	0	9	404
Dampak lingkungan (debu, kebisingan, tumpahan)	0	3	0	1	9	9	353
TE (Total Effectiveness)	4202	4857	3636	3989	3599	8079	
D (Degree of Difficulty)	2	3	2	4	3	4	
ETD (Effectiveness to Degree)	8404	14571	7272	15956	10797	32316	
Ranking	5	3	6	2	4	1	

HOR 2 digunakan untuk merancang dan memprioritaskan tindakan mitigasi yang paling efektif dan efisien untuk menangani agen penyebab risiko yang telah diidentifikasi dalam FMEA (HOR 1). Analisisnya sebagai berikut:

- 1) HOR 2 bergeser dari identifikasi risiko ke perancangan *preventive actions*. Enam strategi mitigasi dirancang untuk secara spesifik menangani tiga risiko prioritas.
- 2) Kekuatan utama HOR 2 adalah kemampuannya tidak hanya melihat seberapa efektif sebuah tindakan (*Total Effectiveness* / TE), tetapi juga mempertimbangkan tingkat kesulitan (*Degree of Difficulty* / D) dalam implementasinya.
- 3) Dengan menghitung rasio *Effectiveness to Difficulty* (ETD), HOR 2 memberikan panduan yang realistis. Tindakan dengan ETD tertinggi adalah yang paling baik untuk diimplementasikan terlebih dahulu.
- 4) Berdasarkan Tabel 2, urutan prioritas mitigasi adalah:
 - a) Peringkat 1 (ETD: 32316): Pelatihan, Pemantauan, dan Kepatuhan Berkelanjutan. Ini adalah strategi yang paling efektif untuk mengurangi *multiple* risiko dan relatif mudah diterapkan.



- b) Peringkat 2 (ETD: 15956): Penerapan Sistem Izin Kerja dan Pengawasan Gas Berkelanjutan. Sangat efektif menangani risiko kecelakaan kerja, meski cukup sulit diimplementasikan.
- c) Peringkat 3 (ETD: 14571): Penyiapan Perlengkapan dan Infrastruktur Darurat. Efektif menangani cuaca ekstrem dan dampak lingkungan.

Kesimpulan

Berdasarkan analisis integrasi FMEA dan HOR 2 pada proyek Jalan Masing CPP Senoro, disimpulkan bahwa evaluasi risiko berhasil mengidentifikasi dan memprioritaskan 15 risiko operasional, dengan tiga risiko tertinggi yaitu cuaca ekstrem (RPN 422), kecelakaan kerja berat (RPN 404), dan dampak lingkungan (RPN 353) sebagai fokus mitigasi. Penerapan HOR 2 kemudian merumuskan strategi mitigasi yang terarah dan efisien, dimana strategi "Pelatihan, Pemantauan, dan Kepatuhan Berkelanjutan" *emerged* sebagai prioritas utama berdasarkan analisis *Effectiveness to Difficulty Ratio* (ETD).

Kombinasi kedua metode ini memberikan kerangka kerja manajemen risiko yang sistematis, terukur, dan proaktif bagi perusahaan, yang diharapkan dapat meningkatkan kinerja proyek secara signifikan dalam aspek K3, operasional, lingkungan, serta efisiensi waktu dan biaya, sehingga untuk tindak lanjutnya diperlukan *monitoring* evaluasi serta pengembangan sistem manajemen risiko yang lebih adaptif yang terintegrasi ke dalam seluruh siklus hidup proyek.

Referensi

- Ariyanto, I. N., Purba, H. H., & Purba, A. (2020). A systematic review and analysis of risk. *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*, 3(3), 29–47.
- Cornelis, H. L., Kurniyaningrum, E., Endro, B., & Trisakti, U. (2025). Risk analysis based on failure mode and effect analysis (FMEA) in the ISO 9001 : 2015 quality management system on toll road projects (case study: Toll Road Cikupa, STA 32 + 100. *Eduvest – Journal of Universal Studies*, 5(10), 12029–12047.
- Mohamad, S., Fais, M. A., Retno, D., Dewi, S., & Mulyono, J. (2025). Membangun rantai pasok berkelanjutan produk ikan bandeng untuk menunjang kelancaran proses transportasi. *Widya Teknik*, 24(1). <https://doi.org/10.1093/benz/9780199773787.article.b00008186>
- Mohamad, S., Lahay, I. H., Lapai, Y., Fais, M. A., Prayogo, L. F., & Artikel, S. (2024). Pemodelan supply chain resilience risk management menggunakan metode FMEA berbasis macroergonomic analysis and design informasi artikel abstrak. *Jurnal INTECH Teknik Industri Universitas Serang Raya*, 10(2), 113–120. <http://dx.doi.org/10.30656/intech.v10i2.7896>

H₂S Scavenger

Angelina Dwi P¹ Sandy Budi Hartono¹
Martha Kartika Sari¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik
Widya Mandala Surabaya

✉ angelinadwip61@gmail.com

Triazine digunakan sebagai H₂S scavenger untuk menurunkan kadar gas hidrogen sulfida (H₂S) dalam *crude oil*, khususnya pada *field* Jatibarang yang memiliki kadar gas H₂S tinggi melebihi batas aman 10 ppm. Gas H₂S bersifat korosif dan beracun sehingga dapat merusak pipa serta membahayakan kesehatan. Melalui proses injeksi Triazine yang dosisnya disesuaikan dengan kadar H₂S, senyawa ini bereaksi secara kimia dan menetralkan H₂S menjadi bentuk stabil. Efektivitas tertinggi dicapai pada fase air, dan stabilitas Triazine dapat bertahan hingga satu tahun dengan penurunan *active content* sekitar 4% setelah tiga bulan pada suhu tinggi. Penggunaan Triazine, disertai injeksi biocide untuk menekan bakteri penghasil H₂S, terbukti efektif menurunkan kadar H₂S, mencegah korosi pipa, serta meningkatkan keselamatan kerja dan perlindungan lingkungan di area produksi minyak.

Kata kunci: H₂S Scavenger, Triazine, Crude oil

Pendahuluan

Triazine adalah senyawa kimia yang umum digunakan sebagai H₂S Scavenger dari berbagai fase (gas, minyak, atau air) H₂S bersifat asam sehingga dapat mengakibatkan korosi dan membentuk FeS, pembentukan FeS dapat menyebabkan penyumbatan pada pipa. Efektivitas triazine dalam setiap fase sangat bergantung pada beberapa factor termasuk kelarutan triazine di masing-masing fase. Dalam praktiknya, penggunaan triazine yang paling tinggi efektivitasnya adalah pada fase liquid.

Berikut ini merupakan contoh nyata pipa yang mengalami korosi akibat pengendapan senyawa besi sulfida (FeS). Pada bagian kiri terlihat pipa dengan lapisan endapan tebal berwarna gelap hingga kemerahan, yang merupakan hasil reaksi antara ion besi (Fe²⁺) dengan gas hidrogen sulfida (H₂S) yang terdapat dalam fluida produksi, membentuk lapisan FeS di permukaan logam. Endapan ini bersifat rapuh dan mudah terlepas, menyebabkan terbentuknya lapisan tidak stabil yang mempercepat terjadinya korosi di bawah deposit (*under deposit corrosion*).

Sementara itu, pipa di sisi kanan menunjukkan kondisi yang lebih bersih dan terawat, menandakan kemungkinan adanya proses perawatan kimia atau pencegahan korosi yang lebih baik. Pengendapan FeS tidak hanya menurunkan umur pakai pipa, tetapi juga dapat menyumbat aliran fluida, mengganggu efisiensi proses produksi, serta meningkatkan risiko kebocoran atau kegagalan sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, pengendalian korosi akibat FeS sangat penting, misalnya melalui penggunaan *chemical treatment* seperti *film-forming corrosion inhibitor*, penerapan program *pigging* rutin, serta pemantauan berkala terhadap kadar H₂S dan kandungan besi terlarut pada sistem. Dengan langkah-langkah tersebut, potensi kerusakan akibat korosi dapat diminimalkan dan keandalan sistem perpipaan dapat terjaga dalam jangka panjang.



Gambar 1. Contoh Pipa yang Telah Korosi Akibat Pengendapan FeS

Pada penggunaan triazine sebagai chemical untuk menurunkan kadar H₂S haruslah melalui perhitungan dosis yang pas. Perhitungan dosis injeksi triazine untuk menurunkan kandungan H₂S bergantung pada beberapa faktor, seperti konsentrasi awal H₂S, volume fluida, dan efisiensi reaksi triazine dengan H₂S. Triazine bereaksi dengan H₂S dalam rasio molar tertentu, sehingga kita dapat menghitung dosis yang dibutuhkan berdasarkan kebutuhan stoikiometri dan volume fluida yang ingin diolah. Kendala yang dihadapi oleh seluruh *field* adalah mengurangi kadar H₂S pada *crude oil*. Setiap *field* memiliki kebutuhan H₂S Scavenger masing-masing sesuai dengan hasil analisa kadar dan tipe H₂S Scavenger yang digunakan. H₂S Scavenger memiliki beberapa tipe dalam hal ini *field* Jatibarang memiliki kendala pada ketinggian kadar H₂S pada *crude oil* yang sangat melampaui batas yang mana berdasarkan Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia No.13 Tahun 2011 di bawah 10 ppm.

Berdasarkan hasil analisa gas H₂S pada *crude oil* yang dilakukan pada tanggal 2 Mei 2024, diperoleh dua data sampel, yaitu Gas ABG-020 dengan kadar H₂S sebesar 700 ppm dan Gas ABG-021 dengan kadar H₂S sebesar 1100 ppm. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kandungan gas H₂S dalam *crude oil* tergolong tinggi dan berpotensi menimbulkan berbagai permasalahan dalam sistem produksi minyak. Kandungan H₂S yang tinggi dapat menyebabkan korosi berat pada peralatan dan jaringan

pipa, membentuk senyawa FeS yang dapat mengendap serta menghambat aliran fluida.

Selain itu, H₂S juga bersifat toksik dan berbahaya bagi keselamatan pekerja karena dapat menyebabkan gangguan pernapasan bahkan kematian jika terpapar dalam konsentrasi tinggi. Oleh karena itu, hasil analisa ini menjadi dasar penting untuk melakukan tindakan pengendalian, seperti penerapan proses *sweetening*, injeksi *chemical scavenger*, atau perawatan inhibitor korosi secara rutin untuk menurunkan kadar H₂S dan mencegah dampak negatif terhadap operasional fasilitas produksi maupun lingkungan sekitar.

Tabel 1. Hasil Uji Kadr H₂S pada Jatibarang Field pada 2 Mei 2024

NO	NAMA CONTOH	Tanggal Sampling	H ₂ S (ppm)
20	Gas ABG - 020	02 Mei 2024	700
21	Gas ABG - 021	02 Mei 2024	1100

Dari data di atas maka tugas kita sebagai penyedia barang dan jasa adalah melakukan reformulasi dosis yang digunakan pada proses injeksi. Seluruh proses pengamatan, analisis, dan penentuan dosis optimal dari penggunaan *chemical scavenger* (triazine) dalam menurunkan kadar gas H₂S yang terkandung di dalam *crude oil*. Langkah awal yang dilakukan meliputi pengambilan serta analisis data kadar H₂S sebelum dilakukan injeksi *chemical*, guna memperoleh gambaran awal mengenai tingkat kontaminasi dan karakteristik fluida produksi. Berdasarkan hasil analisa tersebut, dilakukan perhitungan yang cermat untuk menentukan dosis injeksi triazine yang sesuai agar mampu menurunkan kadar H₂S secara efektif tanpa menimbulkan dampak negatif terhadap kualitas *crude oil* maupun sistem produksi.

Selain fokus pada penentuan dosis triazine, ruang lingkup kegiatan ini juga mencakup pengkajian terhadap penggunaan *biocide* sebagai *chemical supporting agent*. *Biocide* berperan penting dalam menekan pertumbuhan mikroba, khususnya *sulfate reducing bacteria* (SRB), yang merupakan penyebab utama peningkatan kadar H₂S pada sistem produksi minyak bumi. Dengan demikian, integrasi antara injeksi triazine dan *biocide* diharapkan dapat memberikan hasil yang optimal dalam pengendalian H₂S, baik dari sisi efisiensi penggunaan bahan kimia maupun keberlanjutan operasional lapangan.

Kegiatan ini juga mencakup pemantauan hasil setelah injeksi, analisis perubahan kadar H₂S, serta evaluasi efektivitas kombinasi *chemical treatment* terhadap kondisi sistem produksi. Selain itu, ruang lingkup studi ini menitikberatkan pada upaya peningkatan keselamatan kerja, pencegahan korosi pada peralatan produksi dan jaringan pipa, serta perlindungan terhadap lingkungan sekitar dari potensi dampak negatif gas H₂S. Dengan demikian, kegiatan ini tidak hanya berorientasi pada aspek teknis dan kimiawi, tetapi juga pada aspek keselamatan, efisiensi operasional, dan keberlanjutan lingkungan di area *field*.

Metode

Metode untuk pengurangi kadar gas H₂S adalah proses injeksi. Proses injeksi triazine untuk mengurangi kadar gas H₂S Scavenger umumnya diawali dengan menentukan dosis triazine. Penentuan dosis ditentukan dari kadar H₂S dalam

fluida, volume fluida, dengan contoh perhitungan menggunakan basis 1.000 liter (1m³) fluida yang mengandung H₂S dengan basis konsentrasi H₂S 1.000 mg/L maka kadar H₂S dalam fluida sebagai berikut:

$$\text{Total H}_2\text{S} = 1000 \text{ mg/L} \times 1000 \text{ L} = 1,000,000 \text{ mg} = 1,000 \text{ gram (H}_2\text{S)}$$

Untuk menentukan dosis H₂S Scavenger maka kita perlu mengonversikan ke dalam mol H₂S.

$$\text{Mol H}_2\text{S} = \frac{1,000 \text{ gram}}{34.08 \text{ g/mol}} = 29.33 \text{ mol}$$

Berdasarkan reaksi kimianya, 1 mol Triazine dapat bereaksi dengan 2 mol H₂S, sehingga Kebutuhan triazine dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{Mol triazine} = \frac{29.33 \text{ mol H}_2\text{S}}{3} = 9.78 \text{ mol triazine}$$

Berat molekul triazine (C₃H₆N₆) adalah 126.15 g/mol. Maka massa triazine yang dibutuhkan adalah :

$$\text{Massa Triazine} = 9.78 \text{ mol} \times 126.15 \text{ g/mol} = 1,233.5 \text{ gram}$$

$$\text{Volume Triazine} = \frac{1,233.5 \text{ gram}}{1.06 \text{ g/mL}} = 1,164.6 \text{ mL} = 1.16 \text{ liter}$$

Hasil Kerja

Analisa H₂S pada Crude oil

Pada *field* Jatibarang terjadi peningkatan kadar H₂S yang signifikan, sehingga perlu adanya pengolahan agar H₂S menurun hingga ambang batas yang ditetapkan. H₂S pada *field* memiliki kadar yang berbeda-beda, dalam hal ini Jatibarang *field* memiliki kadar tinggi yang pernah ditangani sebesar 700 - 1.700 ppm. Untuk mengatasi atau beberapa metode yang dapat diterapkan dalam mengatasi tingginya kadar H₂S adalah sebagai berikut:

1. Penambahan *biocide* untuk membunuh SRB penghasil H₂S.
2. *Metabolic inhibitor* SRB untuk mencegah reduksi sulfat menjadi sulfur.
3. Penggunaan nutrisi yang menghasilkan non-SRB (ion nitrate) untuk menstimulasi bakteri denitrifikasi.
4. Penggunaan H₂S Scavenger dengan dosis yang telah dihitung berdasarkan kadar H₂S yang telah dianalisa.

Metode diatas dapat diinjeksikan pada *injector well*, dengan proses injeksi *biocide* pada *production stream* dan H₂S Scavenger pada *downhole*.

Tahapan Injeksi

Pada proses injeksi ini dilakukan beberapa tahap di antaranya:

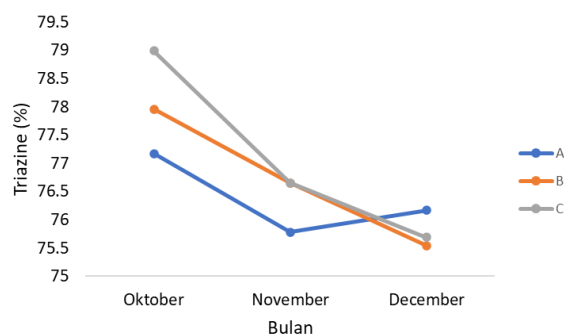
1. Analisa kandungan H₂S sebelum dilakukan injeksi (karena H₂S dalam fasa gas yang mudah menguap maka proses analisa akan dilakukan di *site* agar mendapatkan hasil yang akurat).
2. Proses injeksi dilakukan di titik yang telah ditentukan.
3. Dilakukan analisa pada titik pengambilan sampel setelah proses injeksi dilakukan.
4. Mengetahui kadar akhir H₂S setelah injeksi dan melakukan evaluasi terhadap kinerja triazine.

Stabilitas Triazine

Berdasarkan hasil analisa yang dituangkan dalam grafik kestabilan, produk triazine menunjukkan penurunan kadar *active content* yang relatif kecil namun konsisten selama periode tiga bulan pengamatan (Oktober → Desember) pada ketiga sampel (A, B dan C). Secara umum nilai aktif ketiga sampel bergerak di kisaran pertengahan 70-an persen dan menurun sedikit dari titik awal Oktober menuju Desember, penurunan ini tampak berkisar sekitar 0,5–2 persen poin tergantung sampel yang mengindikasikan adanya degradasi minor tetapi tidak dramatis dalam jangka pendek.

Penurunan tersebut bisa disebabkan oleh faktor penyimpanan (suhu, kelembapan, paparan cahaya), reaksi kimia perlahan seperti hidrolisis atau oksidasi, atau pengaruh aditif/impuritas yang bereaksi seiring waktu; selain itu variasi antar-sampel juga mungkin mencerminkan variasi *batch* atau ketidakkonsistenan pengambilan sampel. Dari sisi mutu dan aplikasi, perubahan kecil ini dapat menurunkan efektivitas bahan aktif jika melewati batas spesifikasi produk. Oleh karena itu, hasil pengamatan tiga bulan ini sebaiknya dipandang sebagai indikasi kestabilan awal yang perlu dilengkapi dengan studi jangka lebih panjang (mis. 6–12 bulan) termasuk uji pada kondisi akselerasi dan penyimpanan aktual.

Analisa dapat bertahan hingga 1 tahun dengan penanganan dan penyimpanan produk yang sesuai dengan MSDS. Dalam hal ini, dilakukan uji kestabilan triazine yang dibedakan berdasarkan *active content*-nya, artinya setiap level kandungan aktif harus diuji terpisah untuk menetapkan spesifikasi akhir, interval pengujian rutin, dan *acceptance criteria*. Rekomendasi praktis, antara lain pertahankan penyimpanan tertutup jauh dari sumber panas dan sinar matahari, gunakan wadah yang inert/berlapis, kendalikan suhu gudang, lakukan *sampling* periodik (mis. 0, 3, 6, 9, 12 bulan) termasuk analisa kandungan aktif dan identifikasi produk degradasi. Jika pada uji lanjutan penurunan > spesifikasi terjadi, pertimbangkan penyesuaian formulasi, penambahan stabilizer, atau penentuan umur simpan yang lebih pendek.



Gambar 2. Stabilitas Test Content Triazine pada Suhu 50°C

Hasil test stabilitas *content triazine* dapat menurun seiring berjalannya waktu, selama 3 bulan dengan kondisi cukup *extreme* di suhu 50°C *active content* triazine turun sebanyak $\pm 4\%$. Stabilitas juga tidak hanya dianalisa untuk mengukur *active content* melainkan dari segi *appearance* juga berpengaruh. Umumnya *fresh* triazine akan berwarna *clear yellowish*, namun seiring berjalannya waktu dan

penurunan triazine maka *appearance* juga akan berubah menjadi lebih oranye kemerahan.

Tabel 2. Analisa *Appearance* pada Triazine

Oktober	November	Desember	Januari
Yellowish liquid	Yellow to amber	Amber liquid	Amber liquid
Yellowish liquid	Yellow to amber	Amber liquid	Amber liquid
Yellowish liquid	Yellow liquid	Amber liquid	Amber liquid

Perhitungan Dosis

Menentukan dosis yang tepat agar dapat membantu penurunan kadar H_2S pada *field* Jatibarang, maka dapat dihitung berdasarkan data yang telah didapat sebagai berikut:

Triazine *active* = 70%
 M_r = 219 g/mol
 ρ = 1,15 g/mL
 $M_r H_2S$ = 34 gr/mol
 1 mol triazine bereaksi dengan 2 mol H_2S

Triazine
 Mol Triazine = 1 mol
 Massa Triazine = 219 gram
 Massa Dekasulf HS 9078 (70%)
 $= 219 \text{ gr} \times \frac{100}{70} = 312,9 \text{ gr} \rightarrow V = 272 \text{ mL}$

H_2S
 Mol H_2S = 3 mol
 Massa H_2S = 3 mol x 34 g/mol
 = 102 gram

Maka, dosis sebagai berikut:

$$\text{Dosis} = \frac{272 \text{ mL Triazine}}{102 \text{ gram } H_2S} = 2,66 \text{ mL/g} \rightarrow 2,7 \text{ L/Kg}$$

Kesimpulan

Untuk menurunkan kadar gas H_2S yang terkandung di dalam *crude oil*, penerapan metode injeksi triazine terbukti sangat efektif dalam menangkap dan menetralkan gas H_2S menjadi senyawa yang lebih stabil dan tidak berbahaya. Penggunaan Triazine sebagai *scavenger* gas H_2S membantu menjaga kualitas *crude oil* sekaligus meningkatkan keselamatan kerja di lapangan produksi. Namun demikian, agar penggunaan triazine dapat lebih efisien, diperlukan juga injeksi biocide secara teratur untuk menekan pertumbuhan mikroba penghasil H_2S , seperti *sulfate reducing bacteria* (SRB), yang berperan besar dalam proses pembentukan gas tersebut. Kombinasi injeksi triazine dan biocide memberikan hasil yang lebih optimal, karena selain menurunkan kadar H_2S , juga dapat mengurangi kebutuhan



dosisi triazine sehingga lebih ekonomis dan ramah lingkungan.

Penerapan sistem injeksi kimia ini tidak hanya berfungsi dalam aspek teknis pengolahan *crude oil*, tetapi juga memiliki peran penting dalam aspek keselamatan kerja (*safety*). Dengan berkurangnya kadar H_2S di sistem produksi, risiko kecelakaan kerja akibat paparan gas H_2S yang bersifat sangat korosif, beracun, dan membahayakan tubuh manusia dapat diminimalkan secara signifikan. Selain itu, pengendalian kadar H_2S juga membantu mengurangi potensi kerusakan peralatan produksi dan korosi pada jaringan pipa penyalur *crude oil*, yang jika dibiarkan dapat menyebabkan kebocoran, kehilangan produksi, serta pencemaran lingkungan di sekitar area *field*.

Secara keseluruhan, upaya penurunan kadar H_2S melalui injeksi triazine yang dioptimalkan dengan penggunaan biocide merupakan langkah strategis dan berkelanjutan dalam menjaga keselamatan kerja, keandalan fasilitas produksi, serta kelestarian lingkungan di area operasi minyak dan gas bumi.

Ucapan Terimakasih

Saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh anggota divisi yang telah berperan aktif dan bekerja sama dengan penuh dedikasi dalam melakukan proses reset serta penentuan dosis yang tepat guna menekan kadar H_2S pada *crude oil* di Jatibarang *Field*. Dukungan, kerja sama, serta semangat tim yang luar biasa telah memberikan kontribusi besar terhadap keberhasilan kegiatan ini.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada dosen pembimbing dan pembimbing lapangan yang telah meluangkan waktu, memberikan arahan, bimbingan, serta masukan yang sangat berharga selama proses penyusunan laporan praktik keinsinyuran ini berlangsung. Tanpa dukungan, ilmu, dan pengalaman yang mereka berikan, penyusunan laporan ini tidak akan dapat terselesaikan dengan baik.

Saya berharap hasil dari kegiatan ini dapat memberikan manfaat, baik sebagai bahan evaluasi maupun sebagai referensi dalam upaya peningkatan kinerja pengendalian kadar H_2S di lapangan produksi minyak bumi ke depannya.

Referensi

- Du, S. Y. (2020). *Formaldehyde–MEA triazine-based hydrogen sulfide scavenger behavior study and applications in the oil and gas industry* (Unpublished master's thesis). University of Calgary, Calgary, AB, Canada. <http://hdl.handle.net/1880/112374>
- Kandile, N. G., Razek, T. M. A., Al-Sabagh, A. M., & Khattab, M. M. T. (2013). Synthesis and evaluation of some amine compounds having surface active properties as H_2S scavenger. *Egyptian Journal of Petroleum*.
- Kelland, M. A. (2009). *Production chemicals for the oil and gas industry*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group.
- Udumbasseri, C. *Manufacturing 1,3,5-tri-(2-hydroxyethyl)-hexahydro-s-triazine* [Technical report]. India: Technical Consultant.



Scoring-Weighting Based Power Transformer Health Index for Diagnosis as a Step Towards Sustainable Asset Maintenance

Esosia Benjamin Sibuea¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ esosia.benjamin19@gmail.com

Monitoring the health condition of all power transformer assets in the network is essential with the aim of avoiding unplanned outages. Therefore, utility or industry must maintain and improve the reliability of transformers by developing a diagnostic system to estimate the condition of transformers accurately. Condition assessment using a health index (HI) approach is one tool that can help achieve this, enabling a more efficient asset management through a fast, practical method for assessing and evaluating the overall condition of the transformer. This is a step that can be taken towards sustainable asset maintenance. In this paper, condition assessment using the HI approach is applied to transformer assets in an industry in Indonesia with method used is scoring and weighting. The results of HI calculations are compared with the actual condition to get the percentage of accuracy. The proposed HI approach assesses the transformer isolation system based on three factors, namely, insulation oil quality factor, fault factor, and insulation paper condition factor. As many as 167 data in-service transformers population testing were used in this study. Consists of 16 units of 150 kV transmission transformers and 151 units of 20 kV and 33 kV distribution transformers. Results of diagnostic condition of 167 units transformer with the HI approach using the proposed method are very good 77 units (46%), good 52 units (31%), fair 31 units (19%), and poor 7 units (4%) with a percentage of accuracy 91.61%.

Key word: Power Transformer, Diagnosis, Health Index, Reliability, Sustainable, Asset

Introduction

Power transformers are expensive assets in an electrical system (Y.Li et al., 2013). Based on the results of various studies, it is stated that the performance of the transformer is determined by the condition of the isolation system, meaning that the highest transformer failure is caused by damage to the insulation system. The contribution of the transformer to the failure of the electric power system is 12% and this failure of 84% is caused by the failure of the insulation of the transformer itself (Suwarno, 2010). Thus, the condition of the transformer is crucial to be monitored carefully.

Precisely estimating the condition of the transformer is of paramount importance to avoid unwanted power outages due to unexpected failures of the transformer unit, which will incur high consequential costs (IEEE, 2012). Improving the reliability of power transformers can efficiently reduce power losses. This solution supports energy sustainability without compromising electrical performance. In preparing a financial plan to estimate the cost of proper maintenance, repair and replacement of power transformers requires condition monitoring and reliable assets and cost management (E. B. Abu-Elanien et al., 2010) (X. Zhang et al., 2008).

Therefore, the utility must maintain the health condition of the transformer by developing a diagnostic system. During the operation, the transformer insulation system will deteriorate, causing it to age. Due to thermal stress and electrical stress, oxidation, pyrolysis, and hydrolysis reactions can occur in the insulation system. This reaction will produce decomposition products or by-

products of the insulation system, which can damage the insulation system.

The transformer condition assessment involves two conditions: monitoring and diagnosis. Condition monitoring is the observation of the operating characteristics of various equipment and collecting data from these observations. Meanwhile, diagnosis includes all data interpretations based on the deviation from normal characteristics. This paper will discuss related diagnosis conditions of in-service power transformers in a private manufacturing industry in Indonesia. Diagnosis is carried out through health index (HI) approach with a scoring and weighting method using the parameters of the test results of oil dielectric characteristics, dissolved gas, furan, and recording the operating age. The opportunity of this method is to obtain HI probabilities based on statistical measurement data and not only using expert judgment. The results of the diagnosis are in the form of HI categories which are converted from HI scores based on the calculation results, then compared with the actual conditions of the transformer in the field to get the percentage of accuracy. Diagnosis using the HI approach can be used as a step in performing environmentally friendly, low-cost, and sustainable maintenance of power transformer assets.

A. Transformer Health Index (HI)

Transformer HI or also known as the transformer rating index is a very useful method in transformer asset management that determines the transformer health rating based on the resulting score, so that an asset manager can identify transformers that require a more

dominant level of attention (R. Azis Prasajo, et al., 2020). HI represents a practical tool that combines the results of operating observations, field inspections, and field and laboratory tests into an objective and quantitative index that indicates the overall health of an asset (A. Jahromi et al., 2009).

Weighted-Sum Method

The approach with the weighted-sum method is a scoring and weighting process carried out by experts. As shown in Fig.1, the parameter data is then processed into a score by comparing it with a predetermined score table. Then, the individual scores are weighted and combined into a single index value that describes the overall health condition of the transformer.

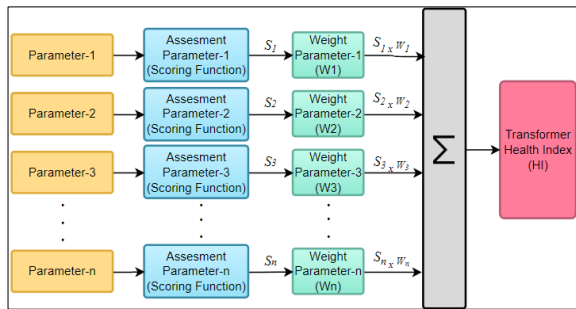


Figure 1. The Concept of The Conventional HI Scoring-Weighting Method

Methodology

In this study, the HI approach method used is scoring and weighting.

A. Sample Data of Transformer

The data used in this study are data obtained from the results of testing insulating oil (oil dielectric characteristics, DGA, and furan) and recording the operating age from a private company Indonesia as many 167 units, consisting of 16 units of transmission transformer with a primary voltage of 150 kV with a low voltage of either 33 kV or 20 kV, 151 units of distribution transformer with a primary voltage of 20 kV and 33 kV with a low voltage of either 0.69 kV or 0.4 kV. An example of some sample transformer pictures is shown in Fig. 2. All transformers use mineral oil as the insulating oil. Detail, operating age population statistics are shown in Fig. 3. Dielectric characteristics include color scale, water content, acidity, IFT, and BDV. DGA include H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂, CO, and CO₂. Furan includes 2-FAL.

B. Proposed HI Approach Method

In this paper, the transformer HI will be calculated using the scoring and weighting method, developed based on the CIGRE TB 642. This method uses testing and recording data, namely, testing data of dielectric oil characteristics consisting of the color scale, water content, acidity, interfacial tension and breakdown voltage, dissolved gas testing data (DGA): H₂ (Hydrogen), CH₄ (Methane), C₂H₄ (Ethylene), C₂H₆ (Ethane), and C₂H₂ (Acetylene), then data from furan test results 2-FAL (2-furaldehyde), as well as data on transformer operating age. All these data are entered into the data layer. Furthermore, the data layer is grouped into three main parts called the factor layer: the insulating oil quality

factor (OQF), the fault factor (FF), and the insulating paper condition factor (PCF) as shown in Fig.4.

Then, the results of the scoring and weighting of the three layers of factors are formulated to obtain a final HI, which is categorized into an index layer. The health index approach method proposed in this study is described as shown in Fig. 4, which is based on a previously proposed method in (W. R. Tamma et al., 2021) (D. Rediansyah et al., 2021).



Figure 2. Sample of Transformer (a).150 kV, 63MVA (b). 20 kV,3.15 MVA (c).33 Kv,2.5 MVA (d). 20 kV, 12.5 MVA

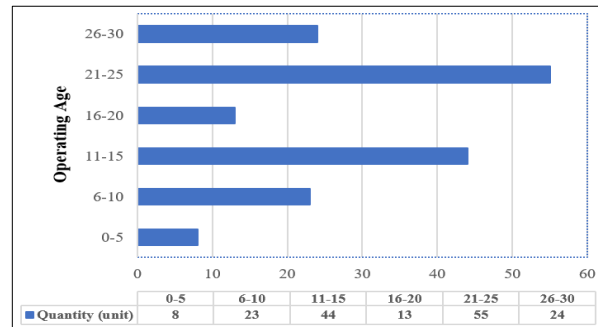


Figure 3. Operating Age Population Statistics 167 Units Transformer

In the scoring and weighting method, all parameter data used in calculating the health index are determined by international standard limits, (IEEE, 2019) and (IEC, 2013). Determination of aggregated health index scores based on each layer of factors using (1).

$$HI_{(each_factor)} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i W_{pi}}{\sum_i W_{pi}} \quad (1)$$

Where n is the number of parameters used for each factor, S_i is the score of each parameter obtained based on the standard score table, and W_i is a weighting parameter that describes the level of importance of each factor. Then, to calculate the final health index value used (2).

$$HI_{(final)} = \frac{\sum_{j=1}^n SF_j W_{fj}}{\sum_{j=1}^n 4W_j} \times 100\% \quad (2)$$

where SF_j is a factor parameter score and W_j is a weighting factor.

C. Oil Quality Factor

The following are five vital characteristics of insulating oil used to assess the quality of insulating oil, namely, color scale, water content, acidity, interfacial tension, and breakdown voltage. Then the data from the

measurement of each characteristic of the insulating oil were scored and aggregated using a score table as shown in Table 1 and calculated by (1).

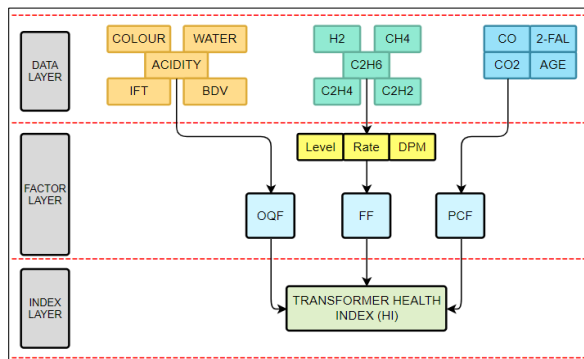


Figure 4. HI Scoring-Weighting Method Approach Scheme

Table 1. Scoring and Weighting of Insulating Oil Quality

Oil Dielectric characteristics	Score				Wp
	1	2	3	4	
Colour Scale	<1.5	1.5-2	2-2.5	>2.5	0.114
Water Content (mg/kg)	<20	20-25	25-30	>30	0.108
Acidity (mgKOH/g)	<0.1	0.1-0.15	0.15-0.2	>0.2	0.139
IFT (mN/m)	>35	35-25	25-20	<20	0.124
BDV (kV)	>50	50-45	45-40	<40	0.169

This weighting factor was obtained using the Analytic Hierarchy Process (AHP) based on a multi-expert consensus model (R. Aziz Prasajo, et al., 2020). Next, the value of the OQF calculation is converted to rating codes A, B, C, D, and E, where this rating code will also be converted to a factor score, as shown in Table 2. For example, A is a code where the oil quality level is the best, with a factor score of 4.

Table 2. Insulating Oil Quality Level Assessment

OQF	Rating Code	Factor Score
<1.2	A	4
1.2-1.5	B	3
1.5-2.0	C	2
2.0-3.0	D	1
>3.0	E	0

D. Fault Factor

The results of the scoring and aggregation of the five types and the concentration of dissolved gas from the DGA test describe the fault factor. Table 3 shows DGA scores for each gas concentration level, and Table 4 shows DGA scores for each gas rate. The level and gas rate limits in the table 5 are based on standards. This was based on complying with the guidelines in (IEEE, 2019). In determining the condition of the fault factor, the maximum gas level, gas rate, and DPM interpretation is based on dissolved gas analysis. The Duval pentagon is a new complementary method for the interpretation of DGA in electrical equipment filled with mineral oil.

In the Duval Pentagon representation, the relative percentages of the five main hydrocarbon gases analyzed by DGA are calculated first by dividing the gas concentration (ppm) by the total concentration of the five types of hydrocarbon gases. As an example, relative

percentage $H_2 = H_2 \text{ (ppm)} / H_2 + CH_4 + C_2H_6 + C_2H_4 + C_2H_2 \text{ (ppm)}$.

Table 3. DGA Scores For Each Gas Concentration Level

Type of gas & Level	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
1	<80	<90	<50	<90	<1
2	80-200	90-150	50-100	90-170	1-2
3	200-320	150-210	100-150	170-250	2-3
4	>320	>210	>150	>250	>3

Table 4. DGA Score For Each Gas Rate

Type of gas & Rate	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
1	<20	<20	<7	<29	0
2	20-13	20-37	7-16	29-58	-
3	31-59	37-72	16-48	58-145	-
4	>59	>72	>48	>145	>0

Table 5. Gas Level And Gas Rate Condition Assessment

Gas Level (Maximum)	Gas Rate (Maximum)	Condition (C)
1	1-4	C-1
2	1	C-1
2	2-3	C-2
2	4	C-3
3	1	C-2
3	2-3	C-3
3	4	C-4
4	1	C-3
4	3-4	C-4

The results of the interpretation of DGA with DPM are the categories that indicate the type of fault in the transformer. The Duval Pentagon-1 is shown in Fig. 5, with the fault zones in the color corresponding to the six electrical and thermal faults used by the IEC, IEEE, and the Duval Triangle (M. Duval et al., 2014). Then, the fault factor is determined from the value of the dissolved gas concentration level, the dissolved gas rate condition, and the DPM interpretation category. The categories of fault factors are shown in Table 6. Based on Table 6, there are five categories of fault factor conditions: A (normal), B (acceptable), C (need caution), D (poor), and E (very poor).

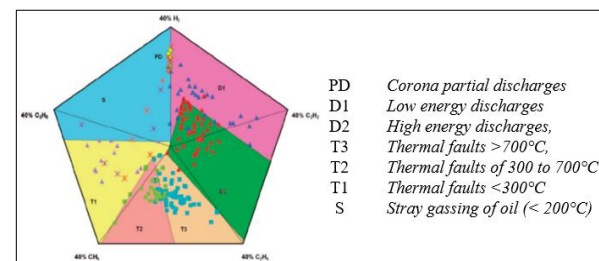


Figure 5. Interpretation of Six Faults in Duval Pentagon-1

E. Paper Condition Factor

The method used to assess the paper insulation condition factor is by adding up the CO and CO₂ dissolved gas scores, operating age score, and 2FAL score. The scoring and weighting of the PCF parameters are shown in Table 7 and the assessment of the dissolved gas conditions of CO and CO₂ In detail can be seen in (D. Rediansyah et al., 2021). Then, the value of the PCF calculation is converted to rating codes A, B, C, D, and E, as



shown in Table 8. where this rating code will also be converted to a factor score, as shown in Table 8. Based on Table 8, there are five categories of paper condition factors, namely A (normal), B (acceptable), C (needed caution), D (poor condition), and E (very poor).

F. Health Index Calculation

Through the Analytical Hierarchy Process (AHP) technique based on a multi-expert consensus model, the weights for each parameter (W_p) and factor weights (W_f) are obtained, which are shown in Table 9 (R. Azis Prasoj, et al., 2020). Furthermore, calculations are performed out using (2) to obtain a transformer health index score, where this score is converted into a health index code as shown in Table 10. The classification of the power transformer HI category consists of five condition categories: VG (Very Good), G (Good), F (Fair), P (Poor) and VP (Very Poor).

Result and Analysis

The results of the transformer health index approach using the scoring and weighting method are as follows: Very Good 77 units (46%), Good 52 units (31%), Fair 31 units (19%), and Poor 7 units (4%). The classification of the health index of 167 transformer units is shown in Fig. 6. The results of the classification of the HI of 167 units of transformer samples using the scoring and weighting method was compared with the actual condition of the transformer in the field. The actual condition of the transformer in the field is obtained through direct observation, collecting information and maintenance data for each transformer, service data, thermography inspection data, and data from discussions with users (maintenance team). From these data, there are 14 transformer units whose estimated health index value is not in accordance with the calculation results according to field conditions, as shown in Table 11. From these results, the estimated percentage accuracy of the health index calculation is around 91.61% and the error percentage is 8.39%. Based on these results indicate that the proposed weighted assessment method is suitable to be applied to the health condition of power transformers.

The correlation value between parameters with the transformer health index category can be obtained through data analysis with calculations based on the continuous data used. The results obtained indicate that several parameters correlate strongly with the health index. The highest correlation coefficient between parameters with HI is CO+CO₂ (-0.63).

Table 6. Fault Factor Category

		Condition of gas level and rate			
		C-1	C-2	C-3	C-4
DPM	C-1	A	false	false	false
	C-2	false	B	B	C
	C-3	false	C	C	D
	C-4	false	D	D	E

Table 7. Scoring and Weighting of Paper Condition Factor

PCF	Score					Wp
	1	2	3	4	5	
CO & CO ₂ (ppm)	A	B	C	D	E	0.171
Operating age (year)	<20	20-30	30-40	40-60	>60	0.234
2-FAL (ppb)	<100	100-500	500-1000	1000-5000	>5000	0.214

Table 8. Score of Paper Condition Factors

PCF	Rating Code	Factor Score
<1.2	A	4
1.2-1.5	B	3
1.5-2.0	C	2
2.0-3.0	D	1
>3.0	E	0

Table 9. The Results of Determining The Weighting Factor Of The Multi-Expert Consensus Model Using The AHP Technique

Factor	Parameter	Wp	Wf
Oil Quality Factor (OQF)	Colour Scale	0.114	0.216
	Water Content	0.108	
	Acidity	0.139	
	IFT	0.124	
	BDV	0.169	
	DDF	0.235	
Fault Factor (FF)	Sediment	0.110	0.348
	DGA	0.583	
Paper Condition Factor (PCF)	PD	0.417	0.436
	CO and CO ₂	0.171	
	2FAL	0.234	
	Operating age	0.214	
	DP	0.382	

Table10. Categories of Health Index

Health Index Score	Health Index Code	Description
85-100	VG	Very Good
70-85	G	Good
50-70	F	Fair
30-50	P	Poor
0-30	VP	Very Poor

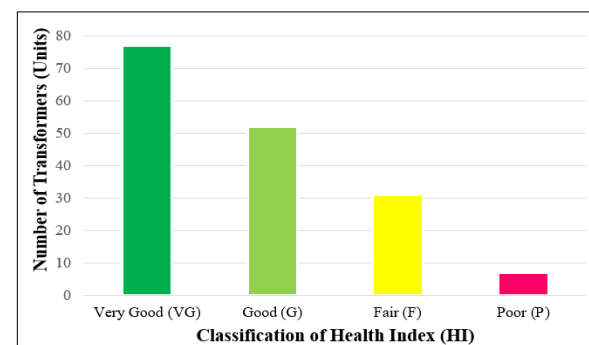


Figure 6. HI Categories Results Using Scoring and Weighting Method

Table 11. Health Index Results of 14 Transformers Sample That Do Not Agree With Actual Conditions

TF No.	Age	OQF	FF	PCF	HI Sc.	HI Cat.	Actual
1	6	A	D	B	63	F	G
2	14	D	A	E	40.2	P	VP
3	20	A	D	B	63	F	G
4	26	A	A	B	89.1	VG	G
5	24	A	A	B	89.1	VG	G
6	6	A	A	A	100	VG	G

7	23	A	A	B	89.1	VG	G
8	24	C	A	C	67.4	F	G
9	23	C	A	D	56.5	F	P
10	13	A	B	A	91.3	VG	G
11	28	C	A	C	67.4	F	G
12	25	C	A	C	67.4	F	G
13	27	A	E	C	43.4	P	F
14	28	D	A	D	51.1	F	P

Other parameters with correlation coefficient values from the highest to the lowest with a value > 0.4 are CO2 (-0.62), water content (-0.61), color scale (-0.59), acidity (-0.59), operating age (-0.59), breakdown voltage (0.58), interfacial tension (0.55), 2FAL (-0.53) and CO (-0.44). In histogram the correlation between parameters with HI is shown in Fig. 7.

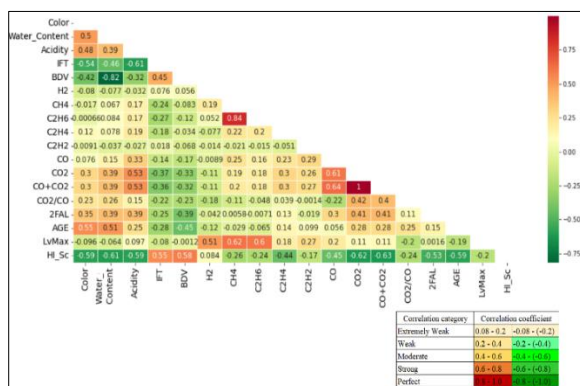


Figure 7. Correlation Matrix Between Observed Parameters

Conclusion

The diagnosis of transformer health condition by the weighted scoring method has been carried out and implemented, the results show that the proposed weighted scoring method shows suitability to be applied to the assessment of power transformer health condition, with an estimated accuracy rate of approximately 91.61% and an error rate of 8.39%. From the results of the analysis of parameters that have correlations with correlation coefficient values from the highest to the lowest with a value > 0.4 are CO2 (-0.62), water content (-0.61), color scale (-0.59), acidity (-0.59), operating age (-0.59), breakdown voltage (0.58), interfacial tension (0.55), 2FAL (-0.53) and CO (-0.44). This means that these parameters greatly affect the condition of the transformer. This proposed HI approach can be used as a sustainable asset maintenance measure because it is environmentally friendly and does not incur high costs.

Words of Thanks

On this occasion, I would like to say thank you to Prof. Suwarno as my thesis supervisor during my education at Bandung Institute of Technology, and Dr. Lusya Permata Sari Hartanti as my academic advisor during my engineering education program at Widya Mandala Catholic University in Surabaya.

References

- Abu-Elanien, A. E. B., & Salama, M. M. A. (2010). Asset management techniques for transformers. *Electric Power Systems Research*, 80, 456–464.

- Duval, M., & Lamarre, L. (2014). The Duval pentagon: A new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 30(6), 9–12.
- International Electrotechnical Commission. (2013). *Mineral insulating oils in electrical equipment—Supervision and maintenance guidance* (IEC Standard 60422).
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2012). *IEEE guide for application for monitoring equipment to liquid-immersed transformers and components* (IEEE Std C57.143-2012).
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2019). *IEEE guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers*.
- Jahromi, A., Piercy, R., Cress, S., Service, J., & Fan, W. (2009). An approach to power transformer asset management using health index. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 25(2), 20–34.
- Li, Y., Tang, M.-J., Wu, F.-J., Zhang, G.-J., Wang, S.-H., & Suwarno. (2013). Aging assessment of power transformer using multi-parameters. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 5(1), 34–44.
- Prasojo, R. A., Suwarno, Maulidevi, N. U., & Soedjarno, B. A. (2020). A multiple expert consensus model for transformer assessment index weighting factor determination. In *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)* (pp. 234–237).
- Rediansyah, D., Prasojo, R. A., & Suwarno. (2021). Study on artificial intelligence approaches for power transformer health index assessment. In *International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)* (pp. 1–4).
- Suwarno. (2010). *Diagnosis of high voltage equipment*. Bandung, Indonesia: Penerbit ITB.
- Tamma, W. R., Prasojo, R. A., & Suwarno. (2021). High voltage power transformer condition assessment considering the health index value and its decreasing rate. *High Voltage*, 6(2), 314–327.
- Zhang, X., & Gockenbach, E. (2008). Asset management of transformers based on condition monitoring and standard diagnosis. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 24(4), 26–40.



Mencegah *Unplanned Shutdown* pada *Recovery Boiler* dengan Menghilangkan Penumpukan Kerak (*Deposit*) pada Aliran Gas Buang

Hendriadi¹ Siregar¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ hendriadisiregar@gmail.com

Recovery Boiler berfungsi untuk menghasilkan uap (*steam*) dari pembakaran unsur organik *black liquor* dan mengambil kembali (rekoveri) bahan kimia proses pemasakan pulp dari *black liquor*. Penggunaan *Recovery Boiler* di pabrik pulp dan kertas berkontribusi terhadap keberhasilan *Sustainable Development Goals* (SDGs) nomor 7, dimana *Recovery Boiler* telah menyumbang 65% kebutuhan *steam* dan 40% kebutuhan listrik dari pabrik dengan energi terbarukan. Namun, salah satu permasalahan utama yang sering terjadi pada *recovery boiler* adalah pembentukan *deposit* (kerak) pada permukaan pipa pemanas yang dapat menyebabkan gangguan aliran gas buang (*flue gas*) dan *shutdown* tidak terencana (*unplanned shutdown*) pada boiler. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara kadar ion K^+ dan Cl^- pada abu dengan MTBF dari *Recovery Boiler* serta hubungan antara Cl^- dan *K Removal Percentage* terhadap kadar ion K^+ dan Cl^- pada abu dan dengan menggunakan metode kuantitatif melalui pengambilan sampel dan analisa laboratorium serta pengumpulan data teknis melalui *Plant Information (PI) Datalink*. Adapun hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah bahwa nilai Cl^- dan *K Removal Percentage* dari CRP diatas 90% mampu menurunkan kadar ion K^+ dan Cl^- pada abu *Recovery Boiler* menjadi 1,2 mg/g dan mencegah terjadinya *unplanned shutdown* yang diakibatkan oleh *fouling* pada permukaan pipa pemanas.

Kata kunci: *Chloride Removal Plant*, Energi terbarukan *Recovery Boiler*, *Sustainable Development Goals*, *Unplanned Shutdown*

Pendahuluan

Recovery Boiler merupakan sebuah alat dalam industri pulp dan kertas yang berfungsi untuk menghasilkan uap (*steam*) dari pembakaran unsur organik *black liquor* dan mengambil kembali (rekoveri) bahan kimia proses pemasakan pulp (terutama unsur natrium) dari *black liquor*. Penemuan *Kraft Recovery Boiler* oleh G. H. Tomlinson pada tahun 1930-an merupakan tonggak kemajuan proses *Kraft Pulping*. Hal ini memungkinkan proses rekoveri bahan kimia pembuatan pulp hampir menjadi sebuah siklus tertutup dengan efisiensi rekoveri bahan kimia sekitar 97% (Tran, 2016). Karena alasan ini, proses *Kraft Pulping* telah menjadi metode dominan untuk memproduksi pulp berbasis kayu (Salmenoja, 2019).

Recovery Boiler telah membuka jalan bagi industri pulp dan kertas untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil seperti batubara dan beralih menuju energi terbarukan dengan menggunakan *black liquor*. Hal ini sejalan dengan *Sustainable Development Goals* (SDGs) nomor 7 yang berbunyi "*Affordable and Clean Energy*" atau "Energi Bersih dan Terjangkau", dimana dengan penggunaan *Recovery Boiler* di pabrik pulp dan kertas telah memenuhi salah satu indikator dari keberhasilan dari SDGs nomor 7 yaitu peningkatan persentase penggunaan energi terbarukan. *Recovery Boiler* telah menyumbang 65% kebutuhan *steam* dan 40% kebutuhan listrik dari pabrik dan akan terus meningkat seiring perkembangan teknologi dan peningkatan produksi pulp dan kertas pabrik.

Salah satu permasalahan utama yang sering terjadi pada *recovery boiler* adalah pembentukan *deposit* (kerak) pada permukaan pipa pemanas, terutama di bagian *superheater* dan *boiler bank*. Kerak ini umumnya terbentuk akibat akumulasi senyawa anorganik, seperti natrium sulfat (Na_2SO_4) dan natrium karbonat (Na_2CO_3), yang terbawa oleh *black liquor* selama proses pembakaran. Kerak yang menumpuk berlebihan dapat menyebabkan gangguan aliran gas buang (*flue gas*), meningkatkan risiko *plug up* (tersumbat), bahkan *shutdown* tidak terencana (*unplanned shutdown*) pada boiler (Hupa, 2007).

Kandungan ion Kalium (K^+) dan Klorida (Cl^-) pada abu yang tinggi dapat menurunkan *sticky temperature*, yaitu suhu di mana partikel abu mulai menempel satu sama lain atau pada permukaan logam, sehingga mempercepat proses *fouling* (penyumbatan) pada permukaan pemanas (Tran & Vakkilainen, 2016). Penurunan nilai dua parameter ini meningkatkan risiko *slagging* karena abu menjadi lengket dan mulai mencair pada suhu yang lebih rendah dari kondisi operasi boiler (Miles et al., 1996).

Metode

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif berupa penentuan kadar ion K^+ dan Cl^- melalui rasio molar dari abu dan pembuatan grafik untuk memperoleh hubungan antara kadar ion K^+ dan Cl^- pada abu dengan frekuensi *shutdown* pada *recovery boiler* yang ditunjukkan dengan nilai MTBF (*Mean Time*

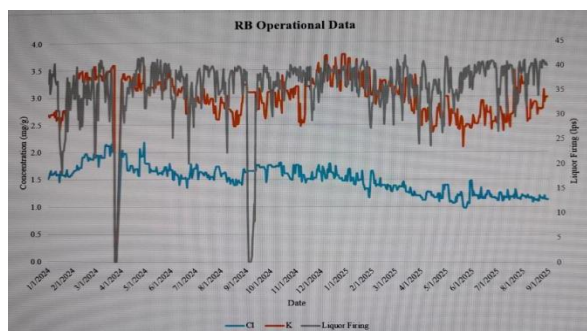
Between Failure). Data yang digunakan merupakan data primer yang diperoleh melalui pengambilan sampel abu dari *ash conveyor* dan diuji dengan metode titrasi di laboratorium untuk menentukan kadar ion K^+ dan Cl^- . Selain itu, penelitian ini juga menggunakan data sekunder berupa pengumpulan data teknis berupa parameter operasional *recovery boiler* dan CRP berupa *liquor firing*, Cl^- dan K Removal Percentage melalui software *Plant Information (PI) Datalink*. Data yang telah dikumpulkan kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi hubungan antara kadar ion K^+ dan Cl^- pada abu dengan MTBF pada *recovery boiler* serta peran optimisasi CRP dalam mengurangi kadar ion K^+ dan Cl^- pada abu *Recovery Boiler*.

Hasil Kerja

Hubungan antara kadar ion K^+ dan Cl^- dengan MTBF pada *Recovery Boiler*

Ion Kalium (K^+) merupakan salah satu unsur non-proses pada abu *recovery boiler* yang dikenal harus dikendalikan atau dihilangkan karena dapat menimbulkan masalah korosif pada sistem *recovery boiler*. Istilah NPE secara umumnya menggambarkan bahan, yang tidak diperlukan dalam proses, dalam hal ini adalah klorida dan potasium (Erwin, 2022). Keberadaan kalium (K) pada abu *recovery boiler* terbukti menurunkan temperatur leleh (*first melting temperature*) abu secara signifikan sehingga memperbesar potensi terjadinya *deposit* lengket dan korosi pada permukaan perpindahan panas, khususnya di daerah *superheater*. Konsentrasi kalium yang tinggi mempercepat laju korosi dan meningkatkan kemungkinan terjadinya *plugging* serta *fouling* di dalam sistem, sehingga proses perpindahan panas pun menjadi terganggu dan efisiensi operasi *recovery boiler* menurun secara keseluruhan (Balint et al, 2023).

Sementara itu, Ion Klorida (Cl^-) pada abu di *recovery boiler* bertindak sebagai senyawa agresif yang berpotensi mempercepat korosi pada permukaan logam dan struktur besi pada *boiler*. Kandungan klorida yang tinggi menurunkan temperatur leleh abu (*melting point*), meningkatkan sifat lengket dari deposit (*ash stickiness*), dan menyebabkan penumpukan pada permukaan perpindahan panas. Selain itu, klorida juga dikenal sangat mudah memicu terjadinya korosi karena ion Cl^- dapat berikatan dengan unsur logam, seperti besi (Fe), dan merusak lapisan pasivasi sehingga logam lebih cepat berkarat dan mengalami penipisan material (Andritz, n.d.).

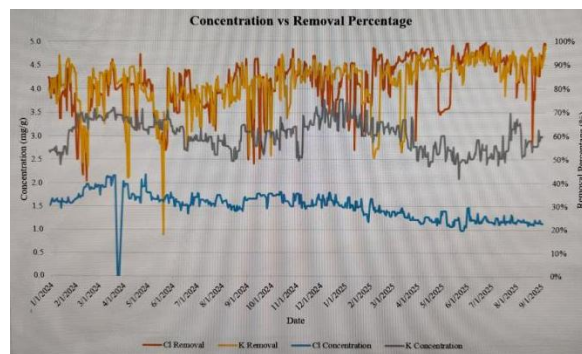


Gambar 1. Grafik Perbandingan Kadar Ion K^+ dan Cl^- dengan *Liquor Firing* pada *Recovery Boiler*

Gambar 1 menunjukkan hubungan antara kadar ion K^+ dan Cl^- pada abu dengan frekuensi *shutdown* pada *Recovery Boiler* yang ditunjukkan oleh *black liquor firing* pada periode Januari 2024 hingga Agustus 2025. Ketika *Liquor Firing* bernilai 0 Ips, maka *Recovery Boiler* sedang tidak beroperasi atau mengalami *shutdown*. Pada 24 Maret 2025, kadar ion klorida (Cl^-) dalam *Ash* berada diatas 2,18 mg/g yang mengakibatkan *unplanned shutdown* pada *Recovery Boiler* dan dilakukan *water washing* selama 3 hari dan menyebabkan kerugian total sekitar 725000 US\$ dalam segi produksi pabrik dan proses *shutdown-startup boiler*.

Selanjutnya, *Annual Shutdown* (*shutdown* tahunan) dari *Boiler* dilakukan pada tanggal 3-5 September 2024 yang menyebabkan MTBF dari *Recovery Boiler* hanya sebesar 6 bulan dari yang seharusnya 1 tahun atau 12 bulan. Ketika Kadar ion Cl^- turun dari sekitar 1,5 mg/g menjadi 1,2 mg/g pada akhir 2024 hingga awal 2025, tidak terjadi masalah *unplanned shutdown* pada *Recovery Boiler* dan nilai MTBF meningkat dari 6 bulan kembali menjadi 12 bulan seperti normalnya.

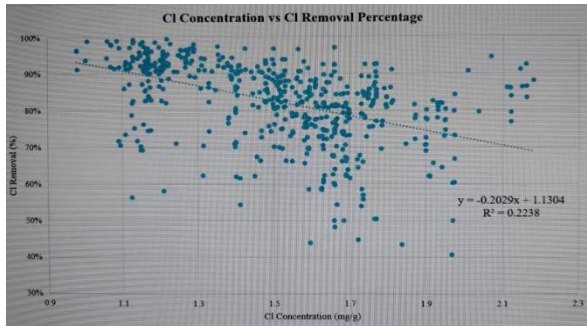
Pengurangan kadar ion Cl^- dengan *Chloride Removal Plant* (CRP)



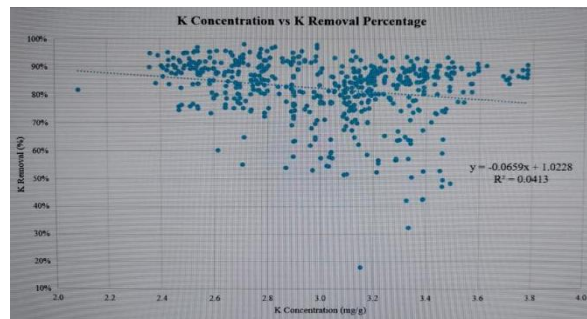
Gambar 2. Grafik Perbandingan Cl^- dan K Removal dengan Kadar ion K^+ dan Cl^- pada Abu *Recovery Boiler*

Salah satu departemen atau *plant* yang berfungsi untuk mengurangi kadar ion K^+ dan Cl^- dalam abu *recovery boiler* adalah CRP (*Chloride Removal Plant*). Proses-proses yang terjadi dalam CRP diantaranya terdiri dari *Solution* (pelarutan), *Crystallization* (kristalisasi), *Purging* (pembuangan), dan *Centrifugation* (sentrifugasi). Salah satu parameter dari CRP yang diambil dalam penelitian ini adalah Cl^- dan K Removal Percentage. Persentase tersebut mengindikasikan efisiensi dan efektivitas dari CRP dalam mengurangi kadar ion K^+ dan Cl^- dari abu *Recovery Boiler*.

Gambar 2 menunjukkan grafik antara Cl^- dan K Removal Percentage dengan kadar ion K^+ dan Cl^- pada abu *recovery boiler*. Terlihat ada kenaikan dari Cl^- dan K Removal Percentage setelah *unplanned shutdown* pada *Recovery Boiler* dari rata-rata 80% menjadi 85% dan naik lagi menjadi diatas 90% pada pertengahan 2025 yang disebabkan karena optimasi proses dari CRP sehingga proses pembuangan (*purging*) dari ion K^+ dan Cl^- dapat dilakukan dengan lebih efektif. Hal ini dibuktikan lebih jauh melalui grafik perbandingan antara kadar ion Cl^- dengan Cl^- Removal Percentage pada Gambar 3 dan perbandingan antara kadar ion K^+ dengan K Removal Percentage pada Gambar 4.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Cl Removal dengan Kadar Ion Cl⁻ pada Abu Recovery Boiler



Gambar 4 Grafik perbandingan K Removal dengan kadar ion K⁺ pada abu Recovery Boiler

Dari Gambar 3 dan 4 dapat disimpulkan bahwa terdapat hubungan saling berbanding terbalik antara Cl dan K Removal Percentage dengan kadar ion K⁺ dan Cl⁻ pada abu Recovery Boiler meskipun dengan korelasi yang lemah ($R^2 < 0,25$) dengan R^2 dari Cl Concentration vs Cl Removal sebesar 0,2238 dan K Concentration vs K Removal sebesar 0,0413. Hal ini menunjukkan bahwa kadar ion Cl⁻ pada abu Recovery Boiler dapat diturunkan ke batas aman dengan meningkatkan Cl Removal di atas 90%, sedangkan kadar ion K⁺ pada abu Recovery Boiler tidak terlalu dipengaruhi meskipun nilai K Removal sudah berada di atas 90%.

Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa optimasi dari proses-proses pada CRP yang ditunjukkan oleh nilai Cl dan K Removal Percentage di atas 90% mampu menurunkan kadar ion K⁺ dan Cl⁻ pada abu Recovery Boiler menjadi 1,2 mg/g dan mencegah terjadinya *unplanned shutdown* pada recovery boiler yang diakibatkan oleh *fouling* dan *plug-up* pada pipa pemanas.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Istri Tercinta dan anak-anakku atas dukungan dan doa yang tidak pernah putus kepada penulis.
2. Ibu Dr. Ir. Lusia Permata Sari Hartanti, S.T., M.Eng., CIOMP, IPM., ASEAN Eng. sebagai pembimbing yang senantiasa menyediakan waktunya untuk membimbing penulis dalam menyelesaikan usulan penelitian ini.
3. Ketua Program Studi Insinyur Dr. Ir. Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng.
4. Seluruh Dosen pada Program Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala yang telah bersedia menyalurkan ilmunya kepada penulis.
5. Management PT RAPP

Referensi

- ANDRITZ Oy. (n.d.). *Chloride and potassium removal systems*. Retrieved October 27, 2025, from <https://www.andritz.com/products-en/pulp-and-paper/pulp-production/kraft-pulp/arc-ale>
- Balint, R., Engblom, M., Niemi, J., Lindberg, D., Saarinen, T., Rautala, J., Hupa, M., & Hupa, L. (2023). Morphological and chemical differences within superheater deposits from different locations of a black liquor recovery boiler. *Energy*. Aalto University, Finland.
- Erwin, D., & Hariyanti, D. (2022). Pengaruh removal chloride terhadap efficiency chloride removal plant (CRP) pada proses vacuum evaporator. *Jurnal Vokasi Teknologi Industri (JVTI)*.
- Hupa, M. (2007). *Recovery boiler chemical principles*. TAPPI Kraft Recovery Course 2007.
- Miles, T. R., Jr., Wodzinski, R., Baxter, L. L., Jenkins, B. M., Milne, T. A., & Dayton, D. C. (1996). Biomass combustion characteristics. *Fuel Processing Technology*, 47(1), 161–183.
- Salmenoja, K. (2019). Development of kraft recovery boiler: What have been the main development stages? In *TAPPI PEERS 2019*. Saint Louis.
- Tran, H., & Vakkilainen, E. K. (2016). *The kraft chemical recovery process*.



Energi Berkelanjutan Melalui Integrasi System Zero Liquid Discharge dan Process Water Treatment sebagai Implemetasi Sustainable Development Goals (SDG-9) pada Industri Kimia

Muhamad Afandi¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ 345afandi@gmail.com

Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan energi dan air bersih menjadi tantangan utama bagi sektor industri modern. Industri kimia merupakan salah satu pengguna air dan energi terbesar, yang berkontribusi signifikan terhadap emisi karbon dan limbah cair (IEA, 2023). Keterkaitan antara konsumsi energi dan penggunaan air dikenal sebagai *energy-water nexus*, di mana optimasi salah satu sumber daya berdampak langsung terhadap efisiensi sumber daya lainnya (Hussey & Pittock, 2012).

Penerapan konsep energi berkelanjutan tidak hanya berfokus pada pengurangan konsumsi energi, tetapi juga pada optimalisasi pengelolaan air proses, termasuk pemulihan energi termal dari *steam condensate*, air panas, dan air pendingin (Zhang et al., 2020). Unit *Process Water Treatment* (PWT) berperan penting dalam mengolah air limbah dan menyediakan air dengan kualitas sesuai spesifikasi proses produksi. Namun, dalam praktiknya, masih terdapat buangan yang belum dimanfaatkan secara optimal, seperti *condensate*, *seal water*, dan air pendingin.

Melalui penerapan *Zero Liquid Discharge* (ZLD), air buangan tersebut dapat *direcover* dan digunakan kembali, sehingga tidak ada pembuangan cair ke lingkungan (Zhang et al., 2020). Pendekatan ini sejalan dengan prinsip *circular economy*, di mana limbah dipandang sebagai sumber daya sekunder yang dapat mendukung efisiensi proses dan pengurangan biaya operasional (World Bank, 2021; Kemira, 2021).

Integrasi sistem PWT–ZLD juga mendukung pencapaian *Sustainable Development Goal* (SDG) 9: *Industry, Innovation, and Infrastructure*, yang menekankan pentingnya membangun infrastruktur tangguh, mempromosikan industrialisasi inklusif dan berkelanjutan, serta mendorong inovasi teknologi (United Nations, 2020). Implementasi ZLD dalam industri kimia tidak hanya mengurangi konsumsi air

Keterbatasan sumber air bersih dan meningkatnya kebutuhan energi menuntut industri untuk menerapkan sistem yang efisien dan ramah lingkungan. Penelitian ini menganalisis integrasi sistem *Process Water Treatment* (PWT) dengan *Zero Liquid Discharge* (ZLD) pada industri kimia sebagai strategi peningkatan efisiensi energi dan konservasi air. Data diambil dari pengamatan operasi dan hasil pengukuran volume air buangan yang berpotensi *direcover*. Hasil menunjukkan bahwa total potensi pemulihan air mencapai 35.626 m³ selama enam bulan, dengan penghematan energi sebesar 0,57 GJ/jam yang dihasilkan dari berkurangnya kebutuhan air baku hingga 15%. Integrasi sistem ini mendukung tujuan *Sustainable Development Goals* (SDG-9), yaitu memperkuat infrastruktur industri berkelanjutan dan mendorong inovasi teknologi ramah lingkungan.

Kata kunci: *Zero Liquid Discharge*, *Process Water Treatment*, Efisiensi Energi, SDG-9, Industri Kimia

baku dan beban energi, tetapi juga menciptakan model operasi industri berkelanjutan yang mendorong inovasi efisiensi sumber daya, modernisasi infrastruktur, dan pengurangan dampak lingkungan (Ostad-Ali-Askari & Eslamian, 2021; Yaqub et al., 2023).

Strategi ini sejalan dengan target SDG 9.4, yaitu *upgrade* dan *retrofit* industri untuk meningkatkan efisiensi sumber daya serta adopsi teknologi bersih. Pemulihan air dan energi dari buangan proses mengurangi ketergantungan pada sumber eksternal, menurunkan konsumsi energi, dan menurunkan emisi karbon industri, mendukung pembangunan industri berkelanjutan (Yaqub et al., 2023; UNIDO, 2023). Selain itu, ZLD mendorong inovasi teknologi melalui sistem kontrol otomatis, *monitoring* energi *real-time*, *predictive maintenance*, dan integrasi *heat recovery*, menjadikan sistem industri lebih adaptif, efisien, dan tangguh menghadapi perubahan produksi serta regulasi lingkungan (Yaqub et al., 2023; UNDP, 2025).

Dengan demikian, integrasi PWT–ZLD merupakan langkah strategis untuk mencapai industri berkelanjutan, meningkatkan efisiensi sumber daya, mendorong modernisasi infrastruktur, dan mendukung pencapaian target SDG 9 melalui inovasi teknologi dan praktik *circular economy*.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus kuantitatif pada salah satu industri kimia yang berlokasi di kawasan teluk. Pengumpulan data dilakukan secara langsung melalui pengamatan lapangan pada unit *Process Water Treatment* (PWT) dan sistem *Zero Liquid Discharge* (ZLD) yang telah terintegrasi. Selain itu, dikumpulkan pula data operasional meliputi laju aliran air buangan, konsumsi energi, serta volume air yang berhasil *direcover* dari sistem. Seluruh data kemudian dianalisis menggunakan neraca massa dan energi untuk menghitung tingkat efisiensi pemanfaatan air serta

penghematan energi yang diperoleh akibat berkurangnya kebutuhan air baku.

Hasil Kerja

1. Identifikasi Potensi Pemulihan Air

Kajian awal terhadap potensi pemulihan air di area proses menunjukkan peluang signifikan untuk meningkatkan efisiensi sumber daya. Sumber-sumber air buangan, seperti PWT *dumping*, *steam condensate*, *seal water*, serta air pendingin, sebelumnya belum dimanfaatkan secara optimal. Hasil survei menunjukkan total potensi pemulihan air mencapai 35.626 m³ selama enam bulan, setara 19.792 m³ per bulan yang tidak perlu diambil dari sumber alam, seperti air tanah atau jaringan PAM, sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Total Potensi Pemulihan Air

Sumber Air	Potensi Pemulihan Air dalam 6 bulan (M3)
PWT <i>dumping</i>	3310
Steam kondensat <i>dumping</i>	2940
Seal water pompa	9072
Steam trap condensate	8640
Air pendingin Gamma Source	7776
Air pendingin kontrol valve	3888
Total potensi pemulihan air	35626

Pemulihan air memberikan kontribusi langsung terhadap konservasi sumber daya dan efisiensi energi, karena *steam condensate* (11.580 m³) dan air pendingin (11.664 m³) masih mengandung energi termal yang signifikan. Pemanfaatan kembali aliran ini mengurangi kebutuhan energi untuk pemanasan air, menurunkan beban *cooling tower*, dan menekan konsumsi listrik serta bahan bakar, sehingga turut menurunkan emisi karbon (Bailey et al., 2020; Veolia, 2023).

Sistem ZLD terintegrasi yang diterapkan mencakup unit pra-pengolahan dan skimmer untuk pemisahan oli, sebelum air yang terkumpul digunakan kembali sebagai umpan di PWT. Desain sistem menekankan optimasi sirkulasi internal dan pemanfaatan panas dari air proses, sehingga efisiensi energi dapat ditingkatkan tanpa memerlukan unit tambahan seperti RO, evaporator, atau kristalisator. Pendekatan ini memungkinkan pemulihan air hingga 89% dan menurunkan kebutuhan energi untuk pemanasan maupun pendinginan (Kumar & Chaudhury, 2011; Al-Amshawee et al., 2020).

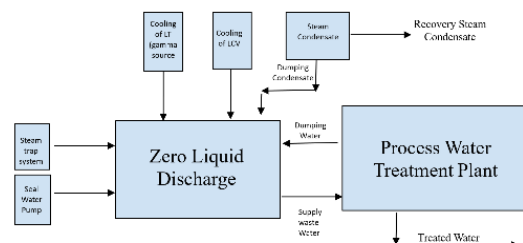
Integrasi ZLD–PWT meningkatkan kapasitas PWT hingga 8 ton/jam, mengurangi ketergantungan terhadap pasokan air eksternal, dan memungkinkan operasi industri lebih tangguh menghadapi fluktuasi pasokan air dan energi. Sistem ini juga mendukung inovasi teknologi melalui kontrol otomatis, *monitoring* energi *real-time*, dan *predictive maintenance*, serta mendorong R&D untuk pengembangan metode baru dalam efisiensi air dan energi (Yaqub et al., 2023; UNDP, 2025).

Secara keseluruhan, integrasi PWT–ZLD menunjukkan bahwa modernisasi infrastruktur, pemulihan air dan energi, serta inovasi teknologi dapat dicapai secara simultan, selaras dengan SDG 9: *Industry, Innovation, and Infrastructure*. Sistem ini memperkuat kapasitas pengolahan air, meningkatkan efisiensi

energi, dan mendukung industrialisasi berkelanjutan di industri kimia.

2. Integrasi Sistem ZLD

Integrasi PWT dan ZLD, seperti ditunjukkan pada Gambar 1, memanfaatkan aliran air proses, pemulihan kondensat, dan sirkulasi internal. Dari total potensi air 35.626 ton selama enam bulan, sekitar 8 ton/jam yang sebelumnya terbuang dapat dipulihkan, meningkatkan kapasitas PWT, mengurangi ketergantungan air eksternal, dan meningkatkan efisiensi energi sistem.



Gambar 1. Blok Diagram Integrasi PWT dan ZLD

Konsep Energy–Water Nexus menjadi landasan penerapan integrasi ZLD–PWT, menekankan hubungan simbiosis antara penggunaan energi dan air dalam industri proses. ZLD tidak hanya berfokus pada pengolahan air, tetapi juga pada pemulihan energi termal dari *steam condensate* dan air panas proses. Pendekatan ini memungkinkan optimasi panas dan air secara simultan, yang pada gilirannya meningkatkan efisiensi operasional dan mendukung modernisasi infrastruktur industri (Hussey & Pittock, 2012; Yaqub et al., 2023).

Sistem ZLD terintegrasi dibangun melalui desain sinergis antara unit pra-pengolahan, *including skimmer* untuk pemisahan aliran air dan fasa terlarut, serta sistem PWT (*Plant Water Treatment*) yang meliputi unit *hydrolyzer* dan desorber. Sistem ini dirancang khusus untuk menangani karakteristik beragam dari sumber air buangan, termasuk aliran yang mengandung urea, amonia, dan karbamat (Llácer-Iglesias et al., 2020). Hasil akhirnya adalah air olahan dengan kualitas unggul, dengan total organic carbon (TOC) di bawah 3 ppm dan konduktivitasnya di bawah 30 µS/cm.

Implementasi ZLD berhasil meningkatkan kapasitas PWT dari 54 ton/jam menjadi 62 ton/jam, dengan efisiensi pemulihan air naik dari 72% menjadi 89%. Peningkatan ini mendukung ketahanan infrastruktur pengolahan air dan efisiensi sistem energi, sesuai dengan prinsip SDG 9 yang menekankan peningkatan kapasitas industri serta penggunaan sumber daya secara efisien dan berkelanjutan (Ulson de Souza et al, 2020; OECD, 2021).

Efisiensi sumber daya yang dicapai melalui ZLD–PWT juga selaras dengan target SDG 9.4, yaitu peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya dan pengurangan dampak lingkungan. Pemulihan air dari *steam condensate*, *seal water*, dan *cooling water* mengurangi ketergantungan terhadap sumber eksternal, menekan konsumsi energi untuk pemanasan dan pendinginan, serta menurunkan emisi karbon industri, sehingga menciptakan operasi industri yang lebih tangguh dan berkelanjutan (UNIDO, 2023; Zhang et al., 2020).

Selain modernisasi infrastruktur, integrasi ZLD–PWT mendorong inovasi teknologi dalam manajemen air dan energi. Penggunaan sistem kontrol otomatis, *predictive maintenance*, dan *monitoring* energi *real-time* meningkatkan stabilitas operasi, optimasi beban puncak, dan pengurangan *losses* energi. Inovasi ini membuat sistem industri lebih adaptif, efisien, dan mampu menghadapi perubahan regulasi atau kebutuhan produksi (Yaqub et al., 2023).

Kontribusi inovasi ini juga terlihat pada peningkatan efisiensi energi secara keseluruhan. Pemanfaatan panas dari *steam condensate* dan air panas proses, ditambah optimasi sirkulasi internal, menurunkan konsumsi energi hingga 25–30%, memperkuat ketahanan infrastruktur, dan memungkinkan operasi pabrik yang lebih andal. Dengan demikian, ZLD–PWT memperkuat posisi industri dalam mencapai target SDG 9 terkait inovasi teknologi dan pengelolaan sumber daya secara efisien (Ulson de Souza et al, 2020).

Dari sisi ekonomi, analisis tekno-ekonomi menunjukkan bahwa meskipun investasi awal ZLD signifikan, pengembalian jangka menengah cukup menarik dengan ROI 18–22% dan *payback period* 4–6 tahun. Keuntungan ini diperoleh dari penghematan biaya air, energi, dan pengolahan limbah, serta peningkatan kapasitas produksi, sehingga investasi pada modernisasi infrastruktur industri menjadi selaras dengan tujuan keberlanjutan SDG 9 (IEA, 2022; World Bank, 2022). Faktor kunci keberhasilan implementasi ZLD meliputi desain sistem modular dan terintegrasi, optimasi konsumsi energi melalui *heat recovery*, serta penggunaan kontrol otomatis untuk menjaga stabilitas operasional. Pendekatan bertahap dari skala pilot hingga skala penuh juga meminimalisir risiko teknis dan memastikan kelancaran modernisasi infrastruktur, yang menjadi fokus SDG 9 dalam pembangunan industri yang tangguh dan inovatif (UNIDO, 2023; IPCC, 2023).

Secara keseluruhan, integrasi PWT–ZLD membuktikan bahwa pembangunan infrastruktur industri yang tangguh, efisiensi sumber daya, dan inovasi teknologi dapat dicapai secara simultan. Sistem ini memperkuat kapasitas pengolahan air, meningkatkan efisiensi energi, dan mendorong inovasi proses, sehingga mendukung pencapaian SDG 9 dan transisi industri kimia menuju praktik yang lebih berkelanjutan, adaptif, dan inovatif.

3. Dampak terhadap Efisiensi Energi

Integrasi sistem PWT–ZLD dalam industri kimia memberikan kontribusi signifikan terhadap pencapaian *Sustainable Development Goal* (SDG) 9: *Industry, Innovation, and Infrastructure*, khususnya dalam pembangunan infrastruktur industri yang tangguh dan efisien. Melalui pemulihan air proses sebesar 35.626 m³ selama enam bulan dan penghematan energi sebesar 0,57 GJ/jam, sistem ini tidak hanya mengurangi konsumsi air baku dan energi, tetapi juga memperkuat kapasitas serta ketahanan infrastruktur pengolahan air di pabrik (Zhang et al., 2020).

Tabel 2. Manfaat Integrasi yang didapat

	Sebelum integrasi	Integrasi PWT-ZLD
Kapasitas PWT	54	62
Air dibuang ke selokan		0
Konsumsi air baku	8	85 %
Pemanfaatan-panas buangan	100 %	0.57 GJ
	0	

Efisiensi energi yang diperoleh melalui integrasi ZLD–PWT dicapai melalui beberapa mekanisme utama. Pemanfaatan kembali air pendingin menurunkan beban *thermal* pada *desalination plant* menghasilkan air baku hingga 25%, sementara pemulihan panas dari *steam condensate* dan air proses panas berhasil menghemat energi hingga 13,68 GJ/hari. Optimalisasi sirkulasi internal juga meningkatkan efisiensi termal boiler dari 82% menjadi 86% dan menurunkan konsumsi energi spesifik chiller, sehingga seluruh sistem utilitas menjadi lebih efisien dan adaptif (Gude, 2017; Bailey et al., 2020).

Dampak sistemik dari integrasi ZLD–PWT mencakup penurunan intensitas energi produksi sebesar 13,6%, optimasi beban puncak melalui *load shifting*, serta pengurangan *thermal losses* hingga 40%. Efisiensi ini memperkuat infrastruktur industri, sehingga unit produksi mampu beroperasi lebih stabil dan tahan terhadap fluktuasi beban energi, sejalan dengan prinsip SDG 9 yang menekankan modernisasi infrastruktur dan peningkatan kapasitas industri (UNIDO, 2023).

Selain meningkatkan ketahanan infrastruktur, integrasi ZLD–PWT mendorong inovasi teknologi. Penggunaan unit RO, evaporator, kristalisator, sistem kontrol otomatis, *predictive maintenance*, dan *monitoring* energi *real-time* memungkinkan optimasi proses berbasis teknologi tinggi. Pendekatan ini mendukung efisiensi sumber daya, meminimalkan risiko operasional, serta memperkenalkan praktik industri modern yang berorientasi pada *sustainability* dan SDG 9 (Yaqub et al., 2023).

Strategi optimasi lanjutan seperti *Advanced Process Control* dan integrasi *thermal storage* menambah fleksibilitas operasional dan meningkatkan *energy return on investment* (EROI), di mana setiap unit energi yang diinvestasikan menghasilkan 8,5 unit energi yang dapat dimanfaatkan. Hal ini menunjukkan bahwa inovasi teknologi dapat secara simultan meningkatkan efisiensi energi, pemulihan air, dan modernisasi infrastruktur, yang menjadi inti dari SDG 9 (Stillwell et al., 2019).

Secara keseluruhan, implementasi integrasi ZLD–PWT membuktikan bahwa peningkatan efisiensi energi dan pemanfaatan air dapat dicapai secara bersamaan melalui penguatan infrastruktur, penerapan teknologi canggih, dan optimalisasi proses industri. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi dampak lingkungan dan biaya operasional, tetapi juga mendorong transformasi industri kimia menjadi lebih tangguh, inovatif, dan berkelanjutan (Ostad-Ali-Askari & Eslamian, 2021).

Dengan modernisasi infrastruktur pengolahan air dan integrasi teknologi pemulihan energi, sistem ZLD–PWT menghadirkan model industri yang selaras dengan target SDG 9.4, yaitu peningkatan efisiensi sumber daya dan pengurangan dampak lingkungan melalui

upgrading infrastruktur industri. Infrastruktur yang lebih adaptif dan efisien ini memungkinkan pabrik untuk menyesuaikan kapasitas produksi, memenuhi regulasi lingkungan, dan menghadapi perubahan kebutuhan industri secara lebih fleksibel (UNIDO, 2023; Zhang et al., 2020). Kontribusi terhadap SDG 9 juga terlihat dari kemampuannya meningkatkan ketahanan sistem industri terhadap perubahan eksternal, termasuk fluktuasi harga energi, ketersediaan air baku, dan tuntutan regulasi lingkungan. Dengan mengintegrasikan PWT–ZLD, pabrik dapat menjaga kontinuitas produksi, mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya eksternal, dan memastikan keberlanjutan operasional jangka panjang (Patel et al., 2021).

Selain itu, inovasi dan modernisasi yang diterapkan dalam sistem ZLD–PWT menstimulasi pengembangan teknologi industri baru, yang dapat direplikasi di sektor kimia lain maupun industri proses lain. Hal ini mencerminkan peran strategis ZLD–PWT dalam mendorong industrialisasi inklusif dan berkelanjutan, yang merupakan pilar utama SDG 9 (United Nations, 2020). Dengan demikian, integrasi sistem PWT–ZLD menjadi strategi penting dalam industri kimia modern untuk mencapai industri yang lebih efisien, tangguh, dan inovatif. Implementasi sistem ini menunjukkan bahwa penguatan infrastruktur, inovasi teknologi, dan efisiensi sumber daya dapat dicapai secara simultan, sekaligus mendukung pencapaian SDG 9 dan mempercepat transisi industri menuju praktik berkelanjutan.

Kesimpulan

Integrasi sistem PWT–ZLD membuktikan bahwa modernisasi infrastruktur, inovasi teknologi, dan peningkatan efisiensi sumber daya dapat dicapai secara simultan. Sistem ini tidak hanya meningkatkan efisiensi energi dan pemulihan air, tetapi juga memperkuat kapasitas, ketahanan, dan fleksibilitas infrastruktur industri kimia. Dengan potensi pemulihan air sebesar 35.626 m³ per enam bulan dan penghematan energi 0,57 GJ/jam, implementasi ZLD–PWT memberikan kontribusi nyata terhadap pencapaian SDG 9, menciptakan industri yang lebih berkelanjutan, inovatif, dan efisien.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada manajemen pabrik, tim *Process Water Treatment*, dan rekan-rekan yang telah memberikan dukungan data dan kesempatan implementasi proyek ini.

Referensi

- Al-Amshawee, S., Bin Mohd Yunus, M. Y., Bin Mohd Yunus, R., & Lynam, J. G. (2020). Zero waste system comprised of fixed bed biofilm reactor, ozone oxidation, and electrodialysis desalination for wastewater sustainability. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101593. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101593>
- Bailey, J. R., Ahmad, S., & Batista, J. R. (2020). The impact of advanced treatment technologies on the energy use in satellite water reuse plants. *Water*, 12(2), 366. <https://doi.org/10.3390/w12020366>
- Energy Recovery Inc. (2022). *PX Powers energy efficient industrial wastewater reuse plant* [Case study]. <https://energyrecovery.com/resources/px-powers-energy-efficient-industrial-wastewater-reuse-plant>
- Gude, V. G. (2017). Desalination and water reuse to address global water scarcity. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 16, 591–609. <https://doi.org/10.1007/s11157-017-9449-7>
- Hussey, K., & Pittock, J. (2012). The energy–water nexus: Managing the links between energy and water for a sustainable future. *Ecology and Society*, 17(1), 31. <https://doi.org/10.5751/ES-04641-170131>
- International Energy Agency. (2022). *Energy efficiency 2022: Analysis and outlooks to 2030*.
- International Energy Agency. (2023). *Renewables and energy efficiency report 2023*.
- International Energy Agency. (2024). *Industrial decarbonization strategies*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: AR6 synthesis report*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf
- Kemira Oyj. (2021). *How water treatment contributes to the circular economy*. <https://www.kemira.com/stories/how-water-treatment-contributes-to-the-circular-economy>
- Kumar, P., & Chaudhury, G. (2011). Water reuse and wastewater minimization in chemical industries using differentiated regeneration of contaminants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(12), 7428–7436. <https://doi.org/10.1021/ie200305z>
- Liang, S., Zhang, X., Wang, Y., & Chen, L. (2021). Making waves: Zero liquid discharge for sustainable industrial effluent management. *Water*, 13(20), 2852. <https://doi.org/10.3390/w13202852>
- Llácer Iglesias, R., Pérez, J. M., Satorre Aznar, J. R., López Jiménez, P. A., & Pérez Sánchez, M. (2020). Energy recovery in wastewater treatment systems through hydraulic micro-machinery: Case study. *Journal of Applied Research in Technology & Engineering*, 7(2), 45–56. <https://doi.org/10.4995/jarte.2020.13766>
- OECD. (2021). *Green innovation in industrial water management*. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Ostad-Ali-Askari, K., & Eslamian, S. S. (2021). Water reuse in industry: Necessities and possibilities. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. <https://thescipub.com/abstract/10.3844/ajeassp.2021.94.102>
- Ravichandran, S., Kumar, R., & Jain, A. (2020). Energy optimization in multi-effect evaporators for ZLD systems. *Energy Reports*, 6, 1289–1301.
- Sachidananda, M., Webb, D. P., & Rahimifard, S. (2016). A concept of water usage efficiency to support water reduction in manufacturing industry. *Sustainability*, 8(12), 1222. <https://doi.org/10.3390/su8121222>
- Stillwell, A. S., Webber, M. E., & Duncan, I. J. (2019). The energy–water nexus: Integrated approaches for sustainable industrial water management. *Energy Policy*, 128, 1–10.
- Ulson de Souza, S. M. G. d. A., Xavier, M. F., da Silva, A., & Ulson de Souza, A. A. (2011). Water reuse and wastewater minimization in chemical industries using



- differentiated regeneration of contaminants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(12), 7428–7436. <https://doi.org/10.1021/ie200305z>
- United Nations Environment Programme. (2021). *Wastewater: The untapped resource*.
- United Nations Industrial Development Organization. (2023). *Sustainable industrial development and SDG 9 implementation*.
- United Nations Industrial Development Organization. (2024). *Annual report 2023: Progress by innovation*. <https://www.unido.org/annual-report-2023>
- United Nations Development Programme. (2025). Sustainable development goals: Goal 9 – Industry, innovation and infrastructure. <https://www.undp.org/sustainable-development-goals/industry-innovation-and-infrastructure>
- UN-Water. (2023). *Progress on water and sanitation: SDG 6 synthesis report 2023*.
- Veolia. (2023). *Industrial water reuse and energy efficiency in process industries* [Technical report].
- Wang, J., Li, X., & Zhang, Y. (2021). Low-carbon transition in industrial wastewater treatment. *Environmental Science & Policy*, 124, 356–366.
- World Bank. (2021). *Water in circular economy and resilience (WICER): The case of Lingyuan City, China* [Position paper]. Washington, DC.
- Yaqub, M., Celebi, M. D., Dilaver, M., Bhagat, S. K., Kobya, M., & Lee, W. (2023). Treating textile wastewater to achieve zero liquid discharge: A comprehensive techno-economic analysis. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(10), 651. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06646-5>
- Zhang, Y., et al. (2020). Energy recovery and optimization in ZLD systems for chemical industries. *Applied Energy*, 275, 115300.
- Zhang, Y., et al. (2025). Industrial zero liquid discharge strategy in the water-scarce regions of China triggering the antagonism trade-off of pollution and carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, 457, 145238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.145238>



Pembuatan SOP Praktek di Laboratorium Konstruksi Jurusan Teknik Sipil

**Desri Marfenita Hale Kore^{1,2} Tarsisius Dwi
Wibawa Budianta¹**

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya
Mandala Surabaya

² Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Kupang

✉ desrihalekore@gmail.com

Laboratorium konstruksi memiliki peran penting dalam mendukung kegiatan praktik vokasi di Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang. Dengan adanya berbagai aktivitas praktikum seperti praktek kerja beton, praktek kerja baja, kerja kayu, kerja acuan dan perancah, plumbing, dan kerja batu, terdapat potensi risiko kecelakaan yang perlu dikendalikan melalui Standar Operasional Prosedur (SOP). Studi kasus ini bertujuan untuk membuat SOP Laboratorium Konstruksi yang sistematis, aman, guna meningkatkan disiplin, keselamatan, dan kualitas pembelajaran. Metode yang digunakan meliputi observasi lapangan, wawancara teknisi dan dosen serta tambahan identifikasi bahaya menggunakan metode HIRADC, dan penyusunan SOP serta evaluasinya. Hasil pembuatan SOP menunjukkan peningkatan kesadaran keselamatan mahasiswa, kepatuhan APD, dan ketertiban prosedur praktikum. SOP ini menjadi pedoman bagi dosen, teknisi, dan mahasiswa dalam menciptakan lingkungan praktikum yang aman dan efektif.

Kata kunci: SOP Laboratorium, HIRADC, K3, Vokasi

Pendahuluan

Teknik sipil adalah cabang ilmu teknik yang mempelajari perancangan, konstruksi, dan pemeliharaan infrastruktur fisik dan lingkungan untuk kemaslahatan masyarakat. Teknik sipil di dalam kampus mencakup studi perencanaan, perancangan, konstruksi, dan pemeliharaan infrastruktur seperti bangunan, jembatan, dan jalan (*Rekayasa Sipil - Wikipedia Bahasa Indonesia, Ensiklopedia Bebas, n.d.*). Mahasiswa mempelajari berbagai bidang, seperti rekayasa struktur, geoteknik, transportasi, sumber daya air, dan manajemen konstruksi, dengan dukungan fasilitas seperti laboratorium untuk mekanika tanah, bahan bangunan, dan hidrolika. Selain fasilitas di dalam kelas, perlu juga didukung dengan adanya laboratorium yang mumpuni dan memenuhi standar baik dalam prakteknya maupun dalam keamanan dan keselamatan. Untuk menunjang hal tersebut perlu adanya fasilitas dan prosedur yang baik dan jelas untuk mengatur jalannya kegiatan praktek di laboratorium sehingga dapat tercipta suasana belajar yang aman, nyaman dan kondusif. Standar operasional prosedur adalah hal wajib dan penting yang harus dimiliki dan diterapkan di laboratorium untuk mengatur segala aktivitas yang terjadi di dalam laboratorium (Yani, 2025).

Membangun sistem manajemen keselamatan laboratorium yang efektif secara ilmiah memiliki signifikansi praktis dan dampak jangka panjang. Sistem manajemen keselamatan laboratorium harus mencakup langkah-langkah dan strategi manajemen untuk mencegah kecelakaan, menghilangkan bahaya keselamatan, dan menangani keadaan darurat. Hal ini melibatkan penetapan peraturan manajemen keselamatan, penguatan pelatihan dan pendidikan kesadaran, penyediaan fasilitas dan peralatan keselamatan, penyusunan rencana darurat dan prosedur tanggap darurat, serta peningkatan tingkat keselamatan secara keseluruhan (Hailing et al., 2023).

Politeknik Negeri Kupang (PNK) merupakan salah satu Perguruan Tinggi Vokasi yang ada di Nusa Tenggara Timur. Pendidikan vokasi bertujuan untuk menghasilkan lulusan profesional yang menguasai keahlian terapan dalam bidang tertentu, sehingga pembelajaran dalam vokasi lebih menitikberatkan praktikum baik di lapangan maupun laboratorium. Oleh karena itu, laboratorium yang mumpuni tentunya dibutuhkan untuk menunjang proses pembelajaran vokasi. Laboratorium yang mumpuni ditandai dengan kemampuan laboratorium itu sendiri dalam menyediakan fasilitas yang lengkap untuk mendukung proses pembelajaran serta mampu menjadi solusi untuk menjawab tantangan terkini yang ada di tengah Masyarakat (Zhang et al., n.d.).

Laboratorium Konstruksi di Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang merupakan sarana pembelajaran vokasi yang sangat penting bagi mahasiswa dalam memahami praktik konstruksi secara langsung. Aktivitas praktikum meliputi praktek kerja beton, praktek kerja baja, praktek kerja kayu, kerja acuan dan perancah, plumbing, dan kerja batu. Kompleksitas kegiatan tersebut berpotensi menimbulkan risiko keselamatan seperti cedera fisik, kecelakaan alat, dan bahaya material. Selain fasilitas yang lengkap, untuk menunjang laboratorium yang mumpuni juga membutuhkan Standar Operasional Prosedur (SOP) praktek yang terarah dan sesuai aturan (Indonesia, 1970). SOP praktek di laboratorium konstruksi Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang saat ini belum memadai, hal ini mendasari penulis untuk melakukan studi kasus dengan membuat SOP praktek yang mencakup tata tertib dan aturan di laboratorium dan penanganan keselamatan dan kesehatan kerja (K3).

Penelitian ini diharapkan menjadi langkah awal untuk menjawab kebutuhan laboratorium teknik sipil PNK menjadi lebih aman, nyaman, mumpuni dan terstandar dan menjadi acuan bagi mahasiswa teknik sipil Politeknik Negeri Kupang dalam melaksanakan kegiatan praktek di laboratorium.

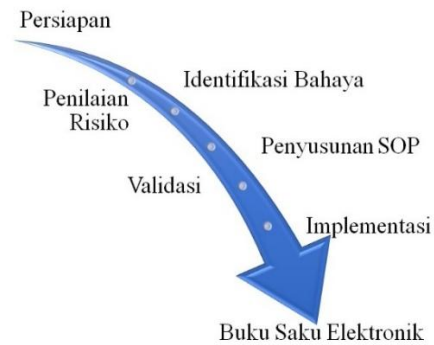
Metode

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Konstruksi (bengkel) Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang. Data diperoleh melalui observasi proses praktikum yang dilaksanakan di laboratorium konstruksi atau bengkel yaitu praktek kerja kayu, praktek kerja baja, praktek acuan dan perancah, praktek kerja beton, praktek kerja batu, dan praktek plumbing, wawancara dengan kepala laboratorium konstruksi, dosen mata kuliah dan pranata laboratorium pendidikan tentang prosedur atau standar yang dipakai sebagai acuan dalam melakukan kegiatan praktek selama ini serta studi dokumen SOP dan standar K3. Variabel dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Variabel Penelitian

No	Variabel	Indikator	Metode Pengukuran
1	Prosedur kerja	Tahapan praktikum, penggunaan alat	Observasi langsung terhadap kegiatan praktikum di laboratorium konstruksi
2	Keselamatan kerja	Penggunaan APD, pelaksanaan <i>briefing</i> keselamatan, dan pengawasan teknis	Wawancara dengan teknis/dosen serta <i>checklist</i> keselamatan
3	Risiko kerja	Potensi bahaya dari alat, material, dan lingkungan kerja	Analisis risiko menggunakan metode HIRADC
4	Penyusunan SOP	Standarisasi langkah kerja, format dokumen, dan kesesuaian dengan regulasi	Studi literatur terhadap peraturan direktur PNK, standar ISO 45001, PP No. 50/2012, dan pedoman K3
5	Efektivitas SOP	Tingkat kepatuhan mahasiswa, ketertiban kerja, dan penurunan risiko kecelakaan	Evaluasi lapangan melalui observasi dan umpan balik teknis/dosen

Metode analisis yang digunakan meliputi observasi lapangan, wawancara PLP dan dosen, studi literatur dan tambahan identifikasi bahaya menggunakan metode HIRADC (*Hazard Identification, Risk Assessment, dan Determining Control*) (Khayyirah et al., 2024), dan penyusunan SOP serta evaluasinya. Penelitian ini menggunakan tiga metode pengumpulan data utama, yaitu observasi langsung, wawancara dan studi pustaka. Observasi dilakukan dengan mengamati berbagai aktivitas di laboratorium yang berpotensi menimbulkan bahaya, seperti persiapan alat dan bahan, pelaksanaan praktikum, serta penggunaan peralatan. Proses observasi dilakukan secara terstruktur dan sistematis untuk mengidentifikasi faktor penyebab bahaya, potensi kecelakaan kerja, serta kondisi keselamatan dan kenyamanan lingkungan laboratorium. Wawancara dilakukan kepada kepala laboratorium, dosen dan PLP untuk mendapatkan informasi terkait gambaran tahapan praktikum yang dilakukan di laboratorium konstruksi teknik sipil Politeknik Negeri Kupang. Tahapan yang akan dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Penelitian ini berangkat dari permasalahan tidak adanya Standar Operasional Prosedur (SOP) dan sistem Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) yang terstandar di Laboratorium Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dilakukan proses identifikasi risiko, penyusunan SOP berbasis K3, implementasi SOP di lapangan, serta evaluasi terhadap hasil penerapannya guna meningkatkan keselamatan dan efisiensi kegiatan praktikum. Secara konseptual, hubungan antara komponen tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 2. Kerangka Konseptual Penelitian

Hasil Kerja

Gambaran Umum Laboratorium

Laboratorium Konstruksi (Bengkel) Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang merupakan salah satu sarana utama kegiatan praktikum mahasiswa dalam bidang rekayasa konstruksi. Laboratorium ini berfungsi sebagai tempat pelaksanaan berbagai kegiatan praktik komponen konstruksi yang meliputi praktikum baja, beton, kayu, acuan dan perancah, pekerjaan batu, serta plumbing. Kegiatan praktikum tersebut melibatkan penggunaan berbagai peralatan mekanik, bahan konstruksi, serta

aktivitas kerja fisik yang berisiko tinggi apabila tidak didukung oleh sistem keselamatan kerja yang baik. Selama ini, kegiatan praktikum di Laboratorium Konstruksi belum memiliki Standar Operasional Prosedur (SOP), tata tertib kerja, prosedur penanganan K3 (Keselamatan dan Kesehatan Kerja), rubrik penilaian praktikum, maupun formulir alat dan bahan baku yang bersifat baku dan terstandar.

Akibatnya, setiap dosen pengampu mata kuliah cenderung menerapkan aturan dan format kerja yang berbeda-beda sesuai kebutuhannya masing-masing. Kondisi tersebut menimbulkan persepsi yang beragam di kalangan mahasiswa, sehingga pelaksanaan praktikum menjadi kurang seragam, tidak efisien, dan kadang menimbulkan kebingungan dalam menjalankan instruksi kerja. Ketidadaan SOP dan panduan keselamatan yang baku juga berdampak pada meningkatnya potensi risiko kecelakaan kerja di lingkungan laboratorium. Beberapa kejadian kecil seperti luka ringan, alat rusak, serta ketidaktertiban penggunaan APD (Alat Pelindung Diri) pernah terjadi selama kegiatan praktikum berlangsung (Mual & Hukom, 2025). Hal ini tentu berpotensi membahayakan keselamatan mahasiswa, dosen pengampu, maupun Pranata Laboratorium Pendidikan (PLP) yang terlibat langsung dalam kegiatan belajar mengajar di laboratorium.

Identifikasi Permasalahan

Berikut adalah hasil identifikasi masalah pada laboratorium konstruksi (bengkel) Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang berdasarkan hasil observasi langsung dan wawancara dengan dosen, kepala laboratorium, dan Pranata Laboratorium Pendidikan.

Tabel 2. Identifikasi Masalah

Aspek	Kondisi Awal
SOP	Tidak ada
Tata tertib	Tidak ada
Formulir alat dan bahan	Ada, tetapi belum jelas
Penanganan K3	Tidak ada
Rubrik penilaian	Tidak ada
Briefing keselamatan	Ada, tetapi tidak terstandar
Pengawasan PLP	Sudah dilakukan, perlu penguatan prosedur

Dari permasalahan di atas ditemukan adanya akibat yang terjadi yaitu:

1. Variasi prosedur pelaksanaan praktikum antar kelas.
2. Disiplin APD yang belum merata.
3. Risiko kerja masih tinggi (debu, alat potong, beton basah, serpihan baja, potongan kayu dan besi)
4. Penanganan K3 masih belum sesuai.

Dari Tabel 2 di atas, dapat dilihat bahwa masalah terbesar adalah tidak adanya pedoman prosedur pasti yang bisa dipakai sebagai acuan baik langkah-langkah dalam melakukan praktikum, tata tertib, penanganan K3, formulir alat dan bahan dalam melakukan kegiatan praktikum oleh mahasiswa, dosen, dan PLP. Dari indentifikasi kondisi awal dibuat lagi identifikasi risiko yang mungkin terjadi karena adanya masalah-masalah tersebut (Vionita et al., 2024). Identifikasi risiko dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Identifikasi Risiko

Potensi bahaya	Risiko	Tingkat Risiko	Pengendalian
Mesin potong kayu & baja	Luka potong	Tinggi	SOP + APD wajib + <i>training</i> alat
Alat pengelasan	Luka bakar	Tinggi	SOP + APD wajib + <i>training</i> alat
Serpihan material, api dan kayu	Cedera mata	Sedang	Kacamata <i>safety</i>
Debu semen/pasir	Iritasi pernapasan	Sedang	Masker + ventilasi
Pengangkatan material	Cedera otot	Sedang	Teknik <i>lifting</i> & alat bantu
Area licin beton basah	Terpeleset	Sedang	Pembersihan & <i>signage</i>

Rekomendasi Solusi

Dari permasalahan yang terjadi terkait tidak adanya SOP praktikum, tata tertib, penanganan K3, rubrik penilaian, maka ada beberapa alternatif solusi yang bisa dilakukan yaitu (Teknik et al., n.d.):

1. Pembuatan buku saku elektronik SOP praktek di laboratorium konstruksi
2. Sistem rotasi *safety officer* mahasiswa
3. Penandaan area bahaya dan jalur evakuasi
4. *Reward* & Penegakan Disiplin

Dari beberapa alternatif solusi yang diberikan, rekomendasi solusi terbaik yang bisa dilakukan untuk mengatasi permasalahan terkait pengaturan kegiatan praktikum di laboratorium konstruksi adalah dengan merangkum semua permasalahan dan membuat solusi dalam satu panduan yang jelas dan terarah yaitu membuat SOP praktikum yang dapat dipakai sebagai acuan jelas oleh dosen, PLP, mahasiswa dan semua yang menggunakan fasilitas dan beraktivitas di laboratorium konstruksi. SOP disusun dan dibuat menarik serta gampang untuk dipakai dengan cara di buat menjadi buku saku elektronik SOP praktikum di laboratorium konstruksi yang mencakup tahapan praktikum, tata tertib, penanganan K3, rubrik penilaian, dan kebutuhan alat dan bahan untuk menunjang kenyamanan dan keselamatan pada saat melakukan praktek di laboratorium.

Tahapan pembuatan buku saku elektronik SOP yaitu, setelah melakukan observasi, wawancara, studi literatur, kemudian menganalisis permasalahan, risiko dan pengendalian di laboratorium konstruksi, maka dapat disusun SOP terkait tata cara praktikum, tata tertib, penanganan K3, formulir alat dan bahan, dan rubrik penilaian. Semua komponen tersebut dibuat menjadi buku saku elektronik agar mudah untuk diakses dengan menggunakan *QR Code*.

Pelaksanaan implementasi dilakukan setelah dokumen SOP dan seluruh form pendukung (form insiden, poster) selesai disusun dan divalidasi oleh ketua jurusan, kepala laboratorium, dosen mata kuliah dan PLP. Implementasi SOP praktikum ini juga membawa dampak positif terhadap budaya kerja dan profesionalisme mahasiswa. Mahasiswa menjadi lebih sadar terhadap pentingnya keselamatan kerja, lebih tertib dalam penggunaan alat, dan mampu mengidentifikasi bahaya

potensial secara mandiri. Teknisi laboratorium menyatakan bahwa kegiatan praktikum berjalan lebih efisien dan aman, karena adanya pedoman yang jelas dan terstandar.

Setelah tahapan implementasi menunjukkan hasil positif, evaluasi dilakukan untuk menyempurnakan sistem dan menghasilkan buku saku elektronik SOP Laboratorium Konstruksi Teknik Sipil, yang siap digunakan sebagai panduan digital dalam kegiatan praktikum secara aman dan profesional. Dari hasil implementasi ini dilakukan evaluasi akhir dan merampungkan *QR Code* yang akan diberikan dan dipakai sebagai pedoman praktikum di laboratorium konstruksi jurusan teknik sipil kepada seluruh pengguna laboratorium ini. Berikut adalah *QR Code* SOP praktikum di laboratorium konstruksi Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang.



Gambar 3. QR Buku Saku Elektronik SOP Praktikum Laboratorium Konstruksi

Kesimpulan

SOP praktikum di Laboratorium Konstruksi yang dibuat dalam bentuk buku saku elektronik, dilengkapi dengan dokumen pendukung berupa tata tertib praktikum, prosedur penanganan K3, rubrik penilaian, serta formulir kebutuhan alat dan bahan, telah memberikan kemudahan dalam akses, implementasi, pengawasan, dan dokumentasi kegiatan praktikum di lingkungan laboratorium konstruksi (bengkel) jurusan teknik sipil.

Melalui sistem ini, seluruh pengguna laboratorium, baik mahasiswa, dosen, maupun Pranata Laboratorium Pendidikan (PLP), dapat dengan mudah memperoleh informasi terkait prosedur kerja, standar keselamatan, serta tata tertib pelaksanaan praktikum secara cepat dan seragam. Penerapan SOP dalam bentuk buku saku elektronik ini juga berdampak positif terhadap peningkatan kenyamanan, keamanan, dan efisiensi pelaksanaan praktikum.

Mahasiswa menjadi lebih sadar terhadap pentingnya penggunaan alat pelindung diri (APD), dosen lebih mudah melakukan pengawasan dan evaluasi kegiatan, sedangkan teknisi laboratorium memiliki pedoman kerja yang lebih sistematis. Dengan demikian, sistem ini berhasil menciptakan lingkungan kerja yang **lebih aman, tertib, dan profesional**, sesuai dengan prinsip keinsinyuran dan penerapan **Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)** di bidang pendidikan teknik sipil.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih ditujukan kepada:

1. Politeknik Negeri Kupang
2. Laboratorium Konstruksi Jurusan Teknik Sipil, PNK
3. Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

Referensi

- Hailing, Y., Xuehu, X., Huimin, Z., City, T., & City, T. (2023). Construction and practice of safety management system in university laboratories. *Advances in Higher Education*, 5, 97–104.
<https://doi.org/10.23977/aduhe.2023.051913>
- Indonesia, R. (1970). *Undang-undang tentang keselamatan kerja*.
- Khayyirah, A. N., Haqim, A. F., Azzahra, A. N., & Putri, A. (2024). Penerapan metode HIRADC untuk evaluasi risiko kecelakaan kerja: Studi kasus.
- Mual, B. C., & Hukom, F. S. (2025). Implementasi K3 di laboratorium aspal teknik sipil Politeknik Negeri Ambon. *Jurnal Teknik*, 5, 5220–5232.
- Rekayasa sipil. (n.d.). Dalam *Wikipedia bahasa Indonesia, ensiklopedia bebas*.
- Teknik, J., Politeknik, S., & Manado, N. (n.d.). Pada laboratorium konstruksi sipil. *Jurnal Berdaya Mandiri*, 144–153.
- Vionita, Y. S., Uda, S. A. K. A., & Puspasari, V. H. (2024). Analisis risiko keselamatan dan kesehatan kerja pada laboratorium teknik sipil Fakultas Teknik Universitas Palangka Raya. *Jurnal Teknik Sipil*, 9(3), 10096–10105.
- Yani, A. (2025). Efektivitas pelatihan keselamatan kerja di konstruksi dan peran manajemen dalam meningkatkan kepatuhan K3: Literatur review. *Jurnal K3*, 3(1), 8–17.
- Zhang, Y., Mao, P., Li, H., Xu, Y., You, D., Liu, H., & Huang, W. (n.d.). Assessing the safety risks of civil engineering laboratories based on lab criticality index: A case study in Jiangsu Province.



Evaluasi Program *Safety Talk* Sebagai Upaya Peningkatan Budaya K3 di Lingkungan Kerja KIP (Kapal Isap Produksi)

Rahmat Maulid¹ Julius Mulyono² Andrew Joewono³

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ rahmatmaulid727@gmail.com

Pendahuluan

Keselamatan dan kesehatan kerja (K3) merupakan aspek penting yang harus diterapkan secara konsisten di lingkungan kerja, termasuk pada kegiatan operasional Kapal Isap Produksi (KIP) yang memiliki tingkat risiko tinggi. Aktivitas di KIP melibatkan penggunaan peralatan berat, kondisi kerja di laut, serta paparan bahaya fisik maupun lingkungan yang dapat menimbulkan kecelakaan kerja jika tidak dikelola dengan baik. Pada tahun 2025 ini terdapat 5 insiden yang terjadi di kapal isap produksi seperti terjepitnya tangan pada saat melakukan pemindahan barang, dan terjadinya *property damage*.

Salah satu upaya perusahaan dalam menumbuhkan kesadaran dan kepedulian pekerja terhadap K3 adalah melalui program *Safety Talk*, yaitu kegiatan komunikasi singkat yang dilakukan secara rutin sebelum memulai pekerjaan. *Safety Talk* bertujuan untuk mengingatkan pekerja mengenai potensi bahaya, prosedur kerja aman, serta mendorong keterlibatan aktif dalam penerapan budaya keselamatan. Namun, efektivitas pelaksanaan *Safety Talk* perlu dievaluasi untuk memastikan bahwa pesan yang disampaikan benar-benar dipahami dan diimplementasikan oleh pekerja. Evaluasi ini penting agar program tidak hanya menjadi formalitas, tetapi benar-benar berdampak terhadap peningkatan budaya K3 di lingkungan kerja KIP. Dengan demikian, studi kasus mengenai Evaluasi Program *Safety Talk* sebagai upaya peningkatan budaya K3 di lingkungan kerja KIP menjadi relevan untuk menilai keberhasilan penerapannya, mengidentifikasi kendala, serta memberikan rekomendasi perbaikan yang berkelanjutan.

Metode

Untuk metode yang dipakai adalah analisis deskriptif, analisis komparatif, atau analisis sebab akibat.

Keselamatan dan kesehatan kerja (K3) merupakan aspek penting yang harus diterapkan secara konsisten di lingkungan kerja, termasuk pada kegiatan operasional Kapal Isap Produksi (KIP) yang memiliki tingkat risiko tinggi. Salah satu upaya perusahaan dalam menumbuhkan kesadaran dan kepedulian pekerja terhadap K3 adalah melalui program *Safety Talk*, yaitu kegiatan komunikasi singkat yang dilakukan secara rutin sebelum memulai pekerjaan. *Safety Talk* bertujuan untuk mengingatkan pekerja mengenai potensi bahaya, prosedur kerja aman, serta mendorong keterlibatan aktif dalam penerapan budaya keselamatan. Namun, efektivitas pelaksanaan *Safety Talk* perlu dievaluasi untuk memastikan bahwa pesan yang disampaikan benar-benar dipahami dan diimplementasikan oleh pekerja. Evaluasi ini penting agar program tidak hanya menjadi formalitas, tetapi benar-benar berdampak terhadap peningkatan budaya K3 di lingkungan kerja KIP

Kata kunci: Budaya Keselamatan, Kesehatan, Keselamatan Kerja, Program *Safety Talk*, Kapal Isap Produksi

Hasil Kerja

Analisis Deskriptif 1

Dari hasil observasi, diketahui bahwa pelaksanaan *Safety Talk* dilakukan setiap pagi sebelum kerja dengan tingkat kehadiran 90%. Mayoritas pekerja menyatakan kegiatan tersebut membantu meningkatkan kesadaran terhadap bahaya kerja.

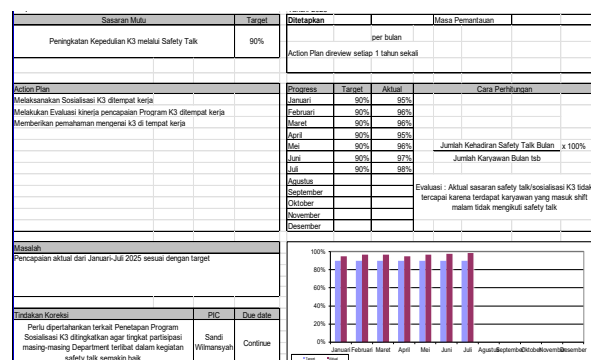
Analisis Komparatif 2

Setelah penerapan *Safety Talk* selama tiga bulan, angka ketidakhadiran dan *unsafe act* menurun 20% dibandingkan periode sebelumnya. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan disiplin dan kepedulian terhadap K3.berkaitan dengan profesi sebagai seorang insinyur.

Analisis Sebab-Akibat 3

Hasil wawancara menunjukkan bahwa peningkatan kesadaran K3 disebabkan oleh konsistensi pelaksanaan *Safety Talk* dan keterlibatan aktif *supervisor* dalam setiap sesi.

Analisis dan Pembahasan 4



Gambar 1. Peningkatan Kepedulian K3 Melalui *Safety Talk*

Dalam hal ini penerapan *safety talk* dapat berpengaruh dalam menjaga budaya yang aman dan sehat serta mengurangi tingkat risiko kecelakaan kerja.

Tabel 1. Penyebab Peningkatan Budaya K3 Belum Maksimal

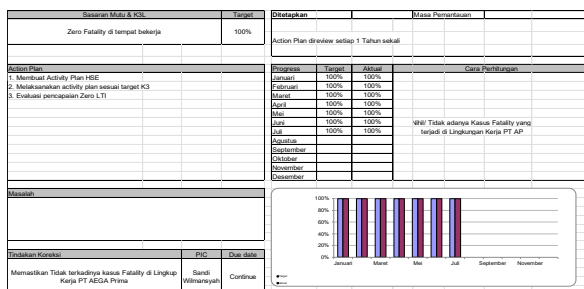
Faktor	Penyebab Utama
Manusia (People)	Kurangnya motivasi dan kesadaran pekerja terhadap pentingnya K3.
Metode (Method)	Materi <i>safety talk</i> monoton dan tidak disesuaikan dengan kondisi kerja.
Waktu (Time)	Jadwal <i>safety talk</i> terlalu singkat atau dilakukan pada saat pekerja sudah siap bekerja di lapangan.
Manajemen (Management)	Belum ada sistem evaluasi berkala dan monitoring hasil pelaksanaan <i>safety talk</i> .
Media (Material)	Kurangnya alat bantu visual atau media pendukung yang menarik (poster, video singkat, studi kasus).

Dalam hal ini faktor manusia, metode, waktu, manajemen dan media berpengaruh dalam meningkatkan budaya K3 karena kalau tidak adanya kepedulian dan dukungan budaya K3 hal ini akan berpengaruh di lingkungan kerja yang tidak sesuai dalam penerapan ataupun implementasi di lapangan.



Gambar 2. Pemberian *Safety Reward*

Hal ini bertujuan untuk memberikan dorongan dan semangat untuk para pekerja agar selalu meningkatkan budaya K3 yang sehat aman dan peka terhadap area pekerjaan.



Gambar 3. Zero Fatality

Dalam hal ini penerapan *safety talk* yang ada di KIP sangatlah efektif dalam 1 tahun terakhir tidak adanya kecelakaan kerja yang menyebabkan kematian atau *zero fatality*.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil evaluasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Pelaksanaan program *safety talk* di KIP sudah berjalan secara rutin, namun efektivitasnya masih perlu ditingkatkan karena masih ditemukan kurangnya partisipasi pekerja, materi yang kurang menarik, serta minimnya evaluasi setelah kegiatan.
2. Perbaikan program *safety talk* sangat penting untuk memperkuat budaya K3 di lingkungan kerja. Melalui penyampaian materi yang relevan, fasilitator yang kompeten, dan metode yang interaktif, kegiatan ini dapat menjadi sarana efektif dalam meningkatkan kesadaran dan kepedulian pekerja terhadap keselamatan kerja.
3. Keterlibatan aktif manajemen dan pekerja menjadi faktor kunci keberhasilan. Dengan dukungan manajemen, sistem evaluasi yang baik, serta penghargaan bagi pekerja yang berpartisipasi aktif, *safety talk* dapat berkembang menjadi budaya komunikasi keselamatan yang berkelanjutan.
4. Dengan penerapan rekomendasi perbaikan seperti peningkatan kompetensi fasilitator, penjadwalan yang konsisten, serta evaluasi dan tindak lanjut rutin, diharapkan budaya K3 di KIP akan meningkat dan tercapai kondisi kerja yang lebih aman, sehat, dan produktif menuju *zero accident*.

Ucapan Terimakasih

Puji dan syukur kehadiran Allah SWT, karena dengan rahmat dan karunia Allah, saya dapat menyelesaikan laporan studi kasus ini. Sholawat dan salam selalu turunkan kepada Nabi besar Muhammad SAW. Laporan studi kasus ini adalah untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan pada program studi program profesi insinyur. Penulis menyadari banyak kendala dalam menyelesaikan laporan ini, dan tidak mungkin dapat menyelesaikannya tanpa bantuan, bimbingan dan dorongan dari semua pemangku kepentingan. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih sedalam-dalamnya kepada:

1. Ibu dan kakak saya yang telah banyak memberikan do'a dan dukungan serta motivasi semangat untuk menyelesaikan laporan studi kasus ini.
2. Ir. Julius Mulyono, S.T., M.T., CIOMP., IPM., ASEAN Eng. selaku dosen pembimbing utama yang telah banyak memberikan masukan dan bimbingan tentang pelaksanaan laporan studi kasus ini.
3. Ir. Andrew Joewono, S.T., M.T., IPU., ASEAN Eng., APEC Eng. selaku dosen pengampu yang memberikan semangat dan masukan tentang pelaksanaan laporan studi kasus ini.
4. Dan, semua pihak yang telah memberikan bantuan dukungan moril dalam penyelesaian laporan studi kasus sebagai salah satu syarat kelulusan.

Penulis menyadari bahwa laporan studi kasus ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu kritik dan saran yang membangun dari pembaca sangat diharapkan untuk bersama-sama memajukan laporan studi kasus ini.



Referensi

- Bird, F. E., & Germain, G. L. (1974). *Practical loss control leadership*. Loganville, GA: Institute Press.
- Goetsch, D. L. (2015). *Occupational safety and health for technologists, engineers, and managers* (8th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.
- Heinrich, H. W. (1931). *Industrial accident prevention: A scientific approach*. New York, NY: McGraw-Hill.
- International Labour Organization, & World Health Organization. (1995). *Occupational health: A manual for primary health care workers*. Geneva, Switzerland: ILO/WHO.
- Nasrullah, M. (2014). *Keselamatan dan kesehatan kerja: Teori dan aplikasi di tempat kerja*. Yogyakarta, Indonesia: Deepublish.
- Ramli, S. (2010). *Sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja (OHSAS 18001)*. Jakarta, Indonesia: PT Dian Rakyat.
- Ramli, S. (2013). *Sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja OHSAS 18001*. Jakarta, Indonesia: Dian Rakyat.
- Schafer, J. L., & Kang, J. (2008). Average causal effects from nonrandomized studies: A practical guide and simulated example. *Psychological Methods*, 13, 379–313.
- Skenderian, J., Siegel, J. T., Crano, W. D., Alvaro, E. E., & Lac, A. (2008). Expectancy change and adolescents' intentions to use marijuana. *Psychology of Addictive Behaviors*, 22, 563–569.
- Suma'mur. (2009). *Keselamatan kerja dan pencegahan kecelakaan*. Jakarta, Indonesia: CV Haji Masagung.



Optimalisasi Peralatan Laboratorium Hidrolika untuk Meningkatkan Kualitas Pembelajaran Mahasiswa pada Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang

**Antonius L. Antjak^{1,2} Tarsisius Dwi Wibawa
Budianta¹**

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya
Mandala Surabaya ² Politeknik Negeri Kupang

✉ ronaldantjak11@gmail.com

Laboratorium hidrolika memiliki peran penting dalam pendidikan vokasi teknik sipil sebagai sarana menghubungkan teori dan praktik. Namun, di Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang, sejumlah peralatan laboratorium yang diadakan sejak tahun 2015 tidak termanfaatkan secara optimal. Kondisi ini menurunkan kualitas pembelajaran dan menghambat capaian kompetensi mahasiswa. Penelitian ini merupakan studi kasus keinsinyuran dengan pendekatan observasi, inventarisasi peralatan, perbaikan teknis, penyusunan modul praktikum, dan sosialisasi hasil optimalisasi. Hasil menunjukkan bahwa peralatan dapat difungsikan kembali setelah dilakukan perbaikan sederhana seperti penggantian selang, pembersihan drat, dan kalibrasi alat. Modul praktikum baru disusun dan disahkan oleh jurusan untuk digunakan dalam pembelajaran. Optimalisasi laboratorium meningkatkan variasi percobaan mahasiswa dan mendukung pemanfaatan aset negara secara akuntabel. Kesimpulannya, optimalisasi laboratorium hidrolika berkontribusi terhadap peningkatan mutu pembelajaran vokasi dan mendukung visi Politeknik Negeri Kupang sebagai institusi vokasi unggul dan berdaya saing global.

Kata kunci: Laboratorium Hidrolika, Optimalisasi, Pembelajaran Vokasi, Keinsinyuran

Pendahuluan

Laboratorium merupakan elemen penting dalam pembelajaran bidang teknik sipil yang berfungsi sebagai sarana praktik untuk memahami teori fluida dan hidrolika (Triatmodjo, 2010; White, 2016). Namun sejak 2015, sebagian besar peralatan di Laboratorium Hidrolika Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang tidak berfungsi karena minimnya pemeliharaan dan tidak adanya modul praktikum yang relevan (Rahardjo, 2020). Kondisi ini mengakibatkan menurunnya kualitas pembelajaran dan terbatasnya pengalaman mahasiswa dalam praktik. Tujuan dari studi kasus ini adalah mengidentifikasi penyebab ketidakberfungsian alat, melakukan perbaikan dan pengoperasian kembali peralatan, menyusun modul baru, serta mengevaluasi dampak optimalisasi terhadap mutu pembelajaran.

Metode

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Hidrolika Politeknik Negeri Kupang selama November 2024. Metode yang digunakan meliputi observasi langsung, wawancara, perbaikan teknis, penyusunan modul praktikum, dan sosialisasi hasil. Pendekatan observasi digunakan untuk memperoleh gambaran faktual mengenai kondisi peralatan dan lingkungan kerja laboratorium sebagaimana disarankan dalam penelitian manajemen laboratorium oleh Andini & Wicaksono (2021). Analisis data dilakukan secara deskriptif komparatif dengan membandingkan kondisi sebelum dan sesudah kegiatan, mengikuti pedoman metodologi penelitian pendidikan teknik menurut Sugiyono (2019). Proses perbaikan mencakup penggantian komponen yang rusak, pembersihan bagian logam, serta kalibrasi alat agar sesuai dengan standar operasional

laboratorium hidrolika sebagaimana diuraikan oleh Chadwick, Morfett, & Borthwick (2013) dan White (2016). Modul baru disusun dengan mencantumkan dasar teori, langkah percobaan, analisis hasil, dan aspek keselamatan kerja.

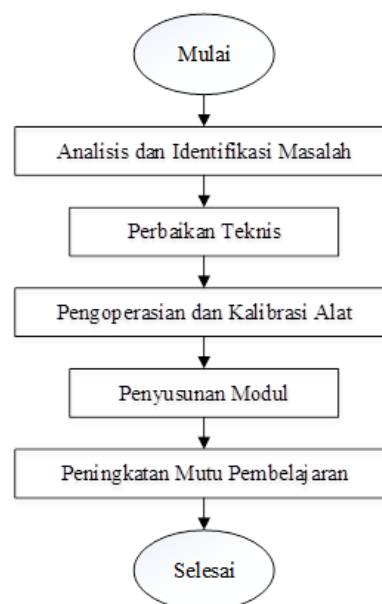
Identifikasi Isu dan Gagasan Solusi

Kerangka pemikiran dalam studi kasus ini disusun untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai alur logika pelaksanaan kegiatan optimalisasi peralatan Laboratorium Hidrolika. Kerangka pemikiran ini terdiri atas enam tahapan utama yang saling berkaitan secara sistematis sebagaimana digambarkan dalam bagan alur pemikiran (Gambar 1) dengan uraian penjelasan sebagai berikut:

- Mulai: Tahap awal kerangka berpikir dimulai dengan penetapan konteks dan tujuan studi kasus. Pada tahap ini dilakukan pengumpulan informasi dasar mengenai kondisi laboratorium, meliputi ketersediaan peralatan, fungsi laboratorium dalam pembelajaran, serta kendala umum yang dihadapi. Tahapan ini mengikuti prinsip perencanaan strategis keinsinyuran yang berorientasi pada pemetaan situasi awal organisasi sebagaimana dijelaskan oleh Ansoff (1980).
- Analisa dan Identifikasi Masalah: Tahapan ini berfungsi untuk mengenali dan memahami akar permasalahan yang terjadi di lingkungan Laboratorium Hidrolika sebelum menentukan bentuk intervensi atau tindakan perbaikan. Analisis dilakukan dengan mengumpulkan data melalui observasi, wawancara, dan telaah dokumen pendukung (Sugiyono, 2019). Kemudian dilakukan penilaian terhadap isu-isu yang muncul menggunakan pendekatan metode APKL (Aktual, Problematis, Khalayak, Layak) (Andini & Wicaksono,

- 2021) dan USG (*Urgency, Seriousness, Growth*) guna menentukan prioritas masalah yang layak untuk ditindaklanjuti (Widodo, 2020). Setelah itu, digunakan *Diagram Fishbone* (Ishikawa, 1985) untuk menelusuri kemungkinan penyebab dari berbagai aspek seperti manusia (*man*), metode (*method*), peralatan (*machine*), dan lingkungan (*environment*). Hasil dari tahapan ini berupa pemahaman yang komprehensif mengenai inti permasalahan dan faktor penyebabnya, yang menjadi dasar bagi tahap perencanaan tindakan berikutnya.
- c. Perbaikan Teknis : Tahapan ini masih berada pada tataran konseptual atau perencanaan. Berdasarkan hasil identifikasi masalah, dirancang rencana tindakan keinsinyuran yang bersifat teknis untuk mengembalikan fungsi peralatan laboratorium (Andini & Wicaksono, 2021). Langkah yang disiapkan antara lain:
- 1) Perencanaan kegiatan pemeriksaan kondisi alat dan inventarisasi peralatan yang tidak berfungsi.
 - 2) Penyusunan strategi perawatan dan perbaikan sederhana yang dapat dilakukan secara internal tanpa memerlukan anggaran besar (Goetsch & Davis, 2014).
 - 3) Perencanaan koordinasi dengan pihak laboratorium dan mentor untuk memastikan kesesuaian teknis pelaksanaan kegiatan (ISO 55000:2014).
- d. Pengoperasian dan Kalibrasi Alat (Tahap Uji Rencana): Pada tahap berpikir ini, direncanakan proses pengujian fungsi alat yang telah melalui perbaikan teknis. Fokusnya adalah menyiapkan skema pengoperasian dan kalibrasi yang sistematis agar seluruh proses nantinya berjalan sesuai prosedur keselamatan dan menghasilkan data yang valid (Chadwick, Morfett, & Borthwick, 2013; White, 2016). Tahapan ini juga mencakup penyusunan rencana pengumpulan data operasional dan penyiapan format pencatatan hasil uji coba (Gaspersz, 2012).
- e. Penyusunan Modul (Tahap Desain Akademik): Tahapan ini menggambarkan proses perencanaan pembuatan panduan pembelajaran yang akan mendukung kegiatan praktikum. Pada tahap berpikir ini disusun konsep struktur modul yang akan berisi teori dasar, tujuan eksperimen, prosedur kerja, dan metode analisis data sebagaimana disarankan oleh Sanjaya (2016) dan Wijaya, Nugroho, & Santoso (2022). Penyusunan rencana modul ini dimaksudkan agar kegiatan praktikum di laboratorium nantinya berjalan sistematis dan dapat digunakan sebagai instrumen pembelajaran yang terintegrasi dengan kurikulum teknik sipil (Sutrisno, Wahyudi, & Lestari, 2018). Fokus pada tahap ini adalah menyiapkan rancangan konten dan format modul yang akan dikembangkan setelah peralatan dapat difungsikan kembali.
- f. Peningkatan Mutu Pembelajaran (Tahap Konseptual Evaluatif): Tahapan terakhir dalam kerangka berpikir ini merupakan rancangan konseptual untuk menilai dampak kegiatan terhadap mutu pembelajaran serta kontribusinya terhadap capaian kinerja institusi. Pada tahap ini disusun indikator

pencapaian dan ukuran kinerja yang digunakan untuk menilai efektivitas kegiatan setelah diimplementasikan, meliputi peningkatan keterlibatan mahasiswa, efektivitas penggunaan alat, dan integrasi modul dalam proses perkuliahan. Kegiatan ini secara strategis dikaitkan dengan Indikator Kinerja Utama (IKU) ke-8 Politeknik Negeri Kupang, yaitu persentase mata kuliah S1 dan D4/D3 yang menggunakan metode pembelajaran pemecahan kasus (*case method*) atau pembelajaran kelompok berbasis proyek (*team-based project*) sebagai sebagian bobot evaluasi. Optimalisasi Laboratorium Hidrolika mendukung pencapaian IKU-08 karena hasilnya menjadi dasar penerapan metode pembelajaran berbasis proyek (*project-based learning*) pada mata kuliah Mekanika Fluida dan Hidrolika. Melalui penerapan modul baru yang memuat tahapan eksperimen dan analisis hasil praktikum, mahasiswa diarahkan untuk menyelesaikan permasalahan nyata di lapangan secara kolaboratif, sesuai prinsip pembelajaran berbasis proyek sebagaimana diuraikan oleh Wijaya, Nugroho, & Santoso (2022) dan Sutrisno, Wahyudi, & Lestari (2018).



Gambar 1. Bagan Alir Alur Pemikiran

Hasil Kerja

Identifikasi Isu dan Gagasan Solusi

Proses identifikasi isu dilakukan untuk menemukan permasalahan utama yang menghambat optimalisasi fungsi laboratorium hidrolika di Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang. Tahapan ini diawali dengan observasi langsung terhadap kondisi fisik laboratorium, dilanjutkan dengan diskusi kelompok terarah (FGD) bersama dosen pengampu, teknisi laboratorium, dan mahasiswa pengguna fasilitas. Melalui kegiatan ini diperoleh berbagai temuan terkait keterbatasan fungsi alat, rendahnya frekuensi praktikum, dan tidak adanya pedoman pembelajaran yang sesuai dengan alat yang tersedia. Untuk menilai isu-isu yang muncul, digunakan metode APKL (Aktual, Problematik, Khalayak, Layak).

Tabel 1 Analisa Isu dengan Metode APKL

No	Isu	Kriteria				Keterangan
		A	P	K	L	
1	Terdapat Peralatan Laboratorium yang sudah ada sejak tahun 2015 tetapi tidak digunakan	√	√	√	√	Memenuhi syarat
2	Belum optimalnya penggunaan panduan praktikum oleh mahasiswa	√	√	√	√	Memenuhi syarat
3	Kurangnya Dukungan Perangkat Lunak untuk Analisis Data	-	√	√	√	Tidak memenuhi syarat
4	Tidak adanya layanan internet khusus di Lab. Hidrolika	√	√	√	√	Memenuhi syarat

Berdasarkan analisis empat isu menggunakan metode APKL pada Laboratorium Hidrolika, diperoleh hasil bahwa satu isu, yaitu kurangnya dukungan perangkat lunak untuk analisis data, tidak memenuhi syarat, sedangkan tiga isu lainnya memenuhi. Untuk mempersempit hasil analisis menjadi satu isu utama dari tiga isu yang lolos seleksi APKL, dilakukan penilaian menggunakan metode USG (*Urgency, Seriousness, Growth*). Kriteria USG menilai tingkat urgensi, keseriusan, dan potensi pertumbuhan masalah jika tidak segera ditangani, dengan skala 1 (rendah) hingga 5 (tinggi). Hasil analisis USG disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Analisa Isu dengan Metode USG

NO	ISU	ANALISI USG			SKOR	PERINGKAT
		U	S	G		
1	Terdapat Peralatan Laboratorium yang sudah ada sejak tahun 2015 tetapi tidak digunakan	5	5	5	15	I
2	Belum optimalnya penggunaan panduan praktikum oleh mahasiswa	5	4	3	12	II
3	Tidak adanya layanan internet khusus di Lab. Hidrolika	4	4	4	12	III

Dari analisa USG terhadap isu-isu yang berkembang pada Unit Kerja Laboratorium Hidrolika ditemukan isu yang menjadi prioritas dengan skor 15, yakni terdapat beberapa peralatan laboratorium yang sudah ada sejak tahun 2015 tetapi tidak digunakan. Untuk mengatasi permasalahan tidak digunakannya beberapa peralatan di Laboratorium Hidrolika, diperlukan peningkatan kesadaran dan motivasi dalam memanfaatkan fasilitas secara optimal guna menunjang pembelajaran dan penelitian. Upaya ini sekaligus menunjukkan pengelolaan aset yang bertanggung jawab. Solusi yang diterapkan adalah kegiatan “Optimalisasi Peralatan Laboratorium Hidrolika untuk Meningkatkan Kualitas Pembelajaran Mahasiswa pada Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang.”

Realisasi Pelaksanaan Kegiatan

Pelaksanaan kegiatan Optimalisasi Peralatan Laboratorium Hidrolika dilakukan secara bertahap dan terencana di Laboratorium Hidrolika Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang selama periode November–Desember 2024. Tahapan kegiatan dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Inventarisasi dan Identifikasi Kondisi Alat

- Melakukan pemeriksaan fisik terhadap seluruh peralatan laboratorium.
 - Mendokumentasikan kondisi dan fungsi alat, serta mengelompokkan dalam kategori: berfungsi, rusak ringan, dan rusak berat.
 - Menentukan prioritas perbaikan berdasarkan urgensi dan manfaat terhadap kegiatan praktikum.
- Perbaikan Teknis dan Kalibrasi
 - Melakukan pembersihan bagian alat yang berkarat atau tersumbat.
 - Mengganti komponen rusak seperti selang, konektor, dan drat logam.
 - Melaksanakan kalibrasi ulang agar alat kembali akurat sesuai spesifikasi teknis.
 - Melakukan uji fungsi (*testing*) untuk memastikan alat siap digunakan.
 - Penyusunan dan Validasi Modul Praktikum Baru
 - Menyusun modul berdasarkan teori mekanika fluida seperti Hukum Bernoulli, Hukum Kontinuitas, dan Kehilangan Energi pada Pipa.
 - Modul mencakup teori dasar, prosedur percobaan, format pencatatan data, serta panduan analisis hasil.
 - Melaksanakan validasi modul melalui rapat jurusan yang melibatkan dosen pengampu dan PLP.
 - Sosialisasi dan Pelatihan Internal
 - Melakukan pelatihan singkat bagi dosen dan PLP terkait pengoperasian alat dan penggunaan modul baru.
 - Memberikan panduan pemeliharaan sederhana agar peralatan tetap berfungsi dalam jangka panjang.
 - Uji Coba Praktikum dan Evaluasi
 - Melaksanakan kegiatan praktikum dengan mahasiswa menggunakan alat dan modul hasil optimalisasi.
 - Melakukan evaluasi hasil kegiatan berdasarkan kelancaran percobaan, keakuratan data, dan umpan balik peserta.
 - Menyusun laporan hasil pelaksanaan untuk dokumentasi laboratorium.
 - Pemantapan dan Tindak Lanjut
 - Menetapkan jadwal pemeliharaan rutin dan pencatatan penggunaan alat.
 - Mengintegrasikan modul baru dalam kurikulum praktikum semester berikutnya.
 - Mendorong penggunaan laboratorium sebagai sarana penelitian terapan bagi dosen dan mahasiswa.

Rincian Capaian Kegiatan

Kegiatan optimalisasi peralatan Laboratorium Hidrolika menghasilkan sejumlah capaian nyata yang berdampak langsung terhadap peningkatan mutu pembelajaran dan efektivitas pengelolaan laboratorium. Capaian tersebut meliputi aspek teknis, akademik, dan kelembagaan yang dijabarkan sebagai berikut:

- Capaian Teknis
 - Sebanyak 12 dari 15 unit peralatan (80%) berhasil diperbaiki dan difungsikan kembali.

- b. Dilakukan kalibrasi dan uji fungsi untuk memastikan akurasi alat sesuai standar laboratorium teknik sipil.
- c. Tersusun dokumentasi inventaris alat yang diperbarui beserta kondisi terkini dan jadwal pemeliharaannya.
2. Capaian Akademik
 - a. Disusun modul praktikum baru yang memuat teori dasar, langkah percobaan, format data, dan analisis hasil.
 - b. Modul telah divalidasi oleh Jurusan Teknik Sipil dan digunakan dalam kegiatan praktikum semester berjalan.
 - c. Meningkatnya kemampuan mahasiswa dalam memahami hubungan antara teori hidrolika dan eksperimen nyata.
3. Capaian Manajerial dan Kelembagaan
 - a. Terselenggara pelatihan internal bagi dosen dan PLP mengenai pengoperasian serta perawatan alat.
 - b. Laboratorium mulai diarahkan untuk mendukung kegiatan penelitian terapan dan layanan uji sederhana bagi pihak eksternal.

Kesimpulan

Kegiatan Optimalisasi Peralatan Laboratorium Hidrolika di Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang telah berhasil meningkatkan fungsi laboratorium, mutu pembelajaran, dan efisiensi pengelolaan aset pendidikan. Berdasarkan seluruh tahapan kegiatan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Sebagian besar peralatan laboratorium yang tidak berfungsi sejak tahun 2015 telah dapat dioperasikan kembali melalui kegiatan perbaikan teknis, kalibrasi, dan pemeliharaan sederhana.
 2. Modul praktikum baru berhasil disusun dan divalidasi sesuai kebutuhan pembelajaran mekanika fluida, sehingga mahasiswa dapat memahami penerapan teori melalui eksperimen nyata.
 3. Kapasitas teknis dosen dan PLP meningkat setelah mengikuti pelatihan pengoperasian dan pemeliharaan alat, yang berdampak positif terhadap efektivitas kegiatan praktikum.
 4. Laboratorium Hidrolika kini siap mendukung kegiatan pembelajaran, penelitian terapan, dan pengabdian kepada masyarakat di bidang teknik sumber daya air.
 5. Kegiatan ini mencerminkan penerapan nyata prinsip keinsinyuran yang bertanggung jawab, efisien, dan berorientasi pada keberlanjutan aset pendidikan.
- Dengan terlaksananya kegiatan ini, Laboratorium Hidrolika menjadi contoh praktik baik dalam pengelolaan fasilitas pendidikan vokasi yang efektif dan relevan dengan kebutuhan industri serta pengembangan kompetensi mahasiswa teknik sipil.

Ucapan Terimakasih

Dalam penyelesaian artikel ini, penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Ir. Tarsisius Dwi Wibawa Budianta, S.T., M.T., IPM., selaku Dosen Pembimbing.

2. Semua pihak yang sudah berpartisipasi dalam penulisan artikel ini.

Referensi

- Andini, R., & Wicaksono, B. (2021). Penerapan manajemen laboratorium berbasis ISO 17025 pada laboratorium teknik sipil. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 17(2), 155–164.
- Ansoff, H. I. (1980). Strategic issue management. *Strategic Management Journal*, 1(2), 131–148.
- Badan Keinsinyuran Indonesia. (2020). *Kode etik insinyur Indonesia*. Jakarta, Indonesia: Persatuan Insinyur Indonesia.
- Badan Nasional Sertifikasi Profesi. (2022). Standar kompetensi kerja nasional Indonesia (SKKNI) bidang keinsinyuran. Jakarta, Indonesia: Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia.
- Chadwick, A., Morfett, J., & Borthwick, M. (2013). *Hydraulics in civil and environmental engineering* (5th ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Gaspersz, V. (2012). *Total quality management*. Jakarta, Indonesia: Gramedia Pustaka Utama.
- Goetsch, D. L., & Davis, S. B. (2014). *Quality management for organizational excellence: Introduction to total quality* (7th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.
- International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55000:2014 asset management—Overview, principles, and terminology*.
- Ishikawa, K. (1985). *What is total quality control? The Japanese way*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Putra, A. R., & Hartono, S. (2019). Strategi manajemen aset laboratorium teknik sipil dalam peningkatan efektivitas pemanfaatan peralatan. *Jurnal Infrastruktur*, 8(1), 45–56.
- Rahardjo, A. (2020). Optimalisasi peralatan laboratorium hidrolika untuk mendukung pembelajaran berbasis praktik. *Jurnal Pendidikan Teknik Sipil*, 12(1), 21–30.
- Robbins, S. P., & Coulter, M. (2012). *Management* (11th ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Sanjaya, W. (2016). *Strategi pembelajaran berorientasi standar proses pendidikan*. Jakarta, Indonesia: Kencana Prenada Media Group.
- Schafer, J. L., & Kang, J. (2008). Average causal effects from nonrandomized studies: A practical guide and simulated example. *Psychological Methods*, 13(4), 379–313.
- Skenderian, J., Siegel, J. T., Crano, W. D., Alvaro, E. E., & Lac, A. (2008). Expectancy change and adolescents' intentions to use marijuana. *Psychology of Addictive Behaviors*, 22(4), 563–569.
- Sugiyono. (2019). *Metode penelitian pendidikan: Pendekatan kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Bandung, Indonesia: Alfabeta.
- Sutrisno, H., Wahyudi, T., & Lestari, R. (2018). Pemanfaatan laboratorium hidrolika dalam pembelajaran berbasis kompetensi di perguruan tinggi vokasi. *Jurnal Pendidikan Vokasi*, 8(2), 112–121.
- Triatmodjo, B. (2010). *Hidraulika I*. Yogyakarta, Indonesia: Beta Offset.
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2014 tentang keinsinyuran. (2014). *Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2014 Nomor 92*.



- White, F. M. (2016). *Fluid mechanics* (8th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Widodo, S. (2020). Metode USG dalam penetapan prioritas isu organisasi publik. *Jurnal Administrasi Publik*, 14(1), 55–63.
- Wijaya, R., Nugroho, A., & Santoso, H. (2022). Pengembangan modul praktikum berbasis project-based learning pada laboratorium hidrolika. *Jurnal Pendidikan Teknik Sipil*, 14(1), 44–53.

Pengaruh Penggunaan Hipoklorit Konsentrasi 5% pada Alat Hematologi Dymind DH-76 yang Sering Muncul Error Tersumbat/Clog di RS. POLRI Kramat Jati

Fransiskus Xaverius Arifinus¹ Hartono
Pranjoto¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ andrew_sby@ukwms.ac.id

Pendahuluan

Pemeriksaan darah lengkap menggunakan alat hematologi otomatis merupakan prosedur esensial yang menjadi tulang punggung operasional di hampir semua laboratorium klinis. Kecepatan dan keakuratan alat seperti Dymind DH-76 di RS. Polri Kramat Jati sangatlah krusial. Evaluasi teknis alat sejenis menunjukkan bahwa keandalannya sangat tergantung pada pemeliharaan rutin dan kualitas sampel (Velizarova et al., 2021).

Meskipun canggih, alat hematologi sangat rentan terhadap *error*, di mana sebagian besar kegagalan sistem sering kali dapat ditelusuri kembali ke fase pra-analitik. Masalah spesifik yang teridentifikasi secara kronis di RS. Polri Kramat Jati adalah *error* "WBC Clog" (penyumbatan pada jalur hitung leukosit) yang terjadi berulang kali. Data *logbook* alat selama periode Pra-Intervensi mengkonfirmasi adanya 8 insiden *clog* yang tercatat, yang terdiri dari 6 kali "WBC Clog" dan 2 kali "RBC Clog". Frekuensi kejadian yang tinggi dan berulang ini secara langsung mengganggu alur kerja dan menuntut intervensi teknis yang cepat.

Korelasi kuat ditemukan antara insiden *clog* dengan jam puncak pelayanan (pukul 10.00 hingga 12.00 siang), di mana volume sampel mencapai 200 hingga 300 sampel. Tingginya *throughput* sampel dalam waktu singkat meningkatkan kemungkinan masuknya *micro-clots* atau gumpalan fibrin ke dalam sistem hidrolik. Sumbatan ini, yang pada dasarnya merupakan agregasi

Studi kasus ini menganalisis permasalahan operasional kritis berupa tingginya frekuensi *error* "WBC Clog" (penyumbatan pada jalur hitung leukosit) yang terjadi secara kronis pada alat hematologi otomatis Dymind DH-76 di Laboratorium RS. Polri Kramat Jati. Periode awal observasi mencatat total 8 insiden *clog* (6 WBC Clog dan 2 RBC Clog), yang berkorelasi kuat dengan beban kerja puncak tinggi (200-300 sampel) antara pukul 10.00-12.00. Akumulasi sisa protein dan *micro-clots* pada jalur hidrolik pemicu sumbatan diperparah oleh *error* pendukung reagen (*lyse* dan *diluent*), yang menghambat proses *flushing* standar. Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas penerapan *Standard Operating Procedure* (SOP) pembersihan preventif harian menggunakan larutan Natrium Hipoklorit (NaOCl) Konsentrasi 5% (Ali, 2010; Fukuzaki, 2006). Intervensi dilakukan rutin satu kali per hari setelah jam puncak. Hasil kuantitatif pasca-intervensi menunjukkan efektivitas mencapai 87,5%, dengan penurunan insiden *clog* dari 8 menjadi hanya 1 kejadian terisolasi. Konsentrasi Konsentrasi 5% terkonfirmasi optimal dan efektif melarutkan sumbatan organik namun aman bagi komponen alat asalkan prosedur pembilasan tuntas (*flushing* 3 kali) ditaati. Rekomendasi utama adalah formalisasi SOP pembersihan preventif harian untuk menjaga keandalan dan efisiensi sistem.

Kata kunci: Hematologi otomatis, Dymind DH-76, *Clog* (Penyumbatan), WBC *Clog*, Hipoklorit Konsentrasi 5%, perawatan preventif, kehidupan sehat dan sejahtera, pekerjaan layak dan pertumbuhan ekonomi, berkurangnya kesenjangan

sisa protein terdenaturasi atau *microclots* amiloid-fibrinogen (Schofield et al., 2024), akan mengendap pada mikropori jalur hitung (Gandasoebrata, 2010; Kiswari, 2014).

Masalah ini diperburuk oleh kegagalan sistem pembersihan internal. *Error* tambahan seperti "larutan *lyse* kadaluarsa/tidak cukup" atau "*error diluent*" yang juga sering muncul, mengindikasikan bahwa proses *flushing* otomatis bawaan alat terhambat. Jika reagen *lyse* gagal melisiskan sel darah merah dan protein dengan sempurna, residu organik akan menumpuk dan mengeras di jalur alat. Penelitian telah menekankan bahwa kesalahan di fase pra-analitik, seperti bekuan darah yang tidak terdeteksi, adalah ancaman serius bagi efisiensi laboratorium (Garira, 2025; Iqbal et al., 2023).

Kegagalan sistem pembersihan standar alat dalam mengatasi akumulasi residu kronis ini menuntut intervensi pembersihan kimia yang lebih kuat dan efektif. Natrium Hipoklorit (NaOCl) dikenal luas dalam ilmu kimia dan medis sebagai agen oksidator kuat dan disinfektan. NaOCl telah diakui karena "aksi pembersihan yang sangat baik" dan kemampuannya untuk mendegradasi protein dan material organik, menjadikannya ideal untuk melarutkan sumbatan berbasis protein dan fibrin (Ali, 2010; Fukuzaki, 2006). Bahkan, penelitian menunjukkan bahwa NaOCl mampu mempengaruhi struktur fibrin pada bekuan darah, mendukung potensinya sebagai agen pembersih sumbatan di jalur alat (Gulati et al., 2022).

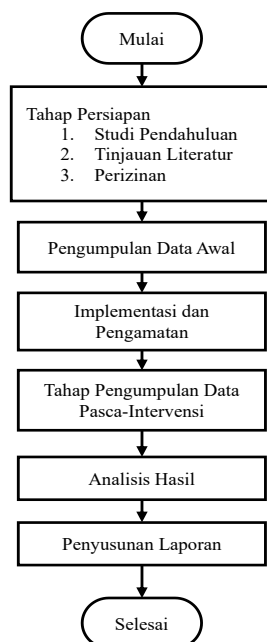
Dalam konteks ini, studi kasus ini memiliki tujuan berikut:

1. Menganalisis secara kuantitatif efektivitas penerapan SOP pembersihan preventif harian menggunakan larutan NaOCl Konsentrasi 5% untuk mengurangi frekuensi *error* "WBC Clog" pada alat Dymind DH-76 di bawah beban operasional tinggi.
2. Mengevaluasi keseimbangan optimal antara efektivitas pelarutan NaOCl dan risiko korosifnya, sehingga dapat merumuskan prosedur pemeliharaan yang aman dan berkelanjutan sesuai prinsip keinsinyuran profesional.
3. Dengan berkurangnya *error* hal ini menyebabkan waktu pemeriksaan alat yang berdampak pada kehidupan sehat dan sejahtera, pekerjaan layak dan pertumbuhan ekonomi, serta berkurangnya kesenjangan.

Pilihan konsentrasi 5% (sebagai titik kompromi yang efektif dan relatif aman, asalkan dibilas tuntas) dan standarisasi prosedur ini adalah inti dari solusi keinsinyuran terapan yang bertujuan meningkatkan keandalan sistem kritis di lingkungan klinis.

Metode

Studi kasus ini dilaksanakan di Laboratorium Hematologi Rumah Sakit Polri Kramat Jati, Jakarta Timur, dari periode Pra-Intervensi (September 2025) hingga Pasca-Intervensi (Oktober 2025). Objek studi difokuskan pada satu unit alat hematologi otomatis Dymind DH-76.



Gambar 1. Tahap Penelitian

Prosedur Pengumpulan Data:

Pengumpulan data menggunakan pendekatan multi-metode:

1. Observasi Langsung dan Pencatatan *Logbook*: Pengamatan operasional alat Dymind DH-76 dilakukan selama jam sibuk (10.00-12.00). Data *log error* dicatat secara sistematis, mencakup waktu, tanggal, dan jenis *error* spesifik ("WBC Clog").

2. Intervensi Prosedural: Tindakan yang dikaji adalah penerapan pembersihan preventif harian menggunakan larutan Natrium Hipoklorit (NaOCl) Konsentrasi 5% (1 bagian NaOCl komersial: 9 bagian air/*diluent*). Prosedur ini dilakukan satu kali per hari, segera setelah jam puncak pelayanan berakhir (sekitar pukul 13.00).
3. Prosedur Kritis: Prosedur ini mengharuskan pelaksanaan siklus pembersihan menggunakan hipoklorit konsentrasi 5% diikuti pembilasan tuntas (*flushing*) minimal 3 siklus menggunakan aquadest atau *diluent* standar alat. Langkah ini mutlak diperlukan untuk menetralkan sisa hipoklorit yang bersifat korosif.
4. Wawancara Teknis: Wawancara semi-terstruktur dilakukan dengan analis dan teknisi laboratorium untuk menilai kendala praktis, kelebihan, dan keamanan prosedur baru.

Metode Analisis:

Data dianalisis secara kuantitatif dan kualitatif. Efektivitas solusi diukur dengan rumus:

$$\text{Efektivitas} = \frac{(\text{jumlah clog sebelum} - \text{jumlah clog sesudah})}{\text{jumlah clog sebelum}} \times 100$$

Hasil Kerja

Analisis Permasalahan dan Dampak Operasional

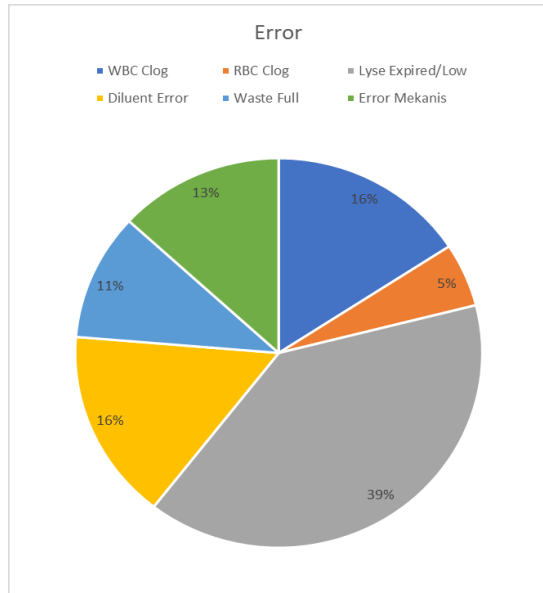
Pada fase *baseline* (Pra-Intervensi), total terdapat 8 insiden *clog* yang tercatat dalam periode singkat, terdiri dari 6 "WBC Clog" dan 2 "RBC Clog". Frekuensi yang tinggi ini, khususnya *WBC Clog*, menunjukkan masalah sistemik yang mendalam. Masalah ini tidak semata-mata diakibatkan oleh bekuan kasar (*macro-clot*) melainkan oleh akumulasi *micro-clots* dan protein terdenaturasi yang merupakan residu dari volume sampel yang sangat besar yang diproses selama jam puncak (10.00-12.00).

Selain *clog* utama, *logbook* alat menunjukkan adanya *error* pendukung yang sering muncul, seperti "larutan *lyse* kadaluarsa/tidak cukup" (>15 kali kejadian) dan "*error diluent*" (6 kali kejadian). Kualitas dan ketersediaan reagen yang buruk ini secara langsung mengganggu efektivitas *flushing* otomatis bawaan alat. Dalam kondisi normal, reagen *lyse* bertugas melisiskan sel darah merah dan menghancurkan protein. Jika reagen ini bermasalah, sisa-sisa organik akan menempel di jalur hitung yang sangat kecil (*aperture*), yang kemudian dipercepat oleh beban kerja tinggi, yang mana hal ini selaras dengan temuan Iqbal et al. (2023) mengenai pentingnya kontrol fase pra-analitik. Kegagalan *flushing* otomatis menciptakan kondisi ideal untuk pembentukan sumbatan yang semakin mengeras dari waktu ke waktu.

Tabel 1. Rekapitan data *error* Awal

Jenis Error	Frekuensi Kejadian	Detail Catatan
		(Berdasarkan Data Log Error)
WBC Clog	6	08/09, 16/09, 01/10, 03/10, 05/10, 07/10 (dini hari)
RBC Clog	2	17/09, 20/09

Lyse Expired/Low	15	Berulang sepanjang periode
Diluent Error	6	18/09, 19/09, 20/09, 09/10
Waste Full	4	15/09, 09/10
Error Mekanis	5	16/09, 18/09



Gambar 2. Grafik Data *Error* Sebelum intervensi

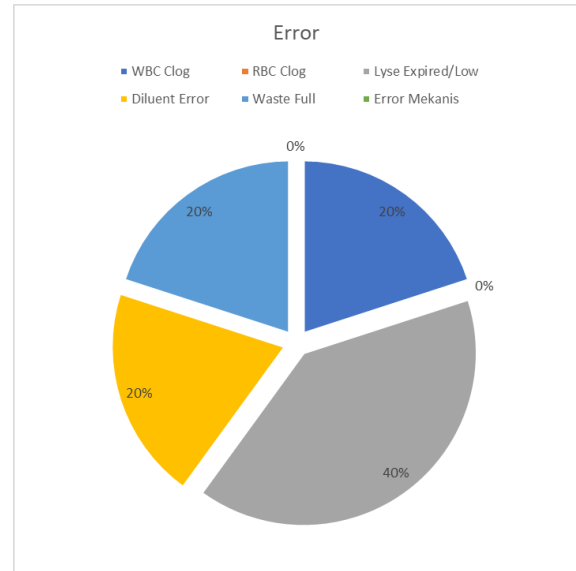
Dampak operasional dari masalah ini signifikan, yaitu setiap *clog* menyebabkan waktu henti (*downtime*) alat selama 5–10 menit per insiden. Keterlambatan ini menyebabkan beban kerja teknisi meningkat, produktivitas menurun, dan memengaruhi kualitas pelayanan pasien.

Efektivitas Penggunaan Hipoklorit Konsentrasi 5% dan Keandalan Sistem

Penerapan prosedur pembersihan preventif harian menggunakan NaOCl Konsentrasi 5% berhasil menanggulangi akar masalah. NaOCl adalah agen oksidatif kuat (Ali, 2010) yang secara kimiawi bekerja melarutkan material organik, protein, dan biofilm yang menempel di jalur alat.

Tabel 2 Rekap Data *Error* Setelah intervensi

Jenis Error	Frekuensi Kejadian	Detail Catatan (Berdasarkan Data Log Error)
WBC Clog	1	07/10
RBC Clog	0	Tidak ada error
Lyse Expired/Low	2	Berulang sepanjang periode
Diluent Error	1	18/09, 19/09, 20/09, 09/10
Waste Full	1	15/09, 09/10
Error Mekanis	0	16/09, 18/09



Gambar 3. Grafik Data *Error* Setelah intervensi

Tabel 3 Rekap data error Setelah intervensi

Parameter	Kondisi Awal (Sebelum Intervensi)	Kondisi (Setelah Intervensi)
Periode Observasi	~17 hari (06 Sep - 05 Okt 2025)	~30 hari (06 Okt - 15 Okt 2025)
Total Kejadian "WBC Clog"	6 Kejadian	1 Kejadian
Total Kejadian "RBC Clog"	2 Kejadian	0 Kejadian
Total Error Clog	8 Kejadian	1 Kejadian
Rata-rata Kejadian Tingkat Efektivitas Solusi	~0.41 clog / hari	~0.03 clog / hari
	-	87.5%

Intervensi pembersihan preventif harian menggunakan Natrium Hipoklorit (NaOCl) Konsentrasi 5% berhasil memutus siklus kegagalan ini. NaOCl adalah agen oksidatif kuat yang mampu mendegradasi protein, melisiskan sel, dan menghancurkan *micro-clots* secara kimiawi (Ali, 2010). Konsentrasi Konsentrasi 5% yang digunakan telah diuji coba untuk mencapai keseimbangan antara efektivitas pelarutan material organik dan minimalisasi risiko korosi. Hasil Kuantitatif Pasca-Intervensi:

1. Penurunan *Error Clog*: Jumlah total insiden *clog* turun dari 8 kejadian (*Baseline*) menjadi hanya 1 kejadian (Pasca-Intervensi).
2. Eliminasi WBC *Clog*: *Error* spesifik WBC *Clog* yang menjadi masalah kronis (6 kejadian) berhasil ditekan hingga hanya 1 kejadian terisolasi, yang mengindikasikan bahwa sebagian besar sumbatan protein/fibrin telah berhasil dilarutkan.
3. Eliminasi RBC *Clog*: *Error* RBC *Clog* (2 kejadian) berhasil dihilangkan sepenuhnya (0 kejadian).

Perhitungan efektivitas secara komprehensif adalah:

$$\text{Efektivitas} = \frac{(8 - 1)}{8} \times 100 \approx 87.5\%$$

Efektivitas sebesar 87,5% secara empiris memvalidasi bahwa NaOCl Konsentrasi 5% adalah solusi kimia yang tepat. Mekanisme kimia NaOCl telah diteliti memiliki pengaruh terhadap struktur fibrin pada bekuan darah, memungkinkannya melarutkan gumpalan (Gulati et al., 2022). Selain itu, Romdonah et al. (2017) juga menunjukkan bahwa NaOCl memiliki kemampuan untuk bereaksi dengan komponen darah. Dengan menjalankan prosedur preventif harian, residu organik yang menempel di jalur hitung dapat dilarutkan sebelum sempat mengeras menjadi sumbatan permanen, sebuah langkah yang sangat krusial dalam memelihara keandalan alat hematologi (Velizarova et al., 2021).

Urgensi Insinyur dan Standardisasi Prosedur

Solusi ini berfokus pada optimasi proses pembersihan kimia dengan konsentrasi yang tepat dan prosedur yang terstandar. Keberhasilan pembersihan perangkat medis yang kompleks (seperti Dymind DH-76 dengan sistem hidrolis mikropori) sangat terkait dengan "prosedur pembersihan yang salah" dan "struktur perangkat yang kompleks" itu sendiri (Huang et al., 2024).

Intervensi ini mewakili aplikasi keinsinyuran profesional:

1. Keandalan Sistem: Menentukan agen kimia yang tepat untuk melisiskan sisa protein yang menempel dan memitigasi kegagalan sistem yang berulang.
2. Perawatan Preventif: Mengubah prosedur dari reaktif (*troubleshooting* setelah *clog*) menjadi preventif (*flushing* harian setelah jam puncak).

Proyek ini merupakan demonstrasi nyata aplikasi keinsinyuran profesional (Manajemen Pemeliharaan & Optimalisasi Proses) di lingkungan klinis. Kegagalan sistem berulang pada alat Dymind DH-76 diatasi dengan intervensi desain prosedur operasional yang didukung oleh pemahaman ilmu material dan kimia.

Aspek krusial dalam penggunaan NaOCl adalah manajemen risiko korosi. Meskipun NaOCl efektif sebagai agen pembersih (Fukuzaki, 2006), sifatnya yang sangat korosif terhadap komponen logam dan karet dalam sistem hidrolis alat adalah risiko teknis yang signifikan. Oleh karena itu, fase pembilasan (*diluent/aquadest*) setelah pembersihan NaOCl menjadi tahap keinsinyuran kritis.

Mengutip kaidah teknis dari Suslow (1997), pentingnya pembilasan tuntas (minimal 3 siklus *flushing*) adalah untuk menetralkan residu klorin bebas. Tanpa pembilasan yang disiplin, solusi jangka pendek ini akan menciptakan kegagalan jangka panjang (korosi), yang menegaskan temuan Huang et al. (2024) mengenai risiko yang ditimbulkan oleh "prosedur pembersihan yang salah" pada perangkat medis yang kompleks. Proyek ini tidak hanya menyelesaikan masalah *clog* tetapi juga merancang sebuah SOP terstandar yang menjamin keandalan sistem tanpa mengorbankan integritas material internal alat.

Kesimpulan

Masalah *error* "WBC *Clog*" yang kronis pada alat hematologi Dymind DH-76 di RS. Polri Kramat Jati terbukti disebabkan oleh kegagalan sistem

pembersihan standar dalam menangani akumulasi *micro-clots* dan protein akibat beban kerja puncak. Penerapan SOP pembersihan preventif harian menggunakan larutan hipoklorit Konsentrasi 5% terbukti sangat efektif, dengan tingkat efektivitas 87,5%. Prosedur ini mampu menekan *error clog* yang berulang secara signifikan dan meningkatkan efisiensi alur kerja laboratorium.

Saran dan Tindak Lanjut:

1. Formalisasi SOP: Memformalkan prosedur penggunaan larutan hipoklorit konsentrasi 5% sebagai SOP perawatan preventif harian yang wajib, dilakukan rutin satu kali per hari setelah jam puncak pelayanan.
2. Kontrol Korosi: Menegaskan pentingnya dan memonitor pelaksanaan langkah pembilasan tuntas (*flushing* minimal 3 siklus) setelah penggunaan hipoklorit untuk mencegah korosi komponen internal.
3. Penguatan Pra-Analitik: Melakukan pelatihan ulang staf mengenai inspeksi visual yang lebih teliti terhadap sampel dan memastikan homogenisasi sampel (inversi 8-10 kali) dilakukan dengan benar untuk mencegah pembentukan *clot* awal.
4. *Monitoring*: Membuat *logbook* khusus untuk memantau pelaksanaan pembersihan preventif harian dan mencatat setiap insiden *clog* untuk evaluasi berkelanjutan.

Ucapan Terimakasih

Dalam penyelesaian Artikel ini penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. PT. Multi Sarana Medika tempat penulis bekerja;
2. Laboratorium Rumah Sakit Pokri Kramat Jati tempat melakukan studi kasus;
3. Dr. Ir. Ivan Gunawan ST., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng selaku Ketua Prodi Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya;
4. Ir. Hartono Pranjoto, M.Sc., Ph.D., IPU., ASEAN Eng. ACPE. selaku Dosen Pembimbing yang telah banyak membantu dalam proses pembuatan artikel ini;
5. Keluarga, Ibu, Bapak, dan Adik yang telah mendoakan dan memberikan *support* sehingga artikel ini dapat diselesaikan;
6. Teman-teman mahasiswa Prodi Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya;
7. Semua pihak yang telah membantu penulis.

Referensi

- Ali, M. (2010). *Monograf peran proses desinfeksi dalam upaya peningkatan kualitas produk air bersih*. Surabaya, Indonesia: UPN Press.
- Endrianti, R., Ridwana, S., Rinaldi, S. F., & Solihat, M. F. (2023). Verifikasi metode hematologi analyzer Sysmex XN-330 di laboratorium klinik Labora. *Jurnal Kesehatan Siliwangi*, 4(1), 61–69. <https://doi.org/10.34011/jks.v4i1.1491>
- Environmental Protection Agency. (1991). *Sodium and calcium hypochlorite salts*. Washington, DC: Environmental Protection Agency.



- Fukuzaki, S. (2006). Mechanisms of actions of sodium hypochlorite in cleaning and disinfection processes. *Biocontrol Science*, 11(4), 147–157.
- Gandasoebrata, R. (2010). *Penuntun laboratorium klinik*. Jakarta, Indonesia: Dian Rakyat.
- Garira, G. (2025). *Investigation of the impact of some pre-analytical variables on hematology sample rejection rates at Masvingo Provincial Laboratory in Zimbabwe* (Doctoral dissertation, Africa University). Repositori Institusional Africa University.
- Ginsburg, I., Sadovnic, M., Yedgar, S., Kohen, R., & Hrbac, J. (2002). Hemolysis of human erythrocytes by hypochlorous acid is modulated by amino acids, antioxidants, oxidants, membrane-perforating agents and by divalent metals. *Free Radical Research*, 36(6), 607–619.
<https://doi.org/10.1080/10715760290029092>
- Gulati, G., Uppal, G., & Gong, J. (2022). Unreliable automated complete blood count results: Causes, recognition, and resolution. *Annals of Laboratory Medicine*, 42(5), 515–530.
<https://doi.org/10.3343/alm.2022.42.5.515>
- Huang, J., Yi, L., Chen, Y., & Hu, J. (2024). Factors associated with cleaning quality of reusable medical devices at a single center in China. *Heliyon*, 10, e24194.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24194>
- Iqbal, M. S., Tabassum, A., Arbaeen, A. F., Qasem, A. H., Elshemi, A. G., & Almasmoum, H. (2023). Preanalytical errors in a hematology laboratory: An experience from a tertiary care center. *Diagnostics*, 13, 591.
<https://doi.org/10.3390/diagnostics13040591>
- Kiswari, R. (2014). *Hematologi dan transfusi*. Jakarta, Indonesia: Erlangga.
- Mishra, A., Natanasabapathy, V., & Suresh, N. (2022). The influence of sodium hypochlorite concentration on the fibrin structure of human blood clots and transforming growth factor-beta 1 release: An ex vivo study. *Restorative Dentistry & Endodontics*, 47(4), e42. <https://doi.org/10.5395/rde.2022.47.e42>
- Romdonah, R., Rahmi, R. Z., Indrayana, M. T., Fridayenti, F., & Asni, E. (2017). Kristal hemoglobin pada bercak darah yang dipaparkan sodium hipoklorit (NaOCl) menggunakan tes Teichmann dan tes Takayama. *Jurnal Ilmu Kesehatan*, 11(1), 47–53.
- Schofield, J., Abrams, S. T., Jenkins, R., Lane, S., Wang, G., & Toh, C. H. (2024). Microclots, as defined by amyloid-fibrinogen aggregates, predict risks of disseminated intravascular coagulation and mortality. *Blood Advances*, 8(10), 2499–2508.
<https://doi.org/10.1182/bloodadvances.2023012473>
- Suslow, T. (1997). *Postharvest chlorination: Basic properties & key points for effective distribution*. California, CA: University of California, Agriculture and Natural Resources.
<https://doi.org/10.3733/ucanr.8003>
- Velizarova, M., Yacheva, T., Genova, M., & Svinarov, D. (2021). Evaluation of automated hematology analyzer Dymind DH76 compared to Sysmex XN 1000 system. *Journal of Medical Biochemistry*, 40(4), 367–377.
<https://doi.org/10.5937/jomb0-28836>

Perbaikan Longsoran Saluran Makro Perumahan Taman Telaga Kecamatan Cikupa Kabupaten Tangerang dengan Memasang *Washed Boring Pile*

Ardhi R Hermawan^{1,2}, Rasional Sitepu¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

² PT. Ciputra Residence, Proyek Citra Raya Tangerang

✉ ardhi.riza.h@gmail.com

✉ rasional@ukwms.ac.id

Permasalahan longsoran pada saluran makro merupakan isu penting dalam upaya menjaga kestabilan sistem drainase dan keamanan lingkungan permukiman. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis metode perbaikan yang paling optimal dan menyusun estimasi biaya perbaikan pada pembangunan dinding penahan tanah dengan metode *washed boring pile* sebagai solusi penanganan longsoran di lokasi Perumahan Taman Telaga, Cikupa, Tangerang. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pembangunan dinding penahan tanah menggunakan sistem *washed boring pile* berdiameter 50 cm dan panjang 9 m dengan jarak antar tiang 1 m merupakan solusi teknis yang efektif dan aman untuk menstabilkan lereng di area longsoran. Total biaya konstruksi yang dibutuhkan untuk pekerjaan ini diperkirakan sekitar Rp 710.150.000,-. Meskipun memiliki biaya yang tinggi, pembangunan dinding penahan tanah menggunakan metode *washed boring pile* ini dinilai paling tepat untuk kondisi lapangan di lokasi penelitian. Hal tersebut karena area di sisi jalan merupakan lahan terbuka yang berpotensi menjadi tempat pembuangan sampah warga, sehingga meningkatkan risiko terjadinya longsoran ulang. Dengan penerapan *Washed Bored Pile* disertai dengan dilakukan pekerjaan urugan tanah guna membentuk kembali kemiringan lereng yang stabil, peluang masyarakat membuang sampah ke area lereng dapat dihilangkan, sekaligus menjaga kestabilan tanah.

Kata kunci: Anggaran Biaya, Longsoran, Dinding Penahan Tanah, *Washed Boring Pile*

Pendahuluan

Permasalahan longsoran pada saluran makro merupakan isu penting dalam upaya menjaga kestabilan sistem drainase dan keamanan lingkungan permukiman. Gangguan pada struktur saluran, terutama di area yang berdekatan dengan aliran sungai dapat menurunkan kapasitas aliran, mempercepat proses erosi, dan berpotensi mengancam infrastruktur di sekitarnya. Faktor seperti kondisi tanah yang kurang stabil, curah hujan tinggi, serta aktivitas manusia yang tidak terkendali seperti membuang sampah sembarangan di area saluran sering menjadi penyebab utama terjadinya kerusakan struktur saluran tersebut.

Salah satu lokasi yang mengalami permasalahan tersebut berada di Perumahan Taman Telaga, Cikupa, Tangerang, tepatnya pada Sta. 0+195 hingga Sta. 0+220 di sisi Kampung Dukuh (Area C). Berdasarkan hasil kunjungan lapangan pada 21 Juli 2025, ditemukan longsoran di sepanjang segmen tersebut yang menimbulkan rongga di bawah jalan beton dengan kedalaman sekitar 2 meter. Kondisi ini menunjukkan adanya penurunan daya dukung tanah di area saluran yang berpotensi menimbulkan kerusakan lebih luas apabila tidak segera ditangani.



Gambar 1. Area Longsoran (Area C)

Sumber: PT Geo Prima, 2025

Hasil evaluasi lapangan juga menunjukkan bahwa penyebab utama longsoran berasal dari penumpukan sampah yang dibuang warga ke area saluran, yang menyebabkan tersumbatnya aliran air dan mengakibatkan erosi pada dinding saluran. Selain itu, belum adanya perkuatan permanen pada lereng sehingga kondisi ini memperparah kerusakan. Saat ini, cerucuk bambu hanya berfungsi sebagai perkuatan sementara yang dipasang antara Sta. 0+195 s/d Sta. 0+270.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis metode perbaikan yang paling optimal dan menyusun estimasi biaya pada pembangunan dinding penahan tanah dengan metode

washed boring pile sebagai solusi penanganan longsoran di lokasi tersebut. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan perencanaan anggaran yang efisien sehingga proyek dapat berjalan tepat waktu, tepat biaya, dan sesuai dengan standar teknis yang berlaku. Selain itu, hasil penelitian diharapkan mampu menjadi acuan dalam perencanaan konstruksi serupa pada daerah dengan karakteristik geoteknik dan permasalahan stabilitas tanah yang sejenis.

Metode

Penelitian ini dilaksanakan di area sisi Kampung Dukuh (Area C) pada Sta. 0+195 s/d Sta. 0+220, Perumahan Taman Telaga, Cikupa, Tangerang. Pengamatan juga mencakup area di sekitar lokasi, yakni Sta. 0+180 s/d Sta. 0+195 dan Sta. 0+220 s/d Sta. 0+270. Adapun prosedur pengumpulan data dilakukan melalui dua tahapan yang mencakup observasi lapangan dan pengujian teknis. Hasil pengumpulan data ini digunakan sebagai dasar dalam penyusunan analisis teknis dan perhitungan biaya konstruksi dinding penahan tanah dengan metode *washed boring pile*.

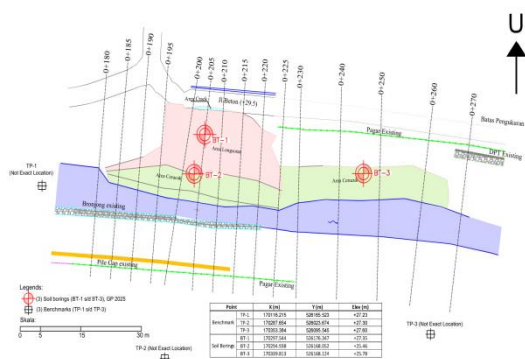
1. Observasi Lapangan

Tahapan awal pengumpulan data dilakukan melalui kegiatan observasi langsung di lapangan untuk mengidentifikasi kondisi aktual area longsoran. Observasi difokuskan pada area Sta. 0+180 s/d Sta. 0+270 guna memastikan batas area yang terdampak serta tingkat kerusakan yang terjadi. Kegiatan ini mencakup pendokumentasian visual berupa foto dan video, pengukuran dimensi longsoran, identifikasi arah pergerakan massa tanah, serta pengamatan terhadap kondisi drainase dan lingkungan sekitar.

2. Pengujian Teknis

Tahapan kedua adalah penyelidikan tanah. Penyelidikan ini mencakup kegiatan pembooran tanah (*soil boring*) pada tiga titik (BT-1, BT-2, dan BT-3) dengan kedalaman antara 10–15 meter di bawah permukaan tanah eksisting. Selain itu, juga dilakukan *survey* topografi dari Sta. 0+180 s/d Sta. 0+270 (sepanjang 90 m) untuk memperoleh penampang jalan, area longsoran, sungai dan bronjong eksisting. Barulah pekerjaan lapangan dilanjutkan dengan pengeboran (3) titik *soil boring*. Pengeboran dilakukan menggunakan alat *bor rotary drilling* dengan metode *continuous coring*. Diameter lubang bor yang terbentuk sekitar 73 mm.

Pada kedalaman tertentu, *undisturbed soil samples* (UDS) diambil memakai “*Thin Wall U Type Shelby Sampler*” (73 mm ID, panjang 500 mm). Untuk pengujian laboratorium. *Standard Penetration Tests* (SPT) dilakukan sesuai dengan standar ASTM untuk menentukan kepadatan relatif tanah non-kohefif (pasir dan kerikil) dan kekakuan tanah kohefif (lanau dan lempung). Pengujian SPT dilakukan setiap interval 1.5 m dengan memukul “*split spoon sampler*” menggunakan sistem automatic free fall hammer seberat 63-kg dan tinggi jatuh 75 cm, dimana jumlah pukulan pada 30 cm penetrasi terakhir (dari total penetrasi 45 cm) dicatat sebagai nilai NSPT.



Gambar 2. Denah Lokasi Soil Boring
Sumber: PT Geo Prima, 2025

Hasil Kerja

Situasi Permasalahan

Kasus yang menjadi fokus studi ini terjadi pada saluran makro Perumahan Taman Telaga, Cikupa, Tangerang, tepatnya pada area Sta. 0+180 hingga Sta. 0+230. Berdasarkan hasil inspeksi lapangan pada tanggal 21 Juli 2025, terlihat adanya longsoran antara Sta. 0+195 s/d Sta. 0+220 hingga menimbulkan rongga di bawah jalan beton sedalam 2 m (Gambar 3). Hal ini disebabkan karena tumpukan sampah yang dibuang oleh warga sekitar ke area tersebut. Untuk saat ini, tidak ada perkuatan lereng permanen yang dibuat, hanya ada cerucuk bambu yang dipasang sebagai perkuatan sementara antara Sta. 0+195 s/d Sta. 0+270.



Gambar 3. Dokumentasi area longsoran

Adapun pihak yang berperan sebagai pembuat keputusan dalam kasus ini adalah manajemen proyek infrastruktur Perumahan Citra Raya bersama dengan konsultan geoteknik PT Geo Prima (GP) yang bertanggung jawab terhadap perencanaan dan pelaksanaan perkuatan lereng sungai. Kedua pihak tersebut memiliki otoritas untuk menentukan metode teknis yang paling sesuai dengan kondisi lapangan berdasarkan hasil analisis geoteknik dan kajian stabilitas lereng.

Tujuan utama pembuat keputusan adalah menentukan metode perkuatan lereng yang mampu memberikan stabilitas optimal terhadap ancaman erosi dan longsoran, dengan tetap memperhatikan efisiensi biaya serta waktu pelaksanaan. Keputusan diambil agar struktur perlindungan sungai dapat berfungsi secara maksimal dalam menahan tekanan air dan pergerakan tanah. Selain itu, tujuan lain adalah menciptakan solusi yang mudah diterapkan di lapangan serta memiliki dampak positif terhadap keselamatan dan keberlanjutan lingkungan sekitar sungai.

Kriteria yang digunakan dalam proses pengambilan keputusan meliputi beberapa aspek penting, seperti: 1) Kekuatan struktur terhadap gaya geser tanah, daya tahan

terhadap tekanan air, serta kemudahan pelaksanaan pekerjaan di lapangan. 2) Kriteria biaya konstruksi dan pemeliharaan jangka panjang juga menjadi pertimbangan utama. 3) Faktor keberlanjutan lingkungan juga diperhatikan agar metode yang dipilih tidak menimbulkan dampak negatif terhadap ekosistem sungai dan sekitarnya. Dengan mempertimbangkan seluruh kriteria tersebut, diharapkan keputusan yang diambil dapat memberikan hasil optimal secara teknis maupun ekonomis.

Ukuran kinerja dalam analisis ini dinilai berdasarkan tingkat kestabilan lereng setelah dilakukan perkuatan, efisiensi penggunaan material, dan ketahanan struktur terhadap perubahan debit air sungai. Selain itu, parameter keberhasilan juga dilihat dari kecepatan waktu pelaksanaan serta efektivitas biaya yang dikeluarkan dibandingkan dengan hasil yang diperoleh. Kinerja yang baik ditandai dengan berkurangnya tingkat erosi, meningkatnya keamanan tebing sungai, serta minimnya kebutuhan perawatan rutin setelah proyek selesai dilaksanakan.

Kondisi Topografi

Sta. 0+180 s/d Sta. 0+195: Berdasarkan perbandingan kontur awal dan kontur eksisting, terlihat ada gerakan relatif kecil dan area ini tampaknya stabil.

Sta. 0+195 s/d Sta. 0+220: Kondisi lereng longsor dan menyebabkan rongga di bawah jalan beton sedalam ± 2 m. Dari data soil boring BT-1 dan observasi lapangan, banyak ditemukan "sampah" (warna merah) pada area tersebut. Disisi selatan jalan Sta. 0+200 s/d Sta. 0+210 juga terjadi retakan akibat pergerakan tanah. Longsoran menyebabkan lebar sungai mengalami penyempitan hingga 1 s/d 2 m.

Sta. 0+220 s/d Sta. 0+270: Berdasarkan perbandingan kontur awal dan kontur eksisting, terlihat adanya pergerakan tanah yang relatif kecil, artinya lereng *marginally* stabil.

Kondisi Stratifikasi Tanah

Stratifikasi tanah merupakan susunan lapisan tanah yang terbentuk secara alami akibat proses sedimentasi atau pelapukan batuan. Setiap lapisan memiliki sifat fisik dan mekanis yang berbeda, seperti tekstur, kadar air, kepadatan, serta permeabilitas (Dinata & Sadisun, 2020). Kondisi stratifikasi tanah dasar dari hasil 3 soil boring pada studi kasus ini bisa dijelaskan sebagai berikut.

1. Lapis 1 (Elev. +21 m s/d +26.2 m): Lempung kelanauan (CH) berplastisitas tinggi, dengan konsistensi lunak s/d sedang (*soft to medium stiff*) dimana rata-rata NSPT = 5 (range 2 – 8). Namun pada *boring* BT-1 (dekat jalan yang longsor) ditemukan sampah organik setebal ± 2.5 m antara Elev. +23.8 s/d +26.2 m dengan rata-rata NSPT = 2. Hal ini konsisten dengan temuan di lapangan seperti yang terlihat Gambar 3.
2. Lapis 2 (Elev. +10 m s/d +21 m): Lempung kelanauan (CH) berplastisitas tinggi dengan konsistensi kaku (*stiff*) dimana rata-rata NSPT = 12 (range 11 – 13) Elev. +21 s/d +18.5 m dan sangat kaku (*very stiff*) dimana rata-rata NSPT = 26 (range 23 – 29) Elev. +18.5 s/d +16 m dan rata-rata NSPT = 16 (range 12 – 21) Elev. +16 s/d +10 m. Semakin tinggi nilai NSPT, semakin keras tanah tersebut.

Desain Muka Air Tanah

Muka air tanah (*groundwater table*) merupakan batas antara zona jenuh dan tidak jenuh pada lapisan tanah.

Perubahan posisi muka air tanah dapat memengaruhi kestabilan lereng karena berhubungan langsung dengan tekanan air pori (*pore water pressure*). Saat muka air tanah naik, tekanan air pori meningkat dan mengurangi gaya geser efektif tanah, sehingga menurunkan faktor keamanan lereng. Oleh karena itu, pemantauan dan pengendalian muka air tanah menjadi aspek penting dalam analisis stabilitas (Iskandar et al., 2025).

Muka air tanah saat akhir pengeboran ditemukan Elev. +23.2 (BT-1), +24.4 m (BT-2), dan +21 m (BT-3). Untuk muka air desain dipakai muka air tertinggi Elev. +24 m. Sedangkan untuk kondisi banjir, diasumsikan muka air Elev. +27 m.

Parameter Kuat Geser Tanah

Kuat geser tanah merupakan kemampuan tanah untuk menahan gaya geser yang timbul akibat beban atau tekanan yang bekerja pada bidang geser. Besarnya kuat geser tanah ditentukan oleh dua parameter utama, yaitu kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ), yang bersama-sama membentuk hubungan tegangan geser (τ) terhadap tegangan normal (σ) sebagaimana dijelaskan dalam kriteria Mohr-Coulomb, dengan persamaan (Listyawan et al., 2025):

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Nilai kuat geser tanah dipengaruhi oleh jenis tanah, tingkat kepadatan, kadar air, serta kondisi drainase. Dalam analisis kestabilan lereng, dikenal dua kondisi utama, yaitu kondisi *undrained* (tanpa drainase) dan *drained* (dengan drainase) (Widjaja et al., 2023).

1. Kondisi *undrained* digunakan untuk analisis jangka pendek, di mana perubahan tekanan air pori belum sempat terdisipasi, umumnya terjadi segera setelah hujan deras atau beban konstruksi baru diterapkan.
2. Kondisi *drained* berlaku untuk jangka panjang, di mana air pori telah mencapai keseimbangan dan tanah berperilaku sesuai kuat geser efektifnya

Pada analisis jangka pendek, parameter kuat geser tanah *undrained* (S_u) sering ditentukan secara empiris menggunakan hasil uji *Standard Penetration Test* (SPT) melalui hubungan $S_u = 6 \times \text{NSPT}$ untuk tanah lempung. Nilai ini mencerminkan kekuatan geser tanpa pengaruh drainase air pori. Sedangkan untuk analisis jangka panjang, digunakan parameter kuat geser efektif yang diperoleh dari uji *triaxial Unconsolidated Undrained* (UU) dengan nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) berdasarkan hasil laboratorium.

Pada kasus ini, parameter kuat geser tanah *undrained* (S_u) pada lapisan 1B & 2 yang dipakai untuk analisa stabilitas jangka pendek ditentukan berdasarkan 6 hasil uji *Unconsolidated Undrained* (UU) *triaxial test* (Tabel 1), dimana nilai $S_u = 6 \times \text{NSPT}$.

Tabel 1. *Undrained Shear Strength* (S_u) Berdasarkan Hasil Uji Triaxial UU. Sumber: PT. Geo Prima, 2025.

Soil Boring	Depth (m)	Layer	Elev. (m)	H (m)	N-SPT	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)	σ_v (kPa)	S_u (kPa)
BT-2	1 - 1.5	Lapis 1 (CH)	+24.25	1.25	2	12	21	21	20
BT-3	2 - 2.5		+23.55	2.25	8	37	19	37	50
BT-1	4 - 4.5		+23.05	4.25	5	48	14	70	66
BT-2	5.5 - 6	Lapis 2 (CH)	+19.75	5.75	13	64	6	95	74
BT-3	6.5 - 7		+19.05	6.75	11	55	7	111	68
BT-1	10 - 10.5		+17.05	10.25	23	97	11	169	131

Sedangkan untuk jangka panjang, memakai 3 hasil uji *Unconsolidated Undrained* (UU) *triaxial test* untuk tanah Lapis 1B dan 3 Uji *Unconsolidated Undrained* (UU) untuk

tanah Lapis 2, dimana dipakai *lower bound* $c = 10$ kPa & $\phi = 20^\circ$ untuk lapis 1B (CH), dan $c = 30$ kPa & $\phi = 30^\circ$ untuk lapis 2 (CH). Parameter untuk tanah Lapis 1A, diambil berdasarkan hasil uji Triaxial UU di tanah asli berupa lempung lunak (NSPT = 3) yang dilakukan pada area DBK (Sta. 0+270 s/d Sta. 0+335). Untuk tanah yang bercampur sampah, parameter diambil sedikit lebih kecil dari Lapis 1A.

Tabel 2. Hasil Uji Triaxial UU (lapis 1, CH).

Sumber: PT Geo Prima, 2025

Soil Boring	Depth (m)	Layer	Elev. (m)	N _{SPPT}	σ ₃ (kPa)	σ ₁ -σ ₃ (kPa)	TOTAL STRESS	
							p (kPa)	q (kPa)
BT-2	1 - 1.5	Layer 1 (CH)	+24.25	2	10.0	46.8	33.4	23.4
					20.0	58.0	49.0	29.0
					20.0	119.3	79.7	59.7
BT-3	2 - 2.5		+23.55	8	40.0	143.3	111.7	71.7
					80.0	174.0	167.0	87.0
					40.0	146.8	113.4	73.4
BT-1	4 - 4.5		+23.05	5	80.0	177.7	168.8	88.8
					160.0	224.1	272.0	112.0

Tabel 3. Hasil Uji Triaxial UU (lapis 2, CH).

Sumber: PT. Geo Prima, 2025

Soil Boring	Depth (m)	Layer	Elev. (m)	N _{SPPT}	TOTAL STRESS			
					σ_1 (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	p (kPa)	q (kPa)
BT-2	5.5 - 6.0	Layer 2 (CH)	+19.75	13	20.0 40.0	146.84 151.32	93.42 115.66	73.42 75.66
BT-3	6.5 - 7.0		11	20.0 40.0	128.46 133.94	84.23 106.97	64.23 66.97	
BT-1	10 - 10.5		+17.05	23	30.0 60.0	251.80 267.14	155.90 193.57	125.90 133.57

Back-Analysis Stabilitas Lereng

Analisis stabilitas lereng bertujuan untuk menilai sejauh mana suatu lereng mampu menahan beban dan gaya geser yang bekerja padanya. Salah satu pendekatan yang umum digunakan adalah metode *back-analysis*, yaitu proses menghitung kembali parameter tanah berdasarkan geometri longsoran yang sudah terjadi. Melalui metode ini, diperoleh parameter kuat geser efektif yang mencerminkan kondisi aktual lapangan, sehingga analisis menjadi lebih akurat dibandingkan hanya menggunakan data uji laboratorium (Alexsander et al., 2025).

Untuk menguji kebenaran parameter tanah hasil uji laboratorium, dilakukan "*back-analyses*" pada: a) area longsor Sta. 0+195 s/d Sta. 0+220, b) area stabil Sta. 0+180 s/d Sta. 0+195, dan c) area marginal stabil Sta. 0+220 s/d Sta. 0+270. Analisa stabilitas lereng dilakukan dengan asumsi muka air tanah (MAT) normal Elev. +24 m dan MAT banjir Elev. +27 m, yang hasilnya dijelaskan sebagai berikut:

1. Area longsor (Sta. 0+195 s/d Sta. 0+220)

Analisa stabilitas dilakukan pada kontur awal diwakili oleh Sta. 0+205, dimana level jalan Elev. +29.5 m, dasar sungai Elev. +23.2 m, MAT normal Elev. +24 m dan MAT banjir +27 m. Hasil analisa menunjukkan bahwa FK saat MAT normal = 1.2 (stabil) dan saat MAT banjir, FK = 1.02 (longsor). Hasil ini cocok dengan kondisi aktual dimana lereng longsor saat banjir dan membentuk rongga (graben) sedalam 2 m.

2. Area Stabil (Sta. 0+180 s/d Sta. 0+195)

Analisa stabilitas kondisi eksisting diwakili oleh Sta. 0+180 dimana hasil STABL menunjukkan faktor keamanan (FK) = 1.48–1.98 ($> FK = 1.5$, OK MAT normal) dan FK = 1.16–1.54 ($> FK = 1.1$ OK MAT banjir). Hasil ini cocok dengan kondisi aktual dimana lereng stabil saat banjir.

3. Area Marginal Stabil (Sta. 0+220 s/d Sta. 0+270)

Analisa stabilitas kondisi eksisting diwakili oleh Sta. 0+260 dimana hasil STABL menunjukkan faktor keamanan (FK) = 1.27–2.34 ($< FK = 1.5$, MAT normal) dan FK = 1.10–1.92 ($FK = 1.1$, MAT banjir). Walaupun FK area

ini lebih kecil dari FK ijin = 1.5 (SNI Geoteknik), namun terhubung dibelakang area ini tidak ada fasilitas penting, maka *Owner* punya opsi untuk tidak memperkuat area ini dengan catatan sampah tidak boleh lagi dibuang ke area ini. Khusus untuk area sekitar Sta. 0+225, dimana lereng sungai harus dilandaikan dari 1(H):1(V) menjadi 2(H):1(V).

Analisis Pembangunan Dinding Penahan Tanah dengan Washed Boring Pile

Hasil analisa stabilitas lereng dan observasi lapangan antara Sta. 0+195 s/d Sta. 0+220 dengan panjang ± 25 m menunjukkan bahwa saat ini sudah terbentuk rongga (graben) setinggi 2 m, dimana di atasnya ada jalan beton. Saat banjir, subgrade penopang jalan beton akan menjadi lemah dan menyebabkan jalan bisa retak. Longsoran ini terjadi karena adanya tanah bercampur sampah setebal 3 m dengan "*shear strength*" yang kecil sehingga tidak bisa menahan tekanan air banjir dan berat tanah itu sendiri.

Di sisi jalan, kekuatan dilakukan dengan memasang *washed boring pile* (D50 cm, panjang 9 m, spacing 1 m) pada sisi selatan jalan serta *retaining wall* setinggi 1.5 m di atas capping beam untuk menahan urugan tanah di bawah jalan beton. Guna menghindari terjadinya aliran tanah diantara soldier pile maka perlu dipasang beton lunak tanpa tulangan (BO, $fc' = 10$ MPa) (D40 cm, panjang 7 m) di antara *soldier pile* tersebut.

Kemudian dilakukan analisa PLAXIS memakai parameter hasil "*back-analyses*" lereng untuk 2 kondisi kritis sebagai berikut:

1. Kondisi Normal, Jalan Elev. +29.5 m, muka air normal Elev. +24 m dan beban *surcharge* 10 kPa. Hasil Plaxis memberikan FK = 1.92 ($> FK$ ijin = 1.5) dan *bending* momen maksimum, $M_{max} = 4$ kN-m.
2. Kondisi Banjir, Jalan Elev. +29.5 m, muka air normal Elev. +27 m dan beban *surcharge* 10 kPa. Hasil Plaxis memberikan FK = 1.43 ($> FK$ ijin = 1.3) dan *bending* momen maksimum, $M_{max} = 9$ kN-m.

Untuk total area longsoran sepanjang 28 m (Sta. 0+195 s/d Sta. 0+223); diperlukan 29 *washed boring pile* (D 50 cm, L = 9 m, spacing 1 m) dengan tulangan utama 7D16 dan sengkang D13-200, dan 28 tiang BO. Semua tiang harus dihubungkan dengan *capping beam* beton bertulang berukuran 70 cm (lebar) x 50 cm (tinggi) agar bisa berlaku sebagai satu kesatuan *shoring wall* yang rigid.

Berdasarkan analisa teknis di atas, dapat dipilih alternatif solusi yaitu dengan memasang *washed boring pile* (D 50 cm, L = 9 m, spacing 1 m) pada sisi lereng sungai. Guna menghindari terjadinya aliran tanah di antara *soldier pile* maka perlu dipasang beton lunak tanpa tulangan (BO, $fc' = 10$ MPa) (D40 cm, panjang 7 m) di antara *soldier pile* tersebut. Diperlukan total 29 tiang untuk area perbaikan area longsoran sepanjang 28 m Sta. 0 + 195 s/d Sta. 0+223. Supaya tidak terjadi pergerakan yang lebih besar pada jalan, lereng dibawah jalan (Elev. +29.5 m) harus diurug kembali dengan pemadatan yang baik dan membentuk kemiringan lereng minimal 3.5(H):1(V) sampai top *capping beam* Elev. +26.5 m. "*Keying and Benching*" perlu dilakukan untuk memastikan adanya ikatan yang baik antara tanah urug dengan tanah asli.

Analisa PLAXIS dilakukan dengan memakai parameter hasil "*back-analyses*" lereng untuk 2 kondisi kritis sebagai berikut:

1. Kondisi Normal, Jalan Elev. +29.5 m, urugan tanah dari jalan hingga top *capping beam* Elev. +26.5 m dengan kemiringan 3.5(H): 1(V), muka air normal Elev. +24 m dan beban *surcharge* 10 kPa. Hasil Plaxis memberikan FK = 1.64 (> FK ijin = 1.5) dan bending momen maksimum, $M_{max} = 15 \text{ kN-m}$.
2. Kondisi Banjir, Jalan Elev. +29.5 m, urugan tanah dari jalan hingga top *capping beam* Elev. +26.5 m dengan kemiringan 3.5(H): 1(V), muka air normal Elev. +27 m dan beban *surcharge* 10 kPa. Hasil Plaxis memberikan FK = 1.42 (> FK ijin = 1.3) dan *bending* momen maksimum, $M_{max} = 78 \text{ kN-m}$.

Untuk menahan bending momen yang bekerja, *washed boring pile* (D 50 cm, L = 9 m) memerlukan tulangan utama 7D19 dan sengkang D13-200. Hasil analisa stabilitas lereng akibat tambahan urugan tanah menggunakan STABL menunjukkan FK = 1.5 (kondisi normal) dan FK = 1.3 (kondisi banjir).

Tabel 4 menunjukkan *Bill of Quantity* (BoQ) untuk pembangunan dinding penahan tanah dengan *Washed Boring Pile*, dimana diperkirakan biaya konstruksi sekitar Rp. 710.150.000,-. Nilai ini diperoleh dari perhitungan *Owner estimate* QS Citra Raya.

Tabel 4 *Bill of Quantity* (BoQ) untuk Pembangunan Dinding Penahan Tanah dengan *Washed Boring Pile*

No	Pekerjaan	Sat	Volume	Harga Satuan	Total
I	Pekerjaan Persiapan				
	- Mobdemob alat borpile	ls	1.00	15,000,000	15,000,000
	- Transportasi dan akomodasi crew borepile	ls	1.00	5,000,000	5,000,000
	- Exhavorator pc 200 1 unit	ls	1.00	4,000,000	4,000,000
	- Kordinasi keamanan alat	ls	1.00	5,000,000	5,000,000
	- Kordinasi lingkungan	ls	1.00	10,000,000	10,000,000
	- Bedeng/gudang matrial + mess pekerja	ls	1.00	22,000,000	22,000,000
	- Pembersihan selama pekerjaan & pembersihan akhir	ls	1.00	7,800,000	7,800,000
	- K3, rambu HSE	ls	1.00	2,500,000	2,500,000
	- Dokumentasi / foto proyek	ls	1.00	500,000	500,000
	- Pengukuran	ls	1.00	4,000,000	4,000,000
II	Material import tanah dan pemadatan	m ³	550.00	300,000	165,000,000
	Pakai tanah sempit dan pemadatan	m ³	100.00	200,000	20,000,000
III	Pekerjaan Bored Pile				
	Soldier Pile ($\sigma = 50 \text{ cm}$, L = 9 m, 29 pile)				
	- Pengeboran Wash Boring	m'	270.00	385,000	103,950,000
	- Beton $f_c' = 25 \text{ Mpa}$	m ³	55.00	1,650,000	90,750,000
	- Besi $f_y = 420 \text{ Mpa}$ (7D19 + D13-200)	kg	6,500.00	16,500	107,250,000
	B-0 Pile ($\sigma = 40 \text{ cm}$, L = 7 m, 28 pile)				
	- Pengeboran B-0 Pile	m'	200.00	385,000	77,000,000
	- Beton $f_c' = 10 \text{ Mpa}$	m ³	25.00	1,100,000	27,500,000
IV	Pekerjaan Capping Beam (70 x 50 cm)				
	- Beton $f_c' = 25 \text{ Mpa}$	m ³	10.00	1,650,000	16,500,000
	- Besi $f_y = 420 \text{ Mpa}$ (18D19 + D13-200)	kg	1,600.00	16,500	26,400,000
				JUMLAH	710,150,000.00

Kesimpulan

Pembangunan dinding penahan tanah menggunakan sistem *washed boring pile* berdiameter 50 cm dan panjang 9 m dengan jarak antar tiang 1 m merupakan solusi teknis yang efektif dan aman untuk menstabilkan lereng di area longsor antara Sta. 0+195 s/d Sta. 0+223 sepanjang 28 meter. Berdasarkan hasil analisis PLAXIS dan STABL, diperoleh faktor keamanan (FK) sebesar 1.64 pada kondisi normal dan 1.42 pada kondisi banjir, keduanya lebih besar dari nilai minimum yang disyaratkan ($FK \geq 1.5$ untuk kondisi normal dan $FK \geq 1.3$ untuk kondisi banjir), sehingga desain dinyatakan stabil. Untuk menahan momen lentur maksimum sebesar 78 kN-m, digunakan tulangan utama 7D19 dengan sengkang D13-200. Selain itu, guna mencegah pergerakan tanah di antara tiang, dipasang beton lunak tanpa tulangan (BO, $f_c' = 10 \text{ MPa}$) berdiameter 40 cm dan panjang 7 m di antaranya.

Estimasi total biaya konstruksi yang dibutuhkan untuk pekerjaan ini diperkirakan sekitar Rp 710.150.000,-. Meskipun memiliki biaya yang tinggi, pembangunan dinding penahan tanah menggunakan metode *washed boring pile* ini dinilai paling tepat untuk kondisi lapangan di lokasi proyek. Hal tersebut karena area di sisi jalan merupakan lahan terbuka yang berpotensi menjadi tempat pembuangan sampah warga, sehingga meningkatkan risiko terjadinya longsor ulang. Sehingga dengan penerapan *Washed Bored Pile* disertai dengan pengurugan tanah guna membentuk kembali kemiringan lereng yang stabil, peluang masyarakat membuang sampah ke area lereng dapat dihilangkan, sekaligus menjaga kestabilan tanah dan memperpanjang umur struktur penahan lereng.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada teman - teman rekan kerja di Departemen



Teknik Citra Raya yang telah membantu dalam penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada konsultan geoteknik PT Geo Prima (GP) atas kontribusinya dalam memberikan data teknis, analisis geoteknik, serta arahan yang sangat membantu dalam menentukan solusi terbaik terhadap permasalahan stabilitas lereng di lokasi proyek.

Referensi

- Alexsander, S., Sarie, F., Yani, M. I., Nomeritae, & Kennardo, E. (2025). Analisis stabilitas lereng dengan metode bored pile untuk penanganan tanah longsor pada ruas jalan Muara Teweh–Jalan Pasar Punjung STA 29+400. *Jurnal Serambi Engineering*, 10(2), 13362–13373.
- Dinata, I. A., & Sadisun, I. A. (2020). *Mengenal aliran bahan rombakan dan bahayanya*.
- Iskandar, A., Makarim, C. A., & Chandra, T. K. (2025). Studi kasus penurunan muka tanah dan muka air tanah di Jakarta Pusat tahun 2010–2022. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 8(2), 549–558.
<https://doi.org/10.24912/jmts.v8i2.21979>
- Listyawan, A. B., Oktaviani, N. C., Fitriani, D., & Wiqoyah, Q. (2025). Kuat geser tanah lempung Desa Beluk Kecamatan Bayat yang distabilisasi dengan serbuk limbah marmer. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2025*, 1(1), 346–354.
- PT Geo Prima. (2025). *Laporan perbaikan longsoran area C STA 0+180 s/d STA 0+270 Perumahan Taman Telaga* [Laporan teknis]. Disajikan untuk PT Ciputra Residence.
- Widjaja, E., Ivana, N., & Nur, R. J. (2023). Analisis stabilitas jangka pendek dan jangka panjang timbunan tanah lunak menggunakan tipe drainase undrained A dan undrained B pada metode elemen hingga Plaxis 2D. *Syntax Idea*, 5(9), 1–10.



Iradiasi Sinar Gamma Untuk Mengurangi Laju Keausan Material UHMWPE pada Sendi Panggul Buatan

Mujib Wahyudi^{1,2} Tarsisius Dwi Wibawa
Budianta²

¹ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Trunojoyo
Madura

² Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya
Mandala Surabaya

✉ mujib.wahyudi@trunojoyo.ac.id

Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) merupakan biomaterial yang banyak digunakan sebagai *acetabular liner* pada sistem sendi panggul buatan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh radiasi sinar gamma terhadap laju keausan dan karakteristik tribologinya. Sampel UHMWPE diberikan variasi dosis radiasi sinar gamma sebesar 0, 50, 75, dan 100 kGy, kemudian diuji menggunakan *pin-on-disc tribometer* dengan material AISI 316L dalam kondisi kering. Analisis gesekan, laju keausan, kekasaran permukaan (Ra), kekerasan mikro (VHN), morfologi SEM, dan komposisi EDX dilakukan untuk mengetahui mekanisme keausan yang terjadi. Hasilnya menunjukkan bahwa peningkatan dosis iradiasi dapat meningkatkan kekerasan dan menurunkan laju keausan secara signifikan. Spesimen dengan dosis 100 kGy memiliki laju keausan terendah sebesar $1,3 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ dan nilai kekerasan tertinggi 9 VHN. Analisis EDX menunjukkan tidak terjadi transfer unsur logam dari AISI 316L ke UHMWPE, sedangkan peningkatan oksigen pada UHMWPE teriradiasi sinar Gamma menunjukkan adanya *tribo-oxidation* ringan. Kesimpulannya, perlakuan iradiasi sinar gamma dosis 100 kGy mampu meningkatkan *crosslinking density*, meningkatkan kekerasan material, serta meningkatkan ketahanan aus UHMWPE untuk aplikasi sendi panggul buatan.

Kata kunci: Biomaterial, Laju Keausan, Radiasi Sinar Gamma, Sendi Panggul Buatan, UHMWPE

Pendahuluan

Material UHMWPE banyak digunakan sebagai material utama pada *acetabular liner* dalam sistem sendi panggul buatan karena sifat tribologinya yang baik dan biokompatibilitas tinggi (Aiman et al, 2024; Kurdi et al, 2025; Modica et al, 2023; Turicek et al, 2021; Yang et al, 2025). Namun, gesekan berulang antara permukaan UHMWPE dan logam paduan seperti AISI 316L dapat menimbulkan partikel keausan yang berukuran mikron dan menyebabkan peradangan jaringan lunak di sekitar implan (Li et al, 2022; Stratton-Powell et al, 2022; Turicek et al, 2021). Fenomena ini menurunkan umur pakai implan dan menjadi salah satu faktor utama kegagalan total *hip replacement*. Oleh karena itu, peningkatan performa tribologis UHMWPE merupakan isu penting dalam rekayasa biomaterial.

Proses iradiasi sinar gamma telah digunakan secara luas baik untuk sterilisasi maupun untuk meningkatkan sifat mekanik UHMWPE. Radiasi gamma pada dosis tertentu mampu membentuk ikatan silang antarrantai polimer, yang dikenal sebagai *crosslinking*. Struktur yang lebih rapat ini menambah kekerasan, mengurangi deformasi plastis, dan menurunkan laju keausan (Murthy Paladugu & Sreekanth, 2023; Nayak et al, 2021; Paladugu et al, 2024). Akan tetapi, dosis radiasi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi oksidatif akibat terbentuknya radikal bebas yang bereaksi dengan oksigen. Oleh karena itu, perlu ditentukan dosis

optimum radiasi yang mampu menghasilkan peningkatan sifat mekanik tanpa menimbulkan kerusakan struktural.

Penelitian ini difokuskan pada analisis pengaruh radiasi sinar gamma dengan variasi dosis 0, 50, 75, dan 100 kGy terhadap sifat tribologis UHMWPE. Pengujian dilakukan dalam kondisi kering menggunakan *pin-on-disc tribometer* untuk memperoleh parameter koefisien gesek dan laju keausan (Hussain et al, 2021; Sinha et al, 2023; Visco et al, 2023; Xin et al, 2022). Analisis lanjutan dilakukan menggunakan SEM-EDX untuk memahami mekanisme keausan dan kemungkinan transfer unsur logam dari AISI 316L ke UHMWPE.

Metode

Sampel UHMWPE dibuat dalam *disc* dengan diameter 98 mm dan tebal 3 mm. Perlakuan radiasi sinar gamma dilakukan dengan dosis 0 kGy, 50 kGy, 75 kGy, dan 100 kGy pada suhu ruang dan atmosfer udara. Setelah proses iradiasi, setiap sampel UHMWPE diuji menggunakan *pin-on-disc tribometer* yang bergesekan dengan *pin* yang terbuat dari AISI 316L. Pengujian dilakukan pada kondisi kering dengan beban 5 N, kecepatan putar 50 rpm, dan dengan jumlah 50.000 siklus setiap spesimenya. Data pemberian kode untuk spesimen UHMWPE dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kode Spesimen UHMWPE

Perlakuan	Kode
UHMWPE tanpa perlakuan	K1&K2
UHMWPE dengan radiasi sinar gama 50 kGy	50K1&50K2
UHMWPE dengan radiasi sinar gama 75 kGy	75K1&75K2
UHMWPE dengan radiasi sinar gama 100 kGy	100K1&100K2

Setelah pengujian, permukaan *wear track* UHMWPE diamati menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk melihat morfologi *wear track* dan analisis komposisi unsur dilakukan dengan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX). Pengukuran kekerasan dilakukan dengan metode *Vickers*, sementara kekasaran permukaan (Ra) diukur menggunakan *surface roughness tester*. Laju keausan dihitung berdasarkan *average volumetric wear* dibagi dengan *applied normal load* dan *total sliding distance* (Guezmil et al, 2016; Hussain et al, 2021; Jin et al, 2025).

Hasil Kerja

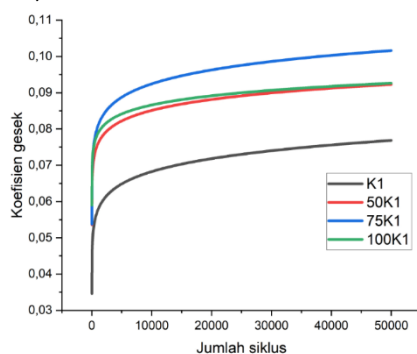
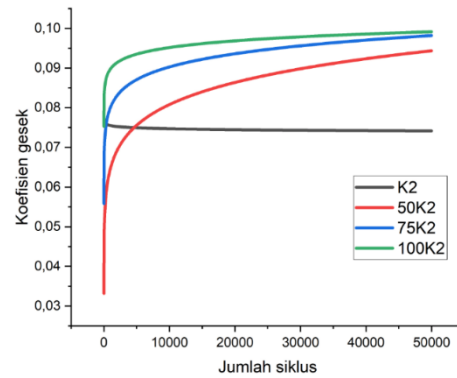
Analisis Perilaku Gesekan

Hasil pengujian tribologi menggunakan alat *pin-on-disc* tribometer menghasilkan data berupa koefisien gesek dinamis (μ). Sebelum dilakukan pengujian tribologi, dilakukan pengukuran *surface roughness* terhadap delapan spesimen UHMWPE dengan tiga kali pengulangan pada setiap spesimen untuk mengetahui kondisi topografi awal permukaan sebagaimana terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Uji Kekasaran Permukaan

Spesimen	Uji ke-1 (μm)	Uji ke-2 (μm)	Uji ke-3 (μm)	Mean (μm)
K1	0,018	0,017	0,031	0,022
K2	0,033	0,031	0,024	0,029
50K1	0,025	0,027	0,02	0,024
50K2	0,034	0,021	0,03	0,028
75K1	0,059	0,033	0,047	0,046
75K2	0,030	0,037	0,023	0,030
100K1	0,019	0,021	0,022	0,021
100K2	0,030	0,047	0,018	0,032

Pengukuran *surface roughness* ini penting untuk memahami pengaruh kondisi permukaan awal terhadap karakteristik gesekan dan keausan setelah proses iradiasi. Grafik hubungan antara koefisien gesek dan jumlah siklus bisa dilihat pada Gambar 1 dan 2. Gambar ini memperlihatkan dua fase utama, yaitu *running-in phase* dan *steady-state phase* (Birleanu et al, 2023; Jin et al, 2025).

**Gambar 1.** Nilai Koefisien Gesek Specimen UHMWPE K1 s.d 100K1**Gambar 2.** Nilai Koefisien Gesek Specimen UHMWPE K2 s.d 100K2

Pada tahap awal pengujian (0–10.000 siklus), nilai μ meningkat tajam akibat penyesuaian topografi permukaan dan pembentukan transfer *film* tipis dari UHMWPE pada permukaan logam. Setelah melewati sekitar 15.000 siklus, sistem mencapai kestabilan, di mana μ cenderung konstan hingga akhir pengujian. Fenomena ini merupakan karakteristik khas sistem tribologi polimer–logam, di mana interaksi gesekan melibatkan mekanisme deformasi plastis, ikatan adhesif, dan pembentukan lapisan pelindung mikro.

Spesimen tanpa perlakuan radiasi (K1 dan K2) menunjukkan nilai μ paling rendah, berkisar antara 0,07–0,09 pada kondisi *steady-state*. Permukaan yang halus dan plastis pada UHMWPE murni menghasilkan gaya gesek relatif kecil karena deformasi permukaan yang besar mampu memperluas area kontak nyata. Namun, sifat plastis tersebut menyebabkan material mudah mengalami *adhesive wear*, yang mempercepat pelepasan material dan menurunkan ketahanan aus (Salem et al, 2021). Sebaliknya, pada spesimen teriradiasi 50 kGy, terjadi peningkatan nilai μ hingga kisaran 0,085–0,09 akibat terbentuknya sebagian ikatan silang (*crosslinking*) yang membuat material menjadi lebih kaku. Peningkatan kekakuan ini menyebabkan penurunan deformasi plastis namun meningkatkan stabilitas gesekan.

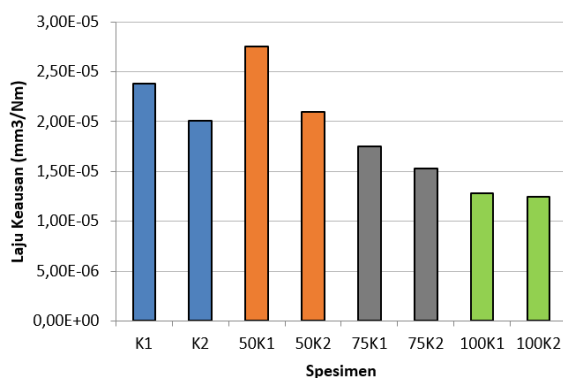
Pada spesimen yang menerima dosis 75 kGy, nilai μ meningkat lebih tinggi, mencapai 0,09–0,10 pada kondisi *steady-state*. Hal ini disebabkan oleh peningkatan signifikan pada kerapatan ikatan silang yang membuat UHMWPE semakin keras. Sedangkan pada kondisi dosis 100 kGy, di mana nilai μ lebih stabil di kisaran 0,085–0,09. Hal ini menunjukkan bahwa struktur molekuler UHMWPE telah mencapai keseimbangan antara kekakuan dan elastisitas, memungkinkan pembentukan transfer film yang lebih seragam serta menstabilkan gaya gesek sepanjang proses pengujian.

Korelasi antara kekasaran permukaan (Ra) dan koefisien gesek (μ) menunjukkan bahwa peningkatan dosis iradiasi menyebabkan perubahan signifikan pada morfologi dan perilaku gesekan UHMWPE. Nilai Ra meningkat dari 0,022 μm pada kondisi tanpa iradiasi

menjadi $0,046 \mu\text{m}$ pada dosis 75 kGy, kemudian menurun kembali menjadi $0,021 \mu\text{m}$ pada dosis 100 kGy. Peningkatan kekasaran hingga titik tertentu menyebabkan gaya gesek meningkat, namun setelah mencapai struktur ikatan silang yang homogen, permukaan menjadi lebih halus dan stabil.

Analisis Perilaku Keausan

Gambar 3 menunjukkan hasil perhitungan laju keausan (*wear rate*) material UHMWPE terhadap variasi dosis radiasi sinar gamma. Secara umum, grafik memperlihatkan tren penurunan laju keausan seiring meningkatnya dosis radiasi, menunjukkan bahwa proses iradiasi sinar gamma berpengaruh signifikan terhadap peningkatan ketahanan aus material UHMWPE (Murthy Paladugu & Sreekanth, 2023; Paladugu et al, 2024).



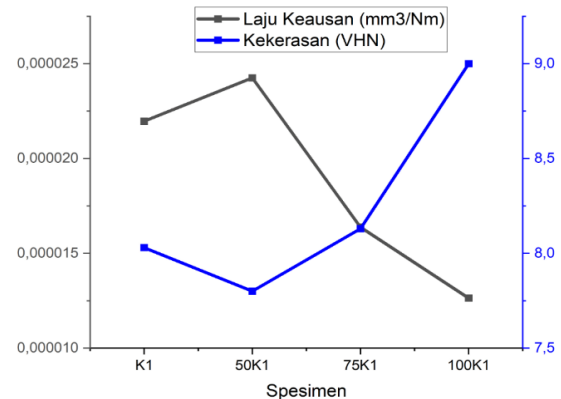
Gambar 3. Nilai *Wear Rate* Spesimen UHMWPE

Spesimen K1 (0 kGy) dan K2 (0 kGy), yang tidak mengalami perlakuan radiasi, menunjukkan *nilai wear rate* masing-masing sebesar $2,4 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ dan $2,0 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. Nilai ini mengindikasikan bahwa UHMWPE murni memiliki struktur molekuler dengan ikatan antar rantai yang lemah, sehingga mudah mengalami deformasi plastis selama proses gesekan berulang dengan logam AISI 316L.

Pada spesimen dengan dosis 50 kGy (50K1 dan 50K2), nilai *wear rate* menunjukkan fluktuasi kecil, di mana pada replikasi pertama nilainya sedikit meningkat hingga $2,6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ sebelum menurun kembali menjadi $2,1 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ pada replikasi kedua. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh terbentuknya *partial crosslinking* pada struktur polimer, di mana sebagian rantai UHMWPE mulai berikatan silang, namun sebagian lainnya mengalami fragmentasi akibat distribusi radiasi yang belum homogen. Akibatnya, sifat mekanik permukaan belum stabil sepenuhnya.

Pada spesimen dengan dosis 75 kGy (75K1 dan 75K2), terjadi penurunan *wear rate* yang signifikan dengan nilai rata-rata masing-masing $1,6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ dan $1,5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. Penurunan ini menunjukkan bahwa dosis 75 kGy telah menghasilkan kerapatan ikatan silang (*crosslink density*) yang tinggi, memperkuat jaringan molekuler dan meningkatkan kekakuan material.

Spesimen dengan dosis tertinggi, yaitu 100K1 dan 100K2, menunjukkan nilai *wear rate* paling rendah, sekitar $1,3 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. Hal ini mengindikasikan bahwa dosis 100 kGy menghasilkan efek penguatan optimum terhadap struktur mikro UHMWPE. Hasil pengujian kekerasan menggunakan metode *Vickers* (*Vickers Hardness Number*, VHN) terhadap spesimen UHMWPE dan material pasangan gesek AISI 316L ditunjukkan pada Gambar 4.

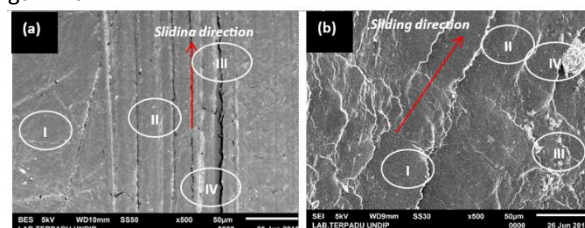


Gambar 4. Hubungan antara Nilai Kekerasan dan Laju Keausan UHMWPE

Hubungan antara kekerasan dan *wear rate* menunjukkan sebuah pola yaitu semakin tinggi kekerasan material, semakin rendah laju keausan yang terjadi (Murthy Paladugu & Sreekanth, 2023; Nayak et al, 2021). Spesimen tanpa iradiasi (K) dengan kekerasan 8,03 VHN memiliki *wear rate* tertinggi ($2,4 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), sedangkan spesimen 100K dengan kekerasan 9,0 VHN memiliki *wear rate* terendah ($1,3 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$). Peningkatan kekerasan ini secara langsung meningkatkan ketahanan permukaan terhadap penetrasi dan deformasi selama gesekan, sehingga menurunkan volume material yang terlepas.

Analisis Morfologi Permukaan (SEM)

Analisis morfologi permukaan UHMWPE menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) sebagaimana terlihat pada Gambar 5 menunjukkan perubahan signifikan akibat perlakuan radiasi sinar gamma.



Gambar 5. Hasil Uji SEM Spesimen 100K1 (a) Uji SEM Spesimen K1 (b) (I) *Ironing* (II) *Scratching* (III) *Ploughing* (IV) *Plastic deformation*

Spesimen tanpa iradiasi (K1) memperlihatkan *wear track* yang tidak beraturan dengan fitur utama berupa *ironing*, *scratching*, *ploughing*, dan *plastic deformation*. Pola ini menunjukkan dominasi mekanisme *adhesive*

wear dan *plastic deformation wear*, di mana material mengalami deformasi plastis dan pelepasan partikel akibat kontak gesek berulang (Jin et al, 2025). Kondisi tersebut mencerminkan karakteristik UHMWPE murni yang bersifat lunak dan plastis dengan ikatan antar rantai polimer yang masih longgar.

Sebaliknya, spesimen yang telah teriradiasi 100 kGy (100K1) menunjukkan permukaan yang lebih halus, alur gesek yang teratur, dan deformasi plastis yang jauh berkurang. Fitur *scratching* dan *ploughing* terlihat lebih halus dan seragam, menandakan terbentuknya *crosslinking* antar rantai polimer yang meningkatkan kekakuan dan ketahanan aus (Leksycki et al, 2022). Perbedaan morfologi ini mengonfirmasi bahwa perlakuan radiasi sinar gamma mampu memperbaiki sifat tribologis UHMWPE. Struktur *crosslinked* yang terbentuk menurunkan deformasi plastis, memperhalus permukaan, dan meningkatkan homogenitas gesekan.

Analisis Komposisi Unsur (EDX)

Hasil *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDX) memperlihatkan perubahan komposisi permukaan UHMWPE akibat iradiasi sinar gamma sebagaimana yang tertera pada Tabel 3. Pada spesimen tanpa iradiasi (K1), unsur karbon (C) mendominasi hingga 97,75 wt%, sedangkan oksigen (O) hanya 2,17 wt%, menunjukkan bahwa permukaan masih murni UHMWPE tanpa adanya transfer unsur logam dari AISI 316L (Gangwani et al, 2024). Sebaliknya, pada spesimen 100K1, kadar karbon menurun menjadi 93,94 wt% dan oksigen meningkat menjadi 5,66 wt%, mengindikasikan terjadinya *tribo-oxidation* akibat panas lokal dan gesekan selama pengujian.

Tabel 3 Perbandingan Hasil Analisis EDX spesimen K1 dan 100K1

Unsur / Senyawa	K1 (Pure)	K1 (Oxide)	100K1 (Pure)	100K1 (Oxide)
C (Carbon)	97.75 wt%	99.87 wt%	93.94 wt%	99.21 wt%
O (Oxygen)	2.17 wt%	0.04 wt%	5.66 wt%	0.35 wt%
Al / Al ₂ O ₃	–	–	0.31 wt%	0.65 wt% (Al ₂ O ₃)
Mn / MnO	0.02 wt%	0.02 wt%	0.02 wt%	0.03 wt% (MnO)
Mo / MoO ₃	0.06 wt%	0.07 wt%	0.06 wt%	0.09 wt% (MoO ₃)
Ni / NiO	–	–	0.01 wt%	0.02 wt% (NiO)
Fe, Cr	Tidak terdeteksi	Tidak terdeteksi	Tidak terdeteksi	Tidak terdeteksi
Total (wt%)	100	100	100	100

Unsur logam utama dari AISI 316L (Fe, Cr, Ni) tidak terdeteksi, menunjukkan tidak terjadi *material transfer* yang signifikan. Fenomena ini memperkuat bahwa mekanisme keausan pada UHMWPE teriradiasi bergeser dari *adhesive–plastic deformation wear* menuju *abrasive–oxidative wear*, di mana permukaan menjadi lebih stabil terhadap deformasi dan oksidasi.

Secara keseluruhan, hasil EDX mendukung temuan SEM dan uji tribologi bahwa iradiasi sinar gamma meningkatkan *crosslink density*, homogenitas, dan ketahanan aus UHMWPE tanpa menyebabkan degradasi logam pasangan gesek.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa radiasi sinar gamma berpengaruh signifikan terhadap peningkatan sifat mekanik dan tribologis UHMWPE. Dosis iradiasi 100 kGy menghasilkan kombinasi terbaik dengan nilai kekerasan tertinggi dan laju keausan paling kecil. Peningkatan ini disebabkan oleh terbentuknya ikatan silang yang memperkuat struktur polimer. Analisis EDX menunjukkan bahwa meskipun terjadi sedikit peningkatan oksigen akibat *tribo-oxidation*, tidak ditemukan transfer logam dari AISI 316L, sehingga UHMWPE tetap aman digunakan sebagai biomaterial.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas dukungan fasilitas, bimbingan, dan kesempatan penelitian ini dapat dilaksanakan sebagai bagian dari kegiatan studi kasus praktik keinsinyuran.

Referensi

- Aiman, F. N., Kamarudin, K., Jamian, R., Sun, S., Shaari, M. F., Roslan, M. N., Ahmad, A., Mohd Khairuddin, M. S., & Raman, I. (2024). Impact of UHMWPE and PP polymer characterization on the blending process for PP/UHMWPE composite in FFF. *International Journal of Integrated Engineering*, 16(6), 182–195. <https://doi.org/10.30880/ijie.2024.16.06.018>
- Birleanu, C., Pustan, M., Cioaza, M., Bere, P., Contiu, G., Dudescu, M. C., & Filip, D. (2023). Tribo-mechanical investigation of glass fiber reinforced polymer composites under dry conditions. *Polymers*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/polym15122733>
- Gangwani, P., Kovač, J., Emami, N., & Kalin, M. (2024). Effect of multi-scale fillers on the tribological behavior of UHMWPE composites in water-lubricated contacts. *Tribology International*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109669>
- Guezmil, M., Bensalah, W., & Mezlini, S. (2016). Tribological behavior of UHMWPE against TiAl6V4 and CoCr28Mo alloys under dry and lubricated conditions. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 63, 375–385. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.07.002>
- Hussain, O., Ahmad, B., & Sheikh, S. S. (2021). Biotribological performance of medical-grade UHMW polyethylene-based hybrid composite for joint replacement. *Polymers and Polymer Composites*, 29(9), S1424–S1431. <https://doi.org/10.1177/09673911211058088>
- Jin, Y., Shen, W., Zhu, Y., Hu, K., Yi, J., Li, F., & Huang, Z. (2025). Enhanced friction and wear behavior of PEEK



- composites with low-content UHMWPE under elevated-temperature conditions. *Tribology Online*, 20(3), 146–154. <https://doi.org/10.2474/trol.20.146>
- Kurdi, O., Hadi, E., Santosa, A., Hadi, M., Ismail, R., & Heriyani, O. (2025). Coating-assisted laser micromachining of UHMWPE: Thermal control and microchannel optimisation using PDMS and PAA. *AIMS Materials Science*, 12(4), 845–860. <https://doi.org/10.3934/matersci.2025036>
- Leksycki, K., Feldshtein, E., Maruda, R. W., Khanna, N., Królczyk, G. M., & Pruncu, C. I. (2022). An insight into the effect of surface morphology, processing, and lubricating conditions on tribological properties of Ti6Al4V and UHMWPE pairs. *Tribology International*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107504>
- Li, X., Lu, Y., Li, J., Zhou, S., Wang, Y., Li, L., & Zhao, F. (2022). Photoluminescent carbon dots (PCDs) from sour apple: A biocompatible nanomaterial for preventing UHMWPE wear-particle induced osteolysis via modulating Chemerin/ChemR23 and SIRT1 signaling pathway and its bioimaging application. *Journal of Nanobiotechnology*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01498-3>
- Modica, F., Basile, V., Surace, R., & Fassi, I. (2023). Replication study of molded micro-textured samples made of ultra-high molecular weight polyethylene for medical applications. *Micromachines*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/mi14030523>
- Murthy Paladugu, S. R., & Sreekanth, P. S. R. (2023). Effect of γ irradiation and vitamin E on the thermal and mechanical properties of graphene/nanodiamond reinforced hybrid UHMWPE nanocomposites. *Results in Engineering*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101562>
- Nayak, C., A. S., Kundu, B., Singh, S., Sivakumar, S., Balla, V. K., & Balani, K. (2021). Radiation-induced effects on micro-scratch of ultra-high molecular weight polyethylene biocomposites. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 2277–2293. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.040>
- Paladugu, S. R. M., Sahu, S. K., Namathoti, S., Popat, K. C., Shanmugam, R., & Sreekanth, P. S. R. (2024). Characterization of surface and bulk properties of α -tocopherol blended and γ irradiated UHMWPE sandwich nanocomposites. *Results in Engineering*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102287>
- Salem, A., Bensalah, W., & Mezlini, S. (2021). Effect of hygrothermal aging on the tribological behavior of HDPE composites for bio-implant application. *Polymer Testing*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.107050>
- Sinha, S. K., Hatano, N., & Hirayama, T. (2023). Tribological studies of hybrid composites of epoxy with solid (UHMWPE) and liquid (squalane) lubricant fillers. *Tribology Online*, 18(7), 469–481. <https://doi.org/10.2474/TROL.18.469>
- Stratton-Powell, A. A., Williams, S., Tipper, J. L., Redmond, A. C., & Brockett, C. L. (2022). Mixed material wear particle isolation from periprosthetic tissue surrounding total joint replacements. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 110(10), 2276–2289. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.35076>
- Turicek, J., Ratts, N., Kaltchev, M., & Masoud, N. (2021). Surface treatment of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) by cold atmospheric plasma (CAP) for biocompatibility enhancement. *Applied Sciences*, 11(4), 1–13. <https://doi.org/10.3390/app11041703>
- Visco, A., Epasto, G., Giudice, F., Scolaro, C., & Sili, A. (2023). Wear effect on the contact between a metallic pin and a rotating polymeric specimen. *Applied Sciences*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/app13074463>
- Xin, H., Liang, H., Zhang, L., Jia, J. H., Li, X., & Jin, Z. (2022). Bio-tribological characterisation of ultra-high molecular weight polyethylene against different metal counterparts. *Biosurface and Biotribology*, 8(2), 140–149. <https://doi.org/10.1049/bsb2.12038>
- Yang, C., Zhang, J., Yue, H., & Kang, X. (2025). The low friction coefficient and high wear resistance UHMWPE: The effect of pores on properties of artificial joint materials. *Lubricants*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/lubricants13010031>



Alternatif Penyediaan Sumber Air di PLTMG Tanjung Selor 15 MW di Tengah Keterbatasan Sumber Air untuk Proses dan Domestik

Dewanto¹ Adriana Anteng Anggorowati²

^{1,2} Professional Engineer Study Program, Faculty of Engineering, Widya Mandala Surabaya Catholic University, Indonesia

¹ PT. Wijaya Karya Rekayasa Konstruksi

✉ dewanto.sam84@gmail.com

Sumber air merupakan salah satu media pendukung dalam operasi suatu pembangkit disamping media lainnya. Air digunakan sebagai media pendingin (*Cooling System*) dimana kondisi air yang tidak memenuhi kriteria akan mengakibatkan tidak optimalnya proses pendinginan dan kerusakan pada *Cooling System* yang menggunakan konsep sistem *close loop*. Selain itu air juga digunakan untuk kebutuhan *fire fighting system* dan air domestik kebutuhan operasional karyawan.

Kata kunci: Sumber Air, *Water Treatment Plant*, *Cooling System*, *Dual Fuel Engine*

Pendahuluan

PT PLN memiliki rencana membangun pembangkit listrik dengan Lokasi yang menetap (*Fixed Power Plant*) yang akan menggunakan teknologi mesin gas *dual fuel* untuk pembangkitan listrik, dengan kemampuan pembakaran dual fuel (gas alam / bahan bakar minyak HSD sebagai sumber pembakaran) dan memiliki kemampuan untuk beroperasi serta beralih antara bahan bakar dengan konsep yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG). PT PLN sebagai perusahaan pemerintah dari proyek ini juga mendukung SDG (*Sustainable Development Goals*). SDG, dalam bahasa Indonesia diartikan sebagai tujuan pembangunan berkelanjutan adalah rencana aksi global yang disepakati oleh negara-negara, termasuk Indonesia, untuk mencapai pembangunan berkelanjutan. SDG terdiri dari 17 tujuan dan 169 target yang diharapkan dapat dicapai pada tahun 2030. Proyek ini mendukung salah satu tujuan SGD yaitu Industri, Inovasi, dan Infrastruktur (Tujuan 9), yang bertujuan untuk membangun infrastruktur yang tangguh, mempromosikan industrialisasi yang inklusif dan berkelanjutan, dan mendorong inovasi.

Dalam pembangunan suatu pembangkit ini, tidak hanya diperlukan mesin/engine tapi juga diperlukan *system* pendukung (*Balance of Plant*) seperti suplai *fuel oil* (BBM), *lube oil* (minyak pelumas/proses), air, dan udara. Pembangunan PLTMG Tanjung Selor 15 MW ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh penulis, karena adanya pengembangan desain atau alternatif desain yang dibuat untuk mendukung dalam pembangunan pembangkit, yaitu PLTMG Tanjung Selor 15 MW dalam hal alternatif penyediaan sumber air yang merupakan kebutuhan yang sangat penting untuk dapat beroperasinya suatu pembangkit dan juga untuk kebutuhan *domestic* di dalam pembangkit tersebut. Ini sejalan juga mendukung SGD, yaitu memastikan ketersediaan dan pengelolaan air bersih dan sanitasi yang berkelanjutan (Tujuan 6) dan memastikan akses ke energi

yang terjangkau, andal, berkelanjutan, dan modern (Tujuan 7).

Metode

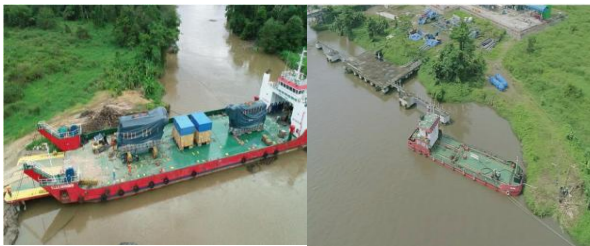
PT PLN selaku pemilik pekerjaan dalam dokumen kontrak menyatakan bahwa desain dan spesifikasi pekerjaan harus sesuai dengan semua hukum dan peraturan yang berlaku di Pemerintah Indonesia dan dengan kode dan peraturan lokal yang berlaku. Berikut adalah daftar ringkasan kode dan standar industri yang dapat digunakan untuk desain dan konstruksi pabrik. Standar yang berlaku harus menggunakan edisi terbaru. Berikut adalah daftar kode dan standar industri yang akan digunakan dalam desain dan konstruksi:

1. AWWA: *American Water Work of Association*
2. NFPA: *National Fire protection Association*
3. OSHA: *Occupational Safety and Health Administration*
4. ISO 24510: Standar Persyaratan Pengelolaan Air dan Limbah
5. Permenkes 416/1990: Syarat-syarat dan pengawas kualitas air
6. Permenkes 2/2023: Standar kualitas air untuk keperluan *higiene* dan sanitasi, termasuk parameter biologis, kimia wajib, kimia tambahan, dan fisik
7. Permenkes 32/2017: Standar baku mutu kesehatan lingkungan dan persyaratan kesehatan air untuk keperluan *higiene* sanitasi
8. MAN Engine: *Standar Water for Engine*
9. Permen LHK 5/2022: Pengolahan air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan pertambangan dengan menggunakan metode lahan basah buatan
10. ANSI S1.4, ANSI S12.18, ISO 6190, ASTM E1014 *for environmental emission*
11. NFPA 70 and NFPA 497: *Design and materials furnished requirements for installation in an area classified as hazardous*

DESAIN BASIS

I. DESKRIPSI PROSES

PLTMG Tanjung Selor 15 MW terletak di daerah Kalimantan Utara tepatnya di daerah Tanjung Palas – Bulungan dan terletak dekat jalur Air Sungai Kayan dimana sungai menjadi salah satu alat transportasi yang digunakan masyarakat untuk melakukan aktifitas perjalanan selain jalur darat dan udara. Dengan kondisi yang strategis seperti itu, pengiriman bahan baku kebutuhan pembangkit lebih mudah dilakukan terutama peralatan pembangkit saat dilakukan konstruksi dan juga pengiriman Bahan Bakar. Sebagai informasi, pada saat Proyek Pembangunan PLTMG Tanjung Selor 15 MW kondisi di Kaltara masih dalam kondisi defisit energi.



Gambar 1. Pengiriman Engine & BBM PLTMG Tanjung Selor



Gambar 2. Foto Plant PLTMG Tanjung Selor 15 MW

Pengoperasian suatu pembangkit, tidak terlepas dari kebutuhan bahan baku yang akan digunakan secara terus menerus, yaitu BBM (B30 atau Gas), *lube oil*, air dan udara. Air juga merupakan salah satu faktor pendukung proses yang penting sebagai kebutuhan proses untuk berjalannya pembangkit PLTMG Tanjung Selor 15 MW dan juga untuk memenuhi kebutuhan lainnya di *plant*, yaitu:

- Sistem pendinginan (*cooling system*) engine
- Fire Fighting System
- Air domestik untuk karyawan dan kantor

Berdasarkan kebutuhan tersebut perlu adanya penyediaan dan pengelolaan atas kebutuhan air di plant PLTMG Tanjung Selor demi keberlangsungan operasi dari pembangkit tersebut. Sebagai informasi, adanya keterbatasan lahan yang dimiliki oleh PLN, tidak cukup area untuk penyediaan tangki air proses, tangki kebutuhan Fire Fighting System dan air domestik secara terpisah sehingga semua kebutuhan air di *plant* melalui proses WTP. Pada Pembangunan pembangkit PLTMG Tanjung Selor 15 MW, dokumen kontrak menyatakan dalam penyediaan air untuk kebutuhan pembangkit harus mengikuti :

1. Penyediaan air sesuai dengan kualitas yang dipersyaratkan *design* baik untuk kebutuhan proses dan system pendukung lainnya. Isi dari persyaratan dalam dokumen kontrak adalah sebagai berikut:

Biddoc III Section 4.1.

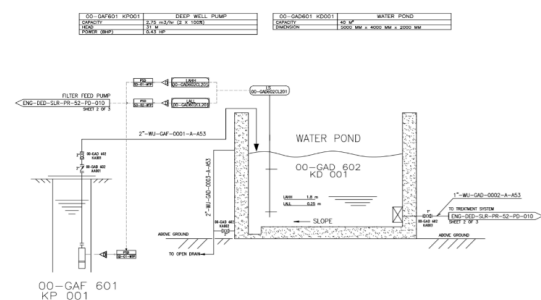
“Cooling Water Supply and Water Quality. According to site investigation (Hand Bor), the ground water level was found at a depth of approximately 0.3 m, then the water for the water cooling system and fire fighting system will be source from deepwell.”

Biddoc III Section 4.5. 8

“Water from deepwell (herein after called raw water) shall be supply by lifting pump. Depending on the water source and quality, a clarifier system may be required. The output of clarifier shall pump to the next process. Coagulant and flocculant shall be added in the clarifying and filtering system. The lifting pump shall send raw water to a series of multimedia filters. The filter shall contain layers of gravel, coarse sand, fine sand and anthracite.”

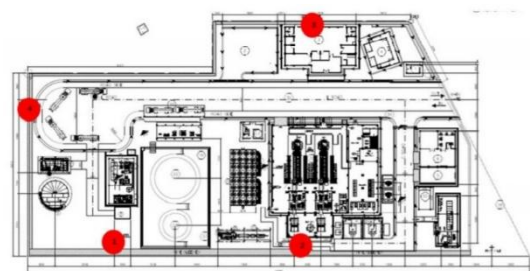
Berdasarkan dokumen kontrak ditetapkan menyediakan air diambil dari sumber air tanah dengan menggunakan *deepwell* sesuai hasil soil investigasi, sumber air bisa didapatkan di kedalaman 0.3 meter. Kemudian sumber air tanah tersebut diolah dengan menggunakan *water treatment system*.

2. Pemenuhan terhadap penyediaan air sesuai kualitas yang dipersyaratkan disain engineering. Disain yang disetujui oleh PT PLN selaku pemilik pekerjaan pada saat proses *Design Review Process and Instrment Diagram* (PID) dinyatakan bahwa suplai Air yang digunakan pada proses WTP menggunakan sumber air dari *deepwell*.



Gambar 3. PID WTP System

Berdasarkan persyaratan disain yang sudah ditentukan dan hasil pengecekan soil investigasi pada dokumen kontrak, ditentukan daerah sumber air untuk pemasangan *deepwell* sebagai berikut:



Gambar 4. Penentuan Titik Deepwell

Penyediaan sumber air *deepwell* dilakukan dengan melakukan pengeboran di 4 titik yang berwarna merah dengan kondisi, yaitu:

1. *Deepwell* dengan kedalaman ± 46 meter
2. *Deepwell* dengan kedalaman ± 55 meter
3. *Deepwell* dengan kedalaman ± 60 meter
4. *Deepwell* dengan kedalaman ± 54 meter

Hasil yang diperoleh dari pengeboran tersebut:

1. Setelah dilakukan pengeboran dan dilakukan penyedotan, air hanya keluar sesaat (sempat dilakukan pengambilan sample di titik #4) dengan kondisi cukup bersih / baik dan setelah itu pompa tidak mampu lagi menyedot (*stuck*) karena yang tersedot adalah pasir dan lumpur.
2. Kondisi air yang didapat setelah pompa *stuck* sebagai berikut :



Gambar 6. Foto Sample Air Dari Deepwell

Sumber air yang dihasilkan sangat kotor dan kuantitasnya terbatas sehingga pada kondisi tertentu, pompa *deepwell* menghisap tanah/pasir sehingga *stuck* dan rusak. Kondisi diatas menimbulkan ada masalah yang kritis yaitu keterbatasan sumber air di PLTMG Tanjung Selor 15 MW untuk memenuhi kebutuhan suplai air di *plant* yang tidak mungkin didapatkan dari air *deepwell* untuk keperluan proses *commisioning* dan operasional. Kondisi ini sangat menghambat karena proses *commisioning* dan dilanjutkan dengan *start* operasi membutuhkan air termasuk untuk kebutuhan *air fire fighting system* yang secara estimasi *plant* harus siap kondisi air sesuai kapasitas tangki air, yaitu 750MT.

II. TINDAKAN PERBAIKAN

Berdasarkan hasil yang didapat tersebut dilakukan tindakan perbaikan dengan melakukan komunikasi dengan PT. PLN selaku pemberi pekerjaan dan lahan terkait masalah yang dihadapi dimana hasil yang didapat dari komunikasi dengan stakeholder sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan kembali pendataan terkait kondisi yang ada.
2. Melakukan kajian untuk membuat metoda baru untuk mendapatkan sumber air baru untuk bisa mensuplai WTP dan menghasilkan air produk sesuai kualitas yang dipersyaratkan.

Proses pendataan atau evaluasi ulang dilakukan melalui analisa sebagai berikut :

1. Pendataan/pengecekan kondisi air dari dari sumber air *deepwell* yang dilakukan pada saat awal air keluar dan dikirim ke laboratorium pihak ketiga untuk mengetahui hasil analisa air tersebut.

REPORT OF ANALYSIS

AIR BERSIH					
NO.	Parameter	Unit	Threshold Limit Value ¹⁾	Sample ID AIR MENTAH	Methods ²⁾
Physical Test					
1	Odor	-	Odorless	Odorless	2120 B
2	Turbidity	NTU	25	351	2130 B
3	Taste	-	Tasteless	Tasteless	2160 B
4	Temperature	°C	Ambient Temp $\pm 3^{\circ}\text{C}$	22.1	2550 B
5	Color	Pt-Co Scale	50	37	2120 B
Chemical Test					
6	Arsenic (As)	mg/L	0.05	<0.001	3114C, 3030F
7	Fluoride (F-)	mg/L	1.5	0.54	4500-F-B
8	Cadmium (Cd)	mg/L	0.005	<0.001	3111B, 3030F
9	Total Hardness as CaCO ₃	mg/L	500	74	2340 B
10	Nitrite (NO ₂ -)	mg/L	1.0	0.24	4500-NO ₂ -B
11	Selenium (Se)	mg/L	0.01	<0.001	3114C, 3030F
12	Cyanide (CN-)	mg/L	0.1	<0.001	4500-CN-B
13	Lead (Pb)	mg/L	0.05	<0.001	3111B, 3030E
14	Copper (Cu)	mg/L	-	<0.005	3111B, 3030F
15	Barium (Ba)	mg/L	-	<0.004	3111B, 3030F
16	pH	-	6.5 - 9.0	6.87	4500-H-B

Gambar 7. Hasil Analisa Air Deepwell

2. Pendataan/pengecekan kondisi air dari sumber air terdekat *site plant* PLTMG Tanjung Selor, yaitu air sungai kayan dan dikirim ke laboratorium pihak ketiga untuk mengetahui hasil analisa air tersebut.

REPORT OF ANALYSIS

AIR BERSIH					
No	Parameter	Unit	Threshold Limit Value ¹⁾	Sample ID AIR SAMPLING WATER POND	Methods ²⁾
Physical Test					
1	Odor	-	Odorless	Odorless	2120 B
2	Total Dissolved Solids (TDS)	mg/L	1000	80.3	2540 C
3	Turbidity	NTU	5	11.03	2130 B
4	Taste	-	Tasteless	Tasteless	2160 B
5	Temperature	°C	Ambient Temp $\pm 3^{\circ}\text{C}$	26.2	2550 B
6	Color	Pt-Co Scale	15	25	2120 B
Chemical Test					
1	Mercury	mg/L	0.001	<0.0001	3112B, 3030H
2	Arsenic	mg/L	0.05	<0.001	3114C, 3030F
3	Iron	mg/L	1.0	0.24	3111B, 3030E
4	Fluoride	mg/L	1.5	0.48	4500-F-B
5	Cadmium	mg/L	0.005	0.199	3111B, 3030E
6	Total Hardness as CaCO ₃	mg/L	500	40	2340 B
7	Chloride	mg/L	600	3.2	4500-Cl-D
8	Chrom Hexavalent (Cr ⁶⁺)	mg/L	0.05	<0.001	3500-C-B
9	Manganese (Mn)	mg/L	0.5	<0.005	3111B, 3030E
10	Nitrate (NO ₃ -)	mg/L	10	0.29	4500-NO ₃ -B
11	Nitrite (NO ₂ -)	mg/L	1.0	0.03	4500-NO ₂ -B
12	Pb	mg/L	6.5-0.0	8.88	4500-H-B
13	Selenium (Se)	mg/L	0.01	<0.001	3114C, 3030F
14	Zinc (Zn)	mg/L	15	0.061	3111B, 3030E
15	Cyanide (CN-)	mg/L	0.1	<0.001	4500-CN-B
16	Sulfate (SO ₄ 2-)	mg/L	400	69	4500-SO ₄ -B
17	Lead (Pb)	mg/L	0.05	<0.007	3111B, 3030E
18	Copper (Cu)	mg/L	1.0	<0.005	3111B, 3030E
19	Aluminum (Al)	mg/L	0.2	<0.04	3111D, 3030E
20	Barium (Ba)	mg/L	1.0	<0.004	3111B, 3030F
21	Sodium (Na)	mg/L	200	21	3111B, 3030E
22	Sulfite (SO ₃ 2-)	mg/L	0.05	0.1	4500-SO ₃

¹⁾ The Regulation Republic of Indonesia Health Minister Decree No. 416/MENKES/PER/10/1990
²⁾ Standard Methods 22nd Edition 2012, APHA, AWWA

Gambar 8. Hasil Analisa Air Sungai Kayan

Berdasarkan hasil analisa air yang berasal dari 2 (dua) sumber air, yaitu *deepwell* dan air Sungai Kayan didapatkan informasi sebagai berikut:

- Hasil analisa air *deepwell* seperti air serapan dari sungai kayan dikarenakan ada kemiripan kondisi air.
- Kondisi air sungai kayan memiliki kecenderungan lebih baik dari TDS dikarenakan air sungai cenderung mengalir.

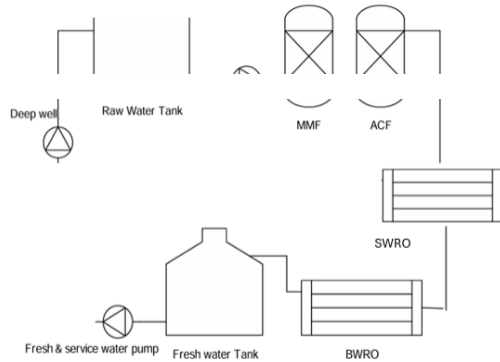
Melihat dari informasi tersebut dimana air tanah yang ada diarea PLTMG Tanjung Selor diprediksi merupakan serapan, maka dilakukan uji coba penggunaan air kayan untuk diolah dengan Sistem WTP yang sudah disiapkan.

Water Treatment Plant

Sesuai dengan konsep *Water Treatment Plant* (WTP) yang ada dalam dokumen kontrak disampaikan bahwa WTP berfungsi menyediakan pasokan air bersih untuk pemadaman kebakaran (*fire fighting system*), sistem air pendingin (*cooling system*), dan penggunaan domestik.

Sistem pengolahan air terutama akan terdiri dari kolam air, filter pasir, filter mikro, SWRO, BWRO, sistem injeksi NaOH, sistem injeksi NaOCl, unit dosing kimia membran, dan tangki air layanan untuk penggunaan umum. Sistem pengolahan ini juga mencakup filter cartridge dan osmosis

balik untuk pasokan air pendingin. Seluruh sistem akan dirancang untuk menyediakan pasokan air untuk 171 m³/jam air *Fire Fighting System*, 0,25 m³/jam penggunaan domestik, dan 0,3 m³/jam untuk operasi air kontinu mesin secara keseluruhan. Spesifikasi air yang digunakan sebagai dasar adalah kekerasan maksimum 10dH dan kandungan ion klorida maksimum 50 ppm. Sistem ini terkait dengan Buku III sub-bagian 4.5.8 dan nomor PFD ENG-DED-SLR-PR-51-PD-005.



Gambar 9. Flowchart WTP

Dengan Sistem WTP yang ada, dilakukan modifikasi jalur untuk memastikan bahwa raw water tank bisa disuplai air dari Sungai Kayan dan dilakukan evaluasi dengan memproses air Sungai Kayan ke system WTP. Proses modifikasi dilakukan dengan memasang pompa deepwell yang awalnya digunakan untuk mengambil air dari air tanah, dipindahkan dan dipasang ke Sungai Kayan.

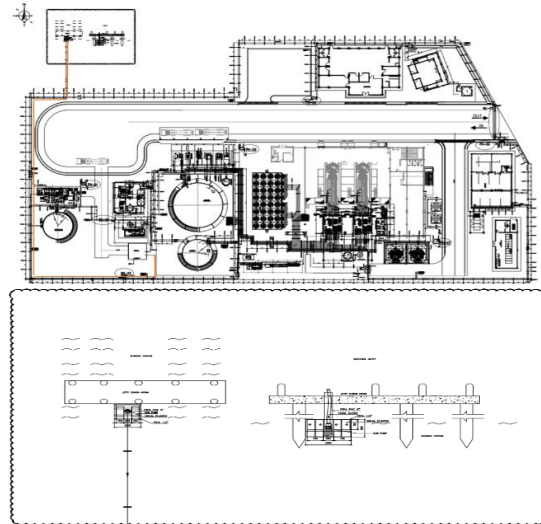


Gambar 10. Pemasangan Pompa



Gambar 11. Pemasangan Jalur Pipa

Secara konsep disainnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Gambar 12. Konsep Disain Pemasangan Jalur Pipa
Catatan: Jalur pipa untuk mengambil air sungai berwarna coklat

Metoda / desain jalur suplai air untuk *water treatment* unit dibuat sebagai berikut:

1. Penampungan air untuk di proses pada *Water Treatment Unit* akan di tampung di *water pond* dengan terlebih dahulu diberi tawas untuk mengendapkan kotoran yang terbawa dari sungai.
2. Pipa jalur suplai air dari sungai mengikuti jalur pada gambar yang berwarna coklat.
3. Pompa *Deepwell* dipasang secara *floating* dengan menggunakan pelampung (drum) dan diikat ke arah pondasi jetty (Gambar 10)
4. Koneksi antara pipa di dalam *site* PLTMG Tanjung Selor dan pompa yang *site* memakai *flexible hose* sehingga pipa dan pompa dalam kondisi aman.

Pengecekan Air Produk WTP dari Sumber Air Sungai Kayan

Setelah dilakukan instalasi, Tim PLTMG Tanjung Selor melakukan operasional terhadap WTP untuk mengetahui air produk yang dihasilkan. Hasil air analisa dikirim kepada laboratorium pihak ketiga (sucofindo). Hasil analisa yang diperoleh adalah sebagai berikut :

REPORT OF ANALYSIS					
AIR BERSIH					
NO.	Parameter	Unit	Threshold Limit Value *)	Sample ID AIR PRODUK RO-PLTMG-TJS	Metode **)
Physical Test					
1	Color	-	Odorless	Odorless	3120 B
2	Total Dissolved Solids (TDS)	mg/L	1.500	24.0	2540 C
3	Turbidity	NTU	25	0	2130 B
4	Taste	-	Tasteless	Tasteless	2150 B
5	Temperature	°C	Ambient Temp	25.0	2550 B
6	Color	Pl-Co Scale	50	3	2120 B
Chemical Test					
1	Mercury (Hg)	mg/L	0.001	<0.001	3112B, 3030H
2	Arsenic (As)	mg/L	0.05	<0.001	3114C, 3030F
3	Iron (Fe)	mg/L	1.0	<0.03	3111B, 3030E
4	Fluoride (F)	mg/L	1.5	0.06	4500-F-B
5	Calcium (Ca)	mg/L	0.005	<0.001	3111B, 3030E
6	Total Hardness as CaCO ₃	mg/L	500	21	2340 B
7	Chloride (Cl)	mg/L	600	2.0	4500-Cl-D
8	Chrom Hexavalent (Cr6+)	mg/L	0.05	<0.001	3500-Cr-B
9	Manganese (Mn)	mg/L	0.5	<0.005	3111B, 3030E
10	Nitrate (NO ₃ -)	mg/L	10	9	4500-NO ₃ -B
11	Nitrite (NO ₂ -)	mg/L	1.0	0.03	4500-NO ₂ -B
12	Pb	mg/L	6.5-9.0	5.76	4500-Pb-B
13	Selenium (Se)	mg/L	0.01	<0.001	3114C, 3030F
14	Zinc (Zn)	mg/L	15	<0.003	3111B, 3030E
15	Cyanide (CN-)	mg/L	0.1	<0.001	4500-CN-B
16	Sulphate (SO ₄ 2-)	mg/L	400	35	4500-SO ₄ -B
17	Lead (Pb)	mg/L	0.05	<0.007	3111B, 3030E
18	Surfactants Anionic as MBAS	mg/L	0.5	0.01	5540C
Microbiological Test					
1	Total Coliform	Not water supply Piped water	MPN/100mL	50	9222 B
			MPN/100mL	10	73.8 9222 B

Gambar 13. Hasil Analisa Air Produksi WTP Sungai Kayan

Berdasarkan hasil analisa dari laboratorium external (sucofindo), didapatkan hasil air sungai kayan bisa digunakan dan diproses dengan menggunakan WTP PLTMG Tanjung Selor 15 MW telah memenuhi standar air baku, yaitu Permenkes 41/1990.

Pemantauan Terhadap Hasil Proses Pengolahan Air Sungai Kayan di WTP

Tim WTP PLTMG Tanjung Selor 15 MW juga melakukan pemantauan terhadap hasil air produk WTP dari sisi monitor yang ada di peralatan WTP untuk memastikan bahwa air produk secara kontinue menghasilkan kualitas air sesuai standar yang ditentukan. *Monitoring* secara kontinue tetap dilakukan untuk mempertahankan hasil air produk tetap dalam kondisi yang *accepted quality*.



Gambar 14. Hasil Analisa dari Sistem WTP

Re-konfirmasi terhadap Hasil yang Diperoleh

Hasil analisa air produk WTP juga dikonfirmasi kepada manufaktur *engine* karena air produk WTP yang utama harus memenuhi kualitas kebutuhan *engine*.

9.1.3 Raw water quality for fresh water

The raw water used should match the following values, before being treated in the water treatment system. If the water quality is different from the values stated below, the water treatment system will have to be modified at an extra cost.

Decentralised Power Plants - Package #3
Section 9 - Requirements and limitations



- pH value at 25°C	7.7
- Conductivity at 25°C	511 µS/cm
- Hardness	6 °dH
- TDS (Salinity)	380 mg/l
- Chloride (Cl)	45 mg/l
- Sulfate (SO42)	24 mg/l
- TN (NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺)	1 mg/l
- Calcium	19.1 mg/l
- Magnesium	14 mg/l
- Sodium	100 mg/l
- Potassium	2 mg/l
- Silicate	6 mg/l
- Iron (Fe)	0.01 mg/l
- Manganese (Mn)	0.01 mg/l
- Copper (Cu)	0 mg/l
- Oxygen (O ₂) Dissolved	2 mg/l
- Turbidity	1 NTU
- Fecal coliform	0 / 100 ml

Berdasarkan hasil analisa laboratorium masih memenuhi kriteria yang dibutuhkan untuk digunakan di *engine* MAN.

III. KESIMPULAN

1. Berdasarkan hasil analisa yang sudah dilakukan, sumber air dari Sungai Kayan dapat digunakan

sebagai alternatif untuk digunakan sebagai air proses di pembangkit PLTMG Tanjung Selor 15 MW.

2. Air baku dari Sungai Kayan juga dapat digunakan sebagai alternatif untuk diproses di Sistem WTP dengan tanpa merubah spesifikasi dan kapasitas proses dari sistem di WTP.
3. Manufaktur dari *engine* menyatakan air dari produk WTP dapat digunakan untuk *engine* MAN.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terimakasih kepada :

1. Ibu Dr. Ir. Adriana Anteng Anggorowati, Msi., IPU., ASEAN Eng, yang memberikan bimbingan sehingga penulis dapat menyelesaikan tepat waktu.
2. PT Wijaya Karya Rekayasa konstruksi yang memberikan kesempatan dan waktu bagi penulis untuk mengembangkan ilmu dan pengetahuan melalui program profesi Insinyur.
3. Bapak DR.Ir Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng selaku Kaprodi PSPI UKWMS atas arahan dan bimbingannya.
4. Segenap Pimpinan dan Manajemen dari UKWMS
5. Keluarga yang selalu mendukung dan memberikan semangat dalam menyelesaikan Program Profesi Insinyur.

Referensi

- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (1990). *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 416 Tahun 1990 tentang syarat-syarat dan pengawasan kualitas air*. Jakarta, Indonesia.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2023). *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang persyaratan kualitas air minum*. Jakarta, Indonesia.
- MAN Energy Solutions. *MAN 51/60DF stationary project guide*.
- MAN Energy Solutions. *MAN 51/60DF IMO Tier II & Tier III marine*.
- MAN Energy Solutions. *MDT 51/60DF: Raw water quality for fresh water*.
- Perusahaan Listrik Negara (PLN). *PLN contract book II & III package 3 project guide*.
- United Nations. *Sustainable Development Goal 6: Clean water and sanitation*.
- United Nations. *Sustainable Development Goal 9: Industry, innovation and infrastructure*.



Mengurangi *Six Big Losses* *Idling and Minor Stoppages* Hopper Kosong Tidak Ada WIP Mix pada Produk Kopiko Blanca Twinpack Sebesar 100% dengan Modifikasi Proses dan Mesin

Bayu Irawan¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ bayu31irawan@gmail.com
✉ bayu.irawan@mayora.co.id

PT Torabika Eka Semesta Divisi Ground Coffee merupakan pabrik Mayora Group yang memproduksi Kopi Mix Ground dan Instant dalam kemasan. Salah satu brand produk yang dihasilkan adalah Kopiko Blanca Twinpack, dimana permintaan per bulannya mencapai 900.000 karton. Pencapaian produksi sebesar 88,13% dari 92,00%. Salah satu permasalahan mesin stop produksi karena adanya kendala hopper kosong tidak ada WIP Mix. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi masalah *idling* dan *minor stoppages* yang disebabkan oleh ketidaktersediaan WIP mix. Penelitian ini menggunakan pengumpulan data dan analisa data, dan merancang solusi yang efektif dengan melakukan *trial* dan *error*. *Improvement* yang dilakukan dengan cara modifikasi pipa *storage*, *scraper*, pengunci *hopper* dan material volumetrik. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dengan pengujian dan *improvement* yang dilakukan dapat menjadi metode yang efektif dalam mengatasi masalah *hopper* kosong tidak ada WIP Mix pada Produk Kopiko Blanca Twinpack

Kata kunci: Pencapaian, *Hopper* Kosong, Kopiko Blanca Twinpack, Modifikasi

Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara penghasil kopi terbesar di dunia, dengan hasil produksinya telah diekspor ke berbagai negara. Selain diekspor, kopi juga menjadi minuman favorit bagi sebagian besar masyarakat Indonesia. Seiring waktu, kebiasaan mengonsumsi kopi telah berkembang menjadi bagian dari gaya hidup masyarakat. Meningkatnya minat konsumen terhadap minuman kopi serta kemajuan teknologi dalam pengolahan kopi mendorong produsen untuk mengembangkan dan memperkenalkan beragam varian kopi, salah satunya adalah kopi bubuk kemasan. Produk ini dinilai praktis dan memudahkan konsumen dalam menikmati kopi. Besarnya potensi pasar dan meningkatnya jumlah konsumen kopi bubuk kemasan mendorong para produsen untuk bersaing dalam memperluas pangsa pasar produksi kopi (Angelica et al, 2022).

Kopi merupakan salah satu komoditas perkebunan yang banyak dikonsumsi oleh penduduk Indonesia karena memiliki rasa, aroma, dan warna yang khas. Indonesia merupakan salah satu produsen kopi terbanyak di dunia. Menurut data statistik *International Coffee Organization* (ICO), Indonesia merupakan negara penghasil kopi terbanyak ke-3, setelah Brazil dan Vietnam. Asosiasi Eksportir Kopi Indonesia (AEKI) mencatat bahwa konsumsi kopi orang Indonesia terus naik 36 persen sejak tahun 2016 hingga 2021 (Saolan et al, 2020).

Sejalan dengan meningkatnya permintaan tersebut, sektor industri manufaktur dituntut untuk senantiasa meningkatkan efisiensi dan efektivitas proses produksi guna memenuhi kebutuhan pasar yang semakin kompetitif. Dalam konteks global, peningkatan produktivitas industri juga harus sejalan dengan prinsip pembangunan berkelanjutan yang tertuang dalam *Sustainable Development Goals* (SDGs). Beberapa

tujuan SDGs yang relevan dengan industri kopi, antara lain mendukung pertumbuhan ekonomi dan pekerjaan yang layak, memastikan konsumsi, dan produksi yang bertanggung jawab, menyediakan energi bersih dan efisien, serta menjaga kesehatan dan keselamatan kerja. Implementasi SDGs pada sektor industri kopi menjadi penting, karena keberhasilan bisnis tidak hanya diukur dari profit, tetapi juga dari kontribusinya terhadap lingkungan, masyarakat, dan kesejahteraan karyawan.

PT Torabika Eka Semesta, salah satu anak perusahaan Mayora Group yang bergerak di bidang produksi kopi *ground* dan instan, menghadapi tantangan dalam pencapaian target produksi, khususnya pada lini produk Kopiko Blanca Twinpack. Produk ini memiliki volume permintaan tinggi yang mencapai lebih dari 900.000 karton per bulan, namun pada periode Oktober hingga Desember 2024, pencapaian produksinya hanya sebesar 88,83% dari target 92,00%. Analisis awal menunjukkan bahwa salah satu penyebab utama ketidaktercapaian target produksi adalah tingginya angka *idling* dan *minor stoppages* yang diakibatkan oleh kondisi hopper kosong akibat tidak tersedianya WIP (*Work In Progress*) Mix. Berdasarkan data *Six Big Losses*, *idling*, dan *minor stoppages* berkontribusi sebesar 43,64% dari total kerugian waktu produksi, dengan waktu henti akibat hopper kosong mencapai 6.789 menit atau 60,36% dari total waktu *minor stoppages* yang dapat dihindari.

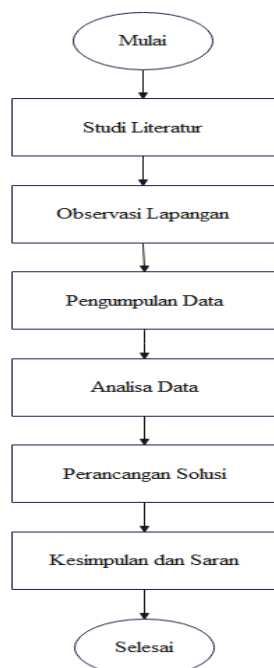
Masalah ini berdampak langsung terhadap berbagai aspek kinerja operasional, antara lain penurunan produktivitas, potensi keluhan pelanggan akibat ketidaksesuaian produk, peningkatan beban kerja tenaga operasional, serta risiko keselamatan kerja akibat seringnya proses *start-stop* mesin. Oleh karena itu, diperlukan upaya perbaikan berkelanjutan yang sistematis dan terukur. Penelitian ini diharapkan tidak hanya meningkatkan pencapaian produksi, tetapi juga

memberikan nilai tambah dalam aspek kualitas, efisiensi biaya, pengiriman, keselamatan kerja, dan moral kerja karyawan.

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Quality Control Circle* (QCC) dalam rangka mengidentifikasi akar penyebab masalah dan merancang solusi yang tepat melalui modifikasi proses dan mesin. Metode yang digunakan mencakup analisis, serta validasi melalui pengumpulan dan analisis data kuantitatif. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengeliminasi kejadian *hopper* kosong akibat ketiadaan *WIP Mix* sebesar 100% pada lini produksi Kopiko Blanca Twinpack selama periode Januari-Maret 2025. Diharapkan hasil dari implementasi perbaikan ini mampu meningkatkan pencapaian produksi, menurunkan *downtime* mesin, dan memberikan kontribusi terhadap efisiensi biaya serta kualitas produk.

Quality Control Circle (QCC) adalah konsep yang berfokus pada menghilangkan aktivitas yang tidak mempunyai nilai tambah (*non-value added activity*) agar proses bekerja lebih efisien, sedangkan *six sigma* lebih menekankan pada pemuasan keinginan pelanggan dengan menghilangkan kecacatan atau ketidaksesuaian (Triwuni & Nugroho, 2023). Hal ini untuk menjamin manajemen dapat memperbaiki dan mempertahankan kualitas produk yang dihasilkan dan mengeliminasi pemborosan yang terjadi pada proses manufaktur sehingga memenuhi keinginan pelanggan (Soet, 2024).

Metode



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Sumber: Hia (2024)

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif-kuantitatif dengan metode *case study* berbasis *Quality Control Circle* (QCC). Objek penelitian adalah lini produksi Kopiko Blanca Twinpack di PT Torabika Eka Semesta Divisi Ground Coffee. Data dikumpulkan melalui:

- Observasi langsung (*GENBA*) terhadap aktivitas pengisian *hopper*.

- Wawancara dengan operator, teknisi, dan supervisor produksi.
- Pengukuran parameter proses seperti waktu pengisian *WIP Mix*, kondisi volumetrik, suhu dan kelembaban ruangan.
- Pengambilan data *downtime* mesin (*idling* dan *minor stoppages*) dari laporan produksi harian, mingguan, dan bulanan.

Analisis dilakukan menggunakan:

- Analisis 5-*Why* untuk identifikasi akar penyebab.
- Analisis perbandingan kondisi sebelum dan sesudah perbaikan, serta validasi hasil menggunakan indikator *Key Performance Indicator* (KPI).

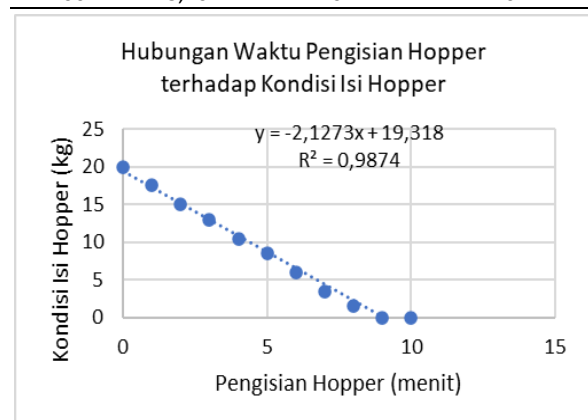
Hasil Kerja

Hasil analisis menunjukkan bahwa penyebab dominan dari terjadinya *hopper* kosong adalah:

1. Belum adanya sistem transfer *WIP Mix* menggunakan *storage*.
2. *Setting scrapper* tidak dapat di-*adjust*, menyebabkan distribusi material tidak merata.
3. Tidak ada standar jarak antara *hopper* dan *disk* piringan, yang memengaruhi aliran material.

Tabel 1. Pengamatan Pengisian Hopper dengan Kondisi Isi Hopper

Hasil ZD (pcs)	Hasil in Kg	Pengisian Hopper (menit)	Kondisi Isi Hopper (Kg)
0	0	0	20
40	2,32	1	17,5
80	4,64	2	15
120	6,96	3	13
160	9,28	4	10,5
200	11,60	5	8,5
240	13,92	6	6
280	16,24	7	3,5
320	18,56	8	1,5
360	20,88	9	0
400	23,20	10	0

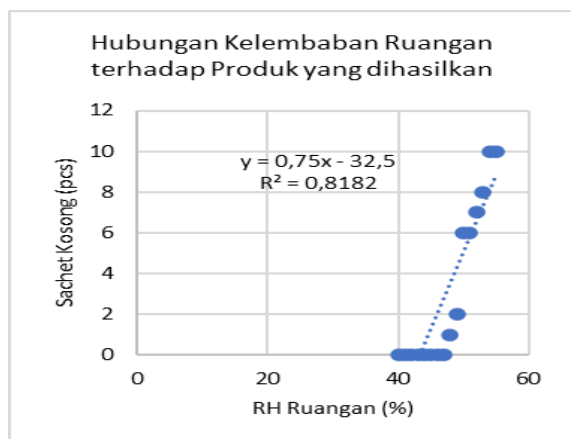


Gambar 2. Hubungan Waktu Pengisian Hopper terhadap Kondisi Isi Hopper

Berdasarkan Tabel 1 dan Gambar 2, semakin cepat pengisian *hopper*, maka kondisi *hopper* tidak kosong. Hal ini sesuai pada *scatter* diagram didapatkan hubungan korelasi yang kuat (nilai $r = 0,9936$).

Tabel 2. Pengamatan *Sachet Kosong*

RH (%)	<i>Sachet Kosong</i> (pcs)	Kondisi Volumetrik	<i>Sachet Kosong</i>
40	0	Bersih	Tidak
41	0	Bersih	Tidak
42	0	Bersih	Tidak
43	0	Bersih	Tidak
44	0	Bersih	Tidak
45	0	Bersih	Tidak
46	0	Bersih	Tidak
47	0	Bersih	Tidak
48	1	Agak Berkerak	Ya
49	2	Agak Berkerak	Ya
50	6	Lengket, Berkerak	Ya
51	6	Lengket, Berkerak	Ya
52	7	Lengket, Berkerak	Ya
53	8	Lengket, Berkerak	Ya
54	10	Lengket, Berkerak	Ya
55	10	Lengket, Berkerak	Ya

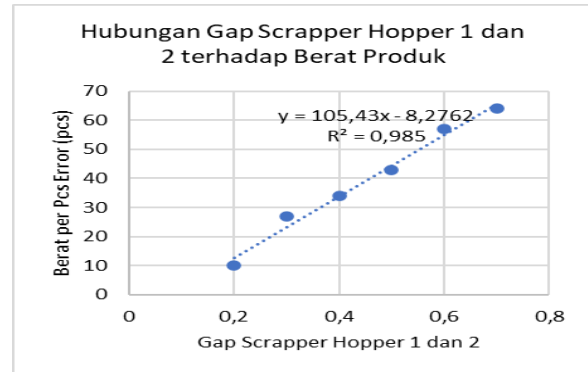


Gambar 3. Hubungan Kelembaban Ruang terhadap Produk yang Dihasilkan

Berdasarkan Tabel 2 dan Gambar 3 di atas, jumlah sachet kosong dipengaruhi RH ruangan dan kondisi volumetrik yang lengket dan berkerak. Hal ini dibuktikan dari grafik scatter diagram, dimana nilai $r = 0,9045$ merupakan korelasi positif kuat, dimana adanya hubungan yang kuat antara pengaruh kelembaban ruangan terhadap produk yang dihasilkan.

Tabel 3. Pengamatan Berat Tidak Standar

Hopper 1 (cm)	Hopper 2 (cm)	Gap Scrapper (cm)	Berat per pcs Error (pcs)
1	1,2	0,2	10
1,2	1,5	0,3	27
1,4	1,8	0,4	34
1,6	2,1	0,5	43
1,8	2,4	0,6	57
2	2,7	0,7	64

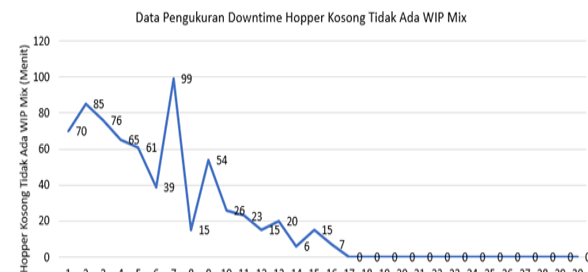


Gambar 4. Hubungan *Gap Scrapper Hopper* 1 dan 2 terhadap Berat Produk

Berdasarkan tabel di atas, adanya *gap scrapper* akan mempengaruhi berat produk. Hal ini sesuai pada grafik scatter hasil nilai $r = 0,9924$, semakin besar *gap scrapper hopper* 1 dan 2, maka semakin tinggi berat per pcs error/tidak stabil.

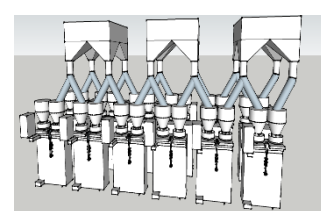
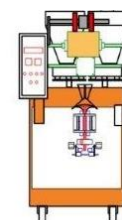
Modifikasi Pipa Storage

Perubahan metode engisian *WIP Mix* ke dalam *hopper* dilakukan sebelumnya manual (Gambar 6) menjadi semi otomatis menggunakan *tote bin* dan *storage* penampung (Gambar 7) menghasilkan penurunan *downtime hopper* kosong tidak ada *WIP mix*.



Gambar 5. Data Pengukuran *Downtime Hopper* Kosong

Berikut ini *layout improvement* yang dilakukan diarea proses produksi Kopiko Blanca Twinpack.



Gambar 6 Before

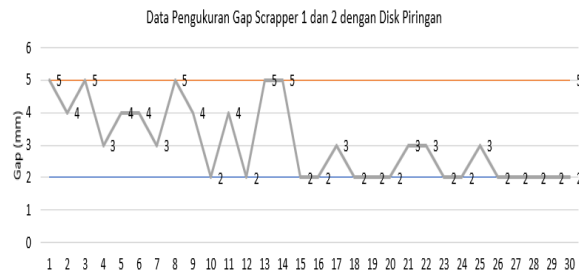
Gambar 7 After

Pada Gambar 5 menjelaskan bahwa sebelum perbaikan rata-rata *downtime hopper* kosong tidak ada *WIP Mix* sebesar 217 menit/week. Selama progress pemasangan modifikasi pipa *storage*, rata-rata *downtime hopper* kosong tidak ada *WIP Mix* berkurang menjadi 33 menit/week. Setelah perbaikan selesai dilakukan, rata-rata *downtime hopper* kosong tidak ada *WIP Mix* menjadi 0 menit/week. Penggunaan sistem transfer *WIP Mix* menggunakan modifikasi pipa ini, mempermudah proses produksi, dimana frekuensi *hopper* kosong dapat berkurang karena adanya

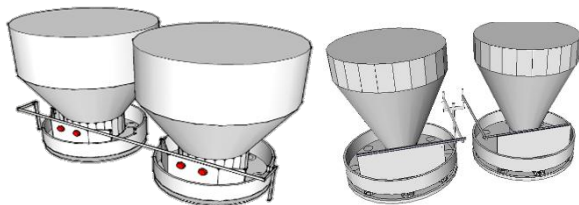
penampungan yang secara continue akan mengisi hopper.

Modifikasi Scrapper

Scrapper pada mesin menyatu antara *hopper* 1 dan *hopper* 2 (Gambar 9) menyebabkan kesulitan saat *setting* sisi *hopper* 1 dengan *hopper* 2. Hal ini mengakibatkan berat produk menjadi tidak standar. *Improvement* yang dilakukan dengan modifikasi *scrapper* pada mesin terpisah antara *hopper* 1 dan *hopper* 2 (Gambar 10). Tujuan modifikasi ini adalah menghilangkan selisih *gap* antara *scrapper* *hopper* 1 dan *hopper* 2 dengan *disk* piringan. *Range gap* *scrapper* 1 dan 2 dengan *disk* piringan 2-5 mm.



Gambar 8 Data Pengukuran Gap Scrapper 1 dan 2 dengan Disk Piringan



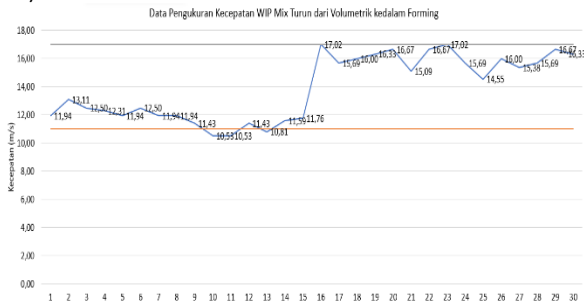
Gambar 9 Before

Gambar 10 After

Pada Gambar 8 menjelaskan bahwa sebelum perbaikan rata-rata *gap* *scrapper* 1 dan 2 dengan *disk* piringan sebesar 0,6 cm. Selama progress pemasangan modifikasi *scrapper* terpisah, rata-rata *gap* berkurang menjadi 0,2 cm. Setelah perbaikan selesai dilakukan, rata-rata *gap* berkurang menjadi 0 cm. Penggunaan modifikasi *scrapper* terpisah ini mempermudah proses *setting* *scrapper* 1 dan 2, karena pengaturan *scrapper* 1 dan 2 terpisah.

Modifikasi Volumetrik

Permasalahan yang terjadi bagian dalam volumetrik tidak rata dan permukaan kasar (Gambar 12), sehingga adanya proses Proses pemolesan bagian dalam pada volumetrik, permukaan bagian dalam licin dan rata (Gambar 13).



Gambar 7. Data Pengukuran Kecepatan WIP Mix Turun ke Dalam Forming



Gambar 12 Before



Gambar 13 After

Pada Gambar 11 menjelaskan sebelum perbaikan rata-rata kecepatan WIP Mix turun dari volumetrik kedalam forming sebesar 11,27 m/s. Selama progress pemasangan modifikasi volumetrik, rata-rata kecepatan WIP Mix turun dari volumetrik kedalam forming sebesar 14,94 m/s. Setelah perbaikan selesai dilakukan, rata-rata kecepatan sebesar 16,21 m/s.

Pada Gambar 14 bahwa hasil evaluasi yang diperoleh *downtime idling and minor stoppages* hopper kosong dapat hilang dengan *improvement* yang dilakukan.



Gambar 14 Evaluasi Hasil

Tabel 4. *Idling and Minor Stoppages* Sebelum Perbaikan

Kode	<i>Idling dan Minor Stoppages</i>	Menit	%	%Kumulatif
D	Hopper Kosong Tidak ada WIP Mix	6.789	60,36	60,36
S	Cellophane Tidak Standar	2.922	25,98	86,34
BU	Cleaning Hopper	1.005	8,94	95,27
BH	Hopper Kosong Karena Gula Batu Lain-lain	532	4,73	100,00
		-	-	100,00

Tabel 5. *Idling and Minor Stoppages* Setelah Perbaikan

Kode	<i>Idling dan Minor Stoppages</i>	Menit	%	%Kumulatif
S	Cellophane Tidak Standar	18.239	80,49	80,49
BS	Hopper Kosong Karena Masalah Bagdump	1.516	6,69	87,18
BU	Cleaning Hopper	1.184	5,23	92,41
BG	Hopper Kosong Karena Mixer Rusak	626	2,76	95,17
CH	Sambungan Cello	485	2,14	97,31
CO	WIP Mix Tidak Turun ke Dalam Forming	248	1,10	98,41
BH	Hopper Kosong Karena Gula Batu	246	1,09	99,49
BY	Mesin Off Karena Gudang FG Penuh	45	0,20	99,69



BX	Mesin <i>Off</i> Masalah <i>Pallet/ Line</i> Penuh dengan FG	35	0,15	99,85
CB	<i>Cleaning</i> Piringan	35	0,15	100,00
D	<i>Hopper</i> Kosong Tidak Ada <i>WIP Mix</i>	-	0,00	100,00

Pada Gambar 14 dan Tabel 5 menunjukkan data bahwa permasalahan *hopper* kosong tidak ada *WIP Mix* sebesar 6.789 menit turun menjadi 0 menit. Pada Tabel 6 merupakan *value added* yang didapatkan dari penelitian ini.

Tabel 6. Analisa Nilai Tambah terhadap QCDSM

Aspek Mutu	Sasaran Awal	Hasil Akhir	Dampak Positif
Quality	Terjadi penyimpangan produk isi kurang (<i>customer complaint</i> >1)	Zero Customer Complaint	Tidak ada komplain
Cost	Biaya DL Cost (Rp/kg) 398	Biaya DL Cost (Rp/kg) 392	Efisiensi <i>man power</i> isi <i>hopper</i> manual
Delivery	Kapasitas <i>stuffing</i> Kopiko	Kapasitas <i>stuffing</i>	Pengiriman FG lancar sesuai
	Blanca Twin Pack 58 container/week	meningkat menjadi 60 container/week	dengan <i>planning stuffing</i>
Safety	Tidak terjadi kecelakaan kerja	Zero Accident (ZA = 0 Kejadian)	Metode pengisian <i>hopper</i> menjadi lebih mudah
Morale	<i>Labour Produktivty</i> sebelumnya 25,30 MH/ton	<i>Labour Produktivty</i> meningkat menjadi 21,88 MH/ton	Meningkatnya semangat kerja operator

Sumber: Prastya et al, (2024)

Total Saving Cost Rp 1.283.560.903/tahun dengan *payback period* dalam 5 bulan. Adapun standarisasi proses yang dibuat agar penelitian ini dapat terimplementasi untuk produk lainnya, antara lain pembuatan *one point lesson* modifikasi pipa *storage* untuk mesin *twinpack*, modifikasi *scraper* dan volumetrik, serta pembuatan standar *gap output hopper* dan *scraper* dengan *disk* piringan.

Kesimpulan

Setelah implementasi, waktu *downtime* akibat *hopper* kosong turun dari 6.789 menit menjadi 0 menit, atau berkurang sebesar 100%. Hal ini berdampak pada peningkatan pencapaian produksi dari 88,83% menjadi 92,05% serta peningkatan produktivitas tenaga kerja (*Labour Productivity*) dari 25,30 menjadi 24,90 MH/ton. Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan Gugus Kendali Mutu (GKM) efektif dalam mengidentifikasi dan menyelesaikan permasalahan produksi. Modifikasi sistem pengisian *WIP Mix* dan komponen mesin secara signifikan berhasil mengurangi *idling* dan *minor stoppages* akibat *hopper* kosong sebesar 100%. Perbaikan yang dilakukan juga berdampak positif terhadap pencapaian target produksi dan efisiensi biaya tenaga kerja.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada manajemen PT Torabika Eka Semesta Divisi Ground Coffee atas kesempatan dan dukungan yang telah diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada keluarga yang selalu mendukung saya, serta kepada seluruh tim *factory* atas kerja sama, dedikasi, dan kontribusi aktif dalam proses identifikasi masalah hingga implementasi solusi.

Referensi

- Angelica, N., Pringgo, D., & Laksono, W. (2022). Perbaikan kualitas kemasan kopi instan menggunakan metode Six Sigma pada PT XYZ. *Seminar dan Konferensi Nasional IDEC*, 1, 1–9.
- Hia, S. (2024). Studi literatur lean Six Sigma dan implementasi di perusahaan manufaktur Indonesia. *Media Ilmiah Teknik Industri*, 23(2), 136–140.
- Pertiwi, M. (2023). Sustainable Development Goals (SDGs) dan perwujudan perdamaian di dunia. *Jurnal Pekerjaan Sosial*, 6(1), 86–89.
- Prastya, F., Bina, U., & Informatika, S. (2024). Penerapan metode Six Sigma dalam menganalisa pengendalian kualitas produk Beng-Beng pada divisi wafer PT Mayora Indah Tbk. *Jurnal Penelitian Rumpun Ilmu Teknik*, 3(4), 37–48.
- Saolan, S., Sukainah, A., & Wijaya, M. (2020). Pengaruh jenis kemasan dan lama waktu penyimpanan terhadap mutu bubuk kopi robusta (*Coffea robusta*). *Jurnal Pendidikan Teknologi Pertanian*, 6(2), 337–338.
- Soet, A. (2024). Defective coffee beans reduction: A case study of small-scale coffee beans production in Shan State, Myanmar. 14(1), 29–58.
- Triwuni, Z., & Nugroho, Y. A. (2023). Upaya pengurangan produk cacat pada air dalam kemasan cup 250 ml di PT Duta Putra Lexindo (Bolesa) menggunakan metode lean Six Sigma. *Jurnal TRINISTIK: Jurnal Teknik Industri, Bisnis Digital, dan Teknik Logistik*, 2(1), 16–20.



Optimalisasi Proses Pembuatan Pigmen Masterbatch untuk Menurunkan Persentase Yarn Waste Poliester

Felix Natanael Ongkowidjojo¹, Suryadi Ismadji²

^{1,2} Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

¹ PT Ateja Tritunggal

✉ felixnatanael62@gmail.com

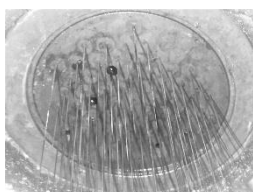
Proses pembuatan pigmen *masterbatch* berperan penting dalam menghasilkan serat poliester berwarna dengan kualitas yang stabil. Namun, variasi kualitas *masterbatch* yang tidak terkontrol dapat menyebabkan peningkatan *yarn waste* selama proses *spinning*. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan parameter proses pembuatan pigmen *masterbatch* guna menurunkan persentase *yarn waste* pada produksi benang poliester. Metodologi pengembangan dilakukan melalui evaluasi parameter kunci pada proses pencampuran dan dispersi pigmen, meliputi pemilihan ukuran mesh *filter*, pengendalian kadar residu pada pigmen, serta pengaruhnya pada penurunan *yarn waste* pada proses *spinning*. Hasil implementasi menunjukkan bahwa perbaikan pada spesifikasi *filter mesh* mampu menurunkan jumlah pengotor dan meningkatkan keseragaman dispersi pigmen. Selain itu, pengendalian residu pada pigmen memperbaiki kualitas lelehan polimer sehingga mengurangi gangguan aliran selama proses *spinning*. Hasil optimasi menunjukkan penurunan rata-rata persentase *yarn waste* dari 14,42% menjadi 5,74%. Studi ini memberikan rekomendasi teknis bagi industri tekstil berbasis polimer dalam mengendalikan kualitas bahan berwarna dan menurunkan tingkat limbah produksi.

Kata kunci: Pigmen, *Masterbatch*, Benang Poliester, Filtrasi, *Yarn Waste*, Infrastruktur Berkelanjutan

Pendahuluan

Proses pembuatan benang poliester merupakan rangkaian proses yang memerlukan kestabilan tinggi, baik pada tahap pembuatan bahan baku, pelelehan polimer, maupun pada saat pemintalan benang. Salah satu faktor penting yang memengaruhi stabilitas proses tersebut adalah kualitas pigmen *masterbatch* yang digunakan sebagai bahan pewarna serat poliester. Pigmen *masterbatch* berfungsi tidak hanya sebagai media pewarna, tetapi juga berperan dalam menjaga homogenitas dispersi pigmen serta kompatibilitasnya dengan matriks polimer poliester (Buccella, 2014).

Pada praktik proses produksi, permasalahan yang sering muncul adalah proses pembuatan pigmen *masterbatch* yang belum optimal seperti aglomerasi partikel warna serta pengotor yang mengakibatkan fluktuasi laju polimer saat proses *spinning*. Pengotor tersebut melewati *spin pack* dan menutupi lubang spinneret pada proses *spinning* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 pengotor tersebut mengganggu aliran filamen sehingga dapat menyebabkan *broken filament* yang meningkatkan jumlah persentase *yarn waste*.



Gambar 1. Penyumbatan Lubang Spinneret Akibat Pengotor pada Pigmen

Pada Tabel 1 merupakan hasil pengamatan produksi pada periode 29 Mei 2024 hingga 16 November 2024, pada 5 *batch* produksi tersebut mengalami rata-rata *yarn waste* sebesar 14,42% dari total *output* produksi. Persentase *yarn waste* yang tinggi dapat berdampak pada peningkatan biaya operasional.

Tabel 1. Data Produksi Benang Poliester

Batch	Tanggal Produksi	Good Product (kg)	Yarn waste (kg)	Persentase Yarn waste (%)
1	29 Mei 2024 – 11 Juni 2024	3.087,61	876,95	22,12
2	8 Juli 2024 – 16 Juli 2024	4.390,38	390,84	8,17
3	26 Agustus 2024 – 27 Agustus 2024	439,86	373,55	45,92
4	6 Oktober 2024 – 10 Oktober 2024	2.985,42	428,00	12,54
5	9 November 2024 – 16 November 2024	3.822,22	411,75	9,72
Rata-rata		2.945,09	496,21	14,42%

Kualitas pigmen *masterbatch* sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti pengotor dan partikel pigmen (Akhras et al, 2024). Pengotor tersebut adalah padatan non-volatil berukuran besar seperti debu, partikel gel, dan polimer lainnya. Sedangkan partikel pada pigmen tersebut berasal dari tingginya konsentrasi pewarna dengan bahan dasar karbon dan logam berat

seperti nikel, zinc, tembaga, dan sebagainya (Velusamy et al, 2021). Semakin pekat warna benang yang diinginkan maka semakin tinggi konsentrasi atau jumlah logam berat maupun karbon pada pigmen (Hricová & Marcincin, 2009). Hal tersebut berdampak pada semakin meningkatnya ketidakseragaman partikel pada pigmen dan benang *polyester* yang dihasilkan pada proses *spinning* yang berpotensi menimbulkan terjadinya aglomerasi pigmen (Safraoui et al, 2021). Aglomerasi pada pigmen merupakan pengumpulan partikel-partikel pigmen menjadi agregat yang lebih besar yang tidak mampu menyatu secara homogen dalam matriks polimer (Benetti et al, 2014). Tanpa filtrasi yang efektif, pengotor dan partikel pigmen yang tidak larut pada polimer dapat lolos dan mengganggu kestabilan proses (Akhras et al, 2024).

Oleh karena itu, dibutuhkan upaya optimalisasi proses pembuatan pigmen *masterbatch* melalui penggunaan filter pada mulut ekstruder (*die head ekstruder*) diharapkan dapat meningkatkan kualitas produk dan mengurangi *yarn waste* yang dihasilkan. Melalui penelitian ini, diharapkan proses filtrasi dapat meningkatkan stabilitas proses *spinning* poliester serta memberikan kontribusi terhadap pengembangan standar proses *masterbatch* yang lebih stabil dan efisien. Penelitian ini juga menjadi wujud implementasi tujuan *Sustainable Development Goals* (SDG's) atau tujuan pembangunan berkelanjutan untuk menghadapi berbagai tantangan utama. Tujuan SGD's nomor 9 yaitu membangun infrastruktur yang tangguh, mempromosikan industrialisasi yang inklusif dan inovasi sangat relevan dengan tujuan penelitian ini untuk menurunkan persentase *yarn waste* produksi benang poliester (Thakker & Sun, 2023).

Metode

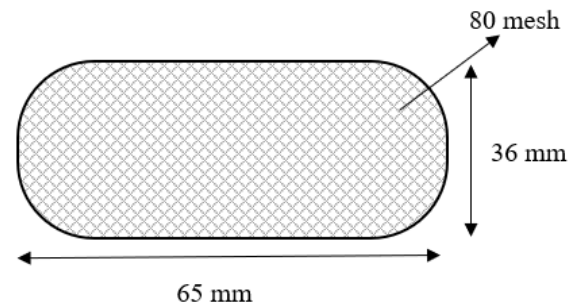
Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan mesin ekstruder poliester dengan penambahan *filter mesh* 80 yang disesuaikan dengan ukuran *die head ekstruder*. Proses pembuatan pigmen dilakukan dengan suhu 270°C sesuai dengan suhu standar produksi. Desain rencana yang digunakan dengan melibatkan faktor utama yaitu proses filtrasi dengan satu kali filtrasi dan dua kali filtrasi untuk mengetahui padatan kasar yang menyebabkan aglomerasi pada pigmen dan pengaruhnya terhadap persentase *yarn waste* dari produksi *spinning*. Filter hasil proses pembuatan pigmen kemudian dibakar pada suhu 550°C untuk mendapatkan pengotor yang tersaring. Pengotor berupa karbon, logam berat, dan debu yang tidak dapat terdispersi dengan pigmen selama proses ekstrusi, sehingga dapat mengganggu aliran proses ekstrusi dan menyumbat lubang spinneret pada proses *spinning*. Proses filtrasi tersebut diharapkan dapat mengurangi kadar padatan kasar dan mampu menurunkan persentase *yarn waste* pada produksi *spinning*.

Hasil Kerja

Perancangan Filter Mesh

Hasil analisis permasalahan pada produksi *spinning*, diketahui bahwa tingginya persentase *yarn waste* disebabkan oleh ketidakstabilan aliran lelehan polimer

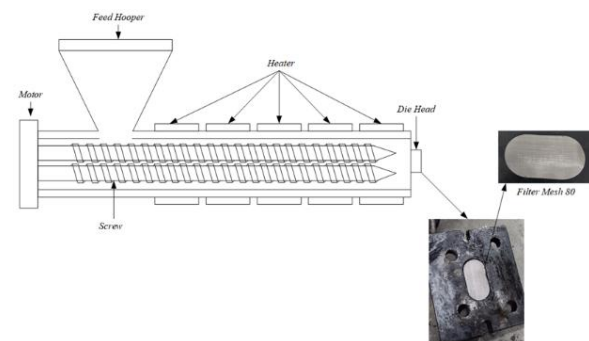
yang bersumber pada pigmen *masterbatch* dengan partikel padat yang lolos pada proses ekstruksi terbukti menimbulkan penyumbatan pada spinneret. Sebagai langkah perbaikan, dilakukan optimalisasi peroses pembuatan pigmen *masterbatch* untuk pigmen poliester dengan menambahkan *filter mesh* 80 pada mulut ekstruder. Filter tersebut berfungsi sebagai penyaring yang menahan partikel padat, aglomerat pigmen, kontaminasi berukuran besar agar tidak terbawa pada produk. *Filter mesh* 80 dirancang sesuai dengan ukuran *die head ekstruder* dengan spesifikasi pada Gambar 1.



Gambar 1. Spesifikasi Filter Mesh

Pemasangan Filter Mesh pada Die Head Ekstruder

Pemasangan *filter mesh* 80 diletakkan pada *die head* ekstruder, tepat sebelum proses keluarnya pigmen dari mulut ekstruder. Filter tersebut berfungsi sebagai penyaring untuk memastikan hanya material yang terdispersi dengan baik yang dapat melewati proses ekstruksi. Selama proses tersebut, pengotor maupun partikel pigmen yang belum terdispersi secara sempurna akan tertahan pada permukaan filter. Dengan demikian, hanya cairan polimer yang homogen dan partikel pigmen yang terdistribusi dengan baik yang dapat keluar dari ekstruder. Ilustrasi mekanisme penyaringan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2, yang menunjukkan posisi *filter mesh* pada ekstruder.



Gambar 2. Ilustrasi Pemasangan Filter Mesh pada Die Head Ekstruder

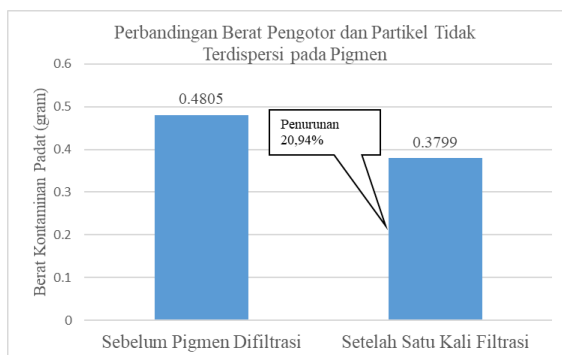
Hasil filtrasi pigmen yang dilakukan dapat menyaring pengotor dan partikel pigmen yang tidak terdispersi akan tersaring pada filter. Proses filtrasi tersebut dapat menurunkan persentase pengotor dan menghasilkan pigmen yang terdispersi secara merata. Pengotor dan partikel pigmen yang tidak terdispersi yang mampu tersaring pada filter dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Pengotor yang Tersaring pada Filter

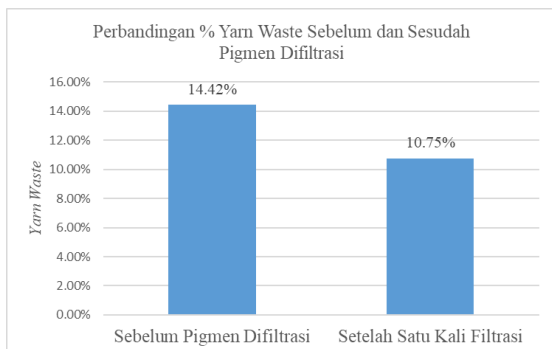
Hasil Filtrasi Pigmen *Masterbatch*

Pengotor dan partikel pigmen yang tidak terdispersi pada filter kemudian diuji persentase beratnya dengan metode pembakaran pada suhu 550°C. Pembakaran tersebut bertujuan untuk memperoleh berat murni dari pengotor dan partikel yang tidak terdispersi menjadi abu sehingga dapat dipisahkan dari filter dan dapat dilakukan penimbangan. Pengotor dan partikel tidak terdispersi pada pigmen sebelum filtrasi adalah 0,4805 gram dalam 1 kg pigmen, setelah proses filtrasi menjadi 0,3799 gram dalam 1 kg pigmen. Perbandingan berat pengotor sebelum dan setelah filtrasi ditunjukkan pada Gambar 4 berikut.



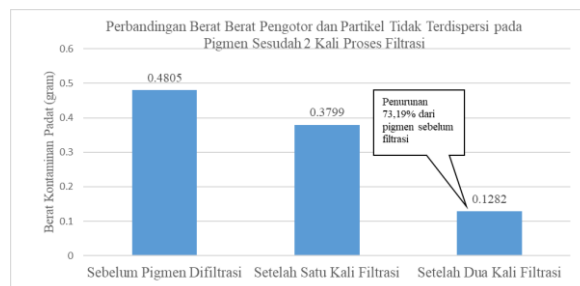
Gambar 4. Perbandingan Berat Pengotor dan Partikel Tidak Terdispersi pada Pigmen Sebelum dan Setelah Filtrasi

Dari Gambar 4 terlihat penurunan pengotor pada produk hasil ekstrusi setelah penambahan filter 80 mesh pada mulut ekstruder sebesar 20,94%. Hasil produksi pigmen *masterbatch* yang sudah melalui proses filtrasi kemudian digunakan pada proses *spinning*, untuk menguji pengaruhnya terhadap persentase *yarn waste* yang dihasilkan.



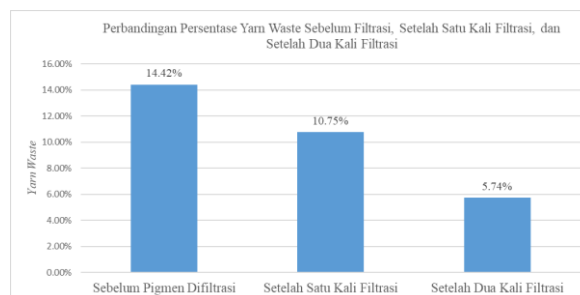
Gambar 5. Perbandingan Persentase *Yarn waste* Setelah Pigmen Satu Kali Filtrasi

Pada Gambar 5 terlihat penurunan persentase *yarn waste* yang dihasilkan setelah filtrasi pigmen dari 14,42% menjadi 10,75%. Terjadi penurunan yang tidak signifikan terhadap persentase *yarn waste* dan masih terdapat kejadian *broken filament* akibat lubang spinneret yang tersumbat. Oleh karena itu, dilakukan evaluasi proses dengan menambahkan proses filtrasi kedua untuk pigmen *masterbatch* tersebut. Pigmen *masterbatch* dilelehkan melalui proses ekstrusi dan dilewatkan pada *filter mesh* 80 sebanyak 2 kali. Hasil dari pigmen *masterbatch* yang difiltrasi sebanyak 2 kali kemudian diuji persentase pengotor dan pengaruhnya terhadap penurunan persentase *yarn waste* pada proses *spinning*.



Gambar 6. Perbandingan Berat Pengotor dan Partikel Tidak Terdispersi pada Pigmen Sebelum Filtrasi, Setelah Satu Kali Filtrasi, dan Setelah Dua Kali Filtrasi

Gambar 6 menunjukkan perbandingan persentase pengotor dan partikel pigmen yang tidak terdispersi pada pigmen sebelum proses filtrasi, setelah dilakukan satu kali filtrasi, dan dua kali filtrasi. Pengotor pada pigmen menurun hingga 0,1282 gram dalam 1 kg pigmen setelah proses filtrasi kedua. Hasil penurunan pengotor pada pigmen setelah difiltrasi kedua kalinya sebesar 73,19%. Peningkatan frekuensi filtrasi tersebut kemudian diamati kontribusinya terhadap pengurangan *yarn waste* yang dihasilkan selama proses *spinning*. Perbandingan *yarn waste* yang dihasilkan pada pigmen sebelum proses filtrasi, filtrasi satu kali, dan dua kali filtrasi disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan Persentase *Yarn Waste* Sebelum Filtrasi, Setelah Filtrasi Satu Kali, dan Setelah Filtrasi Dua Kali

Penurunan persentase pengotor dari proses filtrasi kedua kalinya berdampak pada penurunan persentase *yarn waste* yang dihasilkan. Hal tersebut tercatat selama produksi 5 *batch* pada periode 27 Desember 2024 hingga 25 April 2025, rata-rata persentase *yarn waste* sebesar 5,74%. Berdasarkan penelitian ini, optimalisasi pembuatan pigmen *masterbatch* dengan

penambahan filter berhasil menekan persentase *yarn waste* sebesar 8,66%.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi kasus mengenai optimalisasi pembuatan pigmen *masterbatch*, dapat disimpulkan bahwa kualitas pigmen *masterbatch* memiliki pengaruh signifikan terhadap kestabilan proses *spinning* pada produksi benang poliester. Pigmen yang tidak terdispersi sempurna dan mengandung pengotor menyebabkan aglomerasi serta penyumbatan pada lubang spinneret, sehingga menimbulkan *broken filament* dan peningkatan *yarn waste*. Upaya optimalisasi dilakukan melalui penambahan *filter mesh* 80 pada mulut ekstruder untuk menyaring pengotor dan partikel pigmen yang tidak terdispersi selama proses ekstrusi.

Hasil dari implementasi tersebut menunjukkan bahwa proses filtrasi satu kali mampu menurunkan kadar pengotor dari 0,4805 gram/kg menjadi 0,3799 gram/kg atau berkurang sebesar 20,94% dengan penurunan *yarn waste* dari 14,42% menjadi 10,74%. Hasil tersebut tidak menunjukkan perubahan signifikan terhadap penurunan *yarn waste*, oleh sebab itu dilakukan proses filtrasi pigmen sebanyak dua kali. Proses filtrasi pigmen sebanyak dua kali menghasilkan penurunan pengotor yang lebih signifikan. Pengotor berkurang dari 0,4805 gram/kg menjadi 0,1282 gram/kg atau berkurang sebesar 73,19%. Hal tersebut berdampak pada penurunan rata-rata persentase *yarn waste* dari 14,42% menjadi 5,74%. Dengan demikian, penerapan sistem filtrasi ganda pada proses pembuatan pigmen *masterbatch* terbukti efektif dalam menurunkan kadar pengotor, serta menurunkan persentase *yarn waste* sebesar 8,66% pada produksi benang poliester.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas segala bantuan yang telah diberikan, kepada:

1. Bapak Prof. Ir. Suryadi Ismadji, M.T., Ph.D., IPU., ASEAN Eng. selaku dosen pembimbing yang memberikan masukan dan meluangkan waktunya untuk membimbing penulis dalam menyelesaikan artikel ini;
2. Bapak Ir. Ferdy Gosal, S.T., IPM. selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan saran terhadap artikel yang telah dibuat;
3. Bapak Iswantara selaku atasan penulis di PT Ateja Tritunggal yang memberikan ilmu dan bimbingan kepada penulis dalam untuk menyelesaikan program profesi insinyur;
4. Rekan-rekan kerja di PT Ateja Tritunggal yang membantu penulis dalam penyusunan artikel ini.

Referensi

Akhras, M. H., Marschik, C., Chung, C. N., Traxler, I., Kruta, K., Kloiber, K., & Fischer, J. (2024). Assessment of property profile of post-industrial polypropylene recyclates through a multivariable recycling process.

Journal of Applied Polymer Science, 141(31).
<https://doi.org/10.1002/app.55731>

Benetti, F., Buccella, M., Caciagli, A., Cozza, N., Deirmina, F., Sultan, D., Giusti, G., Schneider, E., & Tondini, S. (2014). Identification of colored-masterbatch process parameters with greater influence on pigment dispersion and color perception. Retrieved from <http://www.aquafil.com/>

Buccella, M. (2014). *Color masterbatches for polyamide 6 fibers: Optimization of compounding and spinning processes; physical-chemical characterization of industrial products*.

Hricová, M., & Marcincin, A. (2009). Effect of black pigments on spinning and non-uniformity of pigmented polyester fibres. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/293822955>

Safraoui, L., Benhadou, B., Haddout, A., & Benhadou, M. (2021). Influence of paraffin wax and premixing processing method on dispersion quality. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 8(3), 1–11. Retrieved from <http://iaeme.com/Home/issue/IJARET>

Thakker, A. M., & Sun, D. (2023). Sustainable development goals for textiles and fashion. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(46), 101989–102009. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29453-1>

Velusamy, S., Roy, A., Sundaram, S., & Kumar Mallick, T. (2021). A review on heavy metal ions and containing dyes removal through graphene oxide-based adsorption strategies for textile wastewater treatment. *Chemical Record*, 21(7), 1570–1610. <https://doi.org/10.1002/tcr.202000153>

Implementasi *GIROBO BIOFECT* Metode *Rapid Smell Test* Berbasis Iot Untuk Minimasi Biaya *Reject Galon* AMDK

Dwi Anggraini Futurhesa¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ futurhesa@gmail.com

Koperasi Konsumen Karyawan Keluarga Besar Petrokimia Gresik (K3PG) merupakan perusahaan air minum satu-satunya yang berhasil menciptakan produk hijau dengan proses produksi ramah lingkungan. Air baku diambil dari air permukaan tanpa pengeboran sumur bawah tanah, sehingga tidak merusak sistem hidrologi dan menghasilkan air dengan kandungan *Total Dissolved Solid* (TDS) rendah. Seluruh proses sanitasi menggunakan desinfektan hijau yang aman bagi lingkungan. Melalui program SS *GIROBO*, K3PG mengembangkan inovasi *GIROBO BIOFECT* (*Gallon Inspection Robotic Bio Disinfectant*), alat berbasis *Internet of Things* (IoT) yang berfungsi sebagai detektor kebocoran dan kontaminan galon menggunakan metode *Rapid Smell Test*. Penelitian dilakukan selama tujuh bulan dengan pengujian terhadap 16 alternatif solusi. Hasilnya, *GIROBO BIOFECT* mampu menurunkan produk *reject* pasca produksi hingga 97% dan menghilangkan biaya *reject* galon dari Rp 70.494.691 menjadi Rp 0 atau efisiensi 100%. Selain itu, faktor penyebab dominan seperti inspeksi visual dan pekerjaan berulang menurun hingga 80%, menghasilkan penghematan biaya sebesar Rp835 juta per tahun. Inovasi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi proses produksi, tetapi juga memperkuat posisi K3PG sebagai pelopor Air Minum Dalam Kemasan (AMDK) ramah lingkungan dengan standar mutu tinggi dan teknologi inspeksi hijau yang berkelanjutan.

Kata kunci: Penurunan *Reject Galon*, *GIROBO BIOFECT*, *Rapid Smell Test* Berbasis IOT, Sistem Desinfeksi Hijau, *Dashboard*, Penghematan Biaya, Pabrik AMDK

Pendahuluan

Pabrik AMDK K3PG merupakan salah satu unit usaha Koperasi Karyawan Keluarga Besar Petrokimia Gresik (K3PG). Unit usaha pengelolaan Air Minum Dalam Kemasan, yang bergerak dibidang produksi minuman harus memperhatikan kualitas dengan ketat. Kesehatan konsumen menjadi prioritas. Kualitas Air Minum dalam Kemasan (AMDK) dibagi menjadi dua, kualitas dari segi mutu air dan bahan pengemas. Kualitas mutu air sudah sesuai standar SNI 3553 : 2015 tentang mutu air mineral. Sedangkan untuk kualitas bahan pengemas pabrik AMDK K3PG memiliki kriteria pada setiap kemasannya. Bahan pengemas yang tidak lolos uji oleh *quality control* akan menjadi barang *reject* sebelum produksi maupun *reject* sesudah produksi.

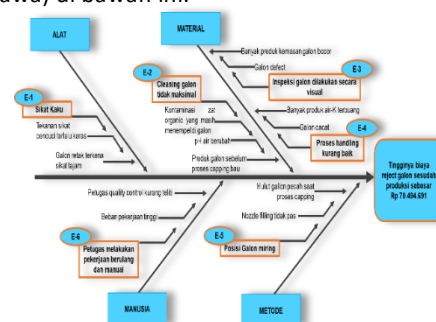
Permasalahan *reject* galon yang paling dominan dengan biaya sebesar Rp 70.494.691/bulan atau 97,45% sehingga Gugus SS *GIROBO* akan "Menurunkan Biaya *Reject Galon* Sesudah Proses Produksi dari Rp 70.494.691,- menjadi Rp 0,- (Zero Defect) pada Pabrik AMDK K3PG". Untuk mengidentifikasi akar penyebab permasalahan, dilakukan analisis Ishikawa (*fishbone diagram*) yang mengelompokkan penyebab ke dalam empat aspek, yaitu material, metode, alat, dan manusia.

Metode

Metode sebab akibat atau *cause and effect method* merupakan pendekatan analisis yang digunakan untuk

mengidentifikasi dan memahami hubungan antara berbagai faktor penyebab (*cause*) yang memengaruhi munculnya suatu permasalahan atau hasil (*effect*). Menurut Ishikawa (1982), metode ini sering divisualisasikan dalam bentuk diagram tulang ikan (*fishbone diagram*), yang membantu mengelompokkan faktor penyebab ke dalam kategori tertentu agar proses analisis menjadi lebih sistematis dan terarah. Dalam konteks industri, metode sebab akibat digunakan untuk menemukan akar penyebab (*root cause*) dari suatu permasalahan, seperti inefisiensi produksi, penurunan mutu produk, atau peningkatan biaya operasional.

Akar penyebab, meliputi sikat kaku, *cleaning* galon tidak maksimal, inspeksi galon dilakukan secara visual, proses *handling* kurang baik, posisi galon miring, dan petugas melakukan pekerjaan berulang. Penjelasan akar penyebab dapat dilihat dari diagram sebab akibat (ishikawa) di bawah ini:

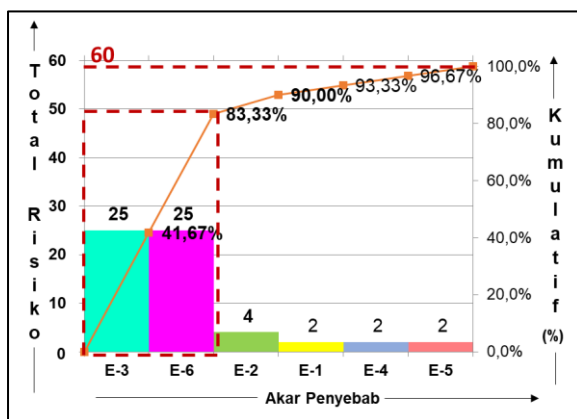


Gambar 1. Diagram Sebab Akibat Penyebab Tingginya Biaya *Reject Galon* Sesudah Produksi

Analisa sebab akibat mengidentifikasi penyebab tingginya biaya *reject* galon sesudah produksi. Faktor dominan meliputi:

- **Alat :**
 - Sikat kaku (akar penyebab) mengakibatkan tekanan sikat terlalu keras sehingga galon retak terkena sikat tajam (penyebab Langsung).
- **Material :**
 - *Cleaning* galon tidak maksimal (akar penyebab) mengakibatkan kontaminasi zat organik yang masih menempel di galon sehingga pH air berubah sehingga produk galon sebelum proses *capping* bau (penyebab langsung).
 - Inspeksi galon dilakukan secara visual (akar penyebab) mengakibatkan galon *defect* sehingga banyak produk kemasan galon bocor (penyebab langsung).
 - Proses *handling* kurang baik (akar penyebab) mengakibatkan galon cacat sehingga banyak produk air-K terbuang (penyebab langsung).
- **Metode :**
 - Posisi galon miring (akar penyebab) mengakibatkan *nozzle filling* tidak pas sehingga mulut galon pecah saat proses *capping* (penyebab langsung).
- **Manusia :**
 - Petugas melakukan pekerjaan berulang dan manual (akar penyebab) mengakibatkan beban pekerjaan tinggi sehingga petugas kurang teliti (penyebab langsung).

Analisa Pareto digunakan untuk mengidentifikasi faktor yang paling signifikan mempengaruhi tingginya *reject* galon sesudah proses produksi. Berdasarkan data total risiko (Analisa Risiko Peluang kejadian (P) dan Dampak terhadap biaya (D)), urutan akar penyebab dominan adalah sebagai berikut:



Gambar 2. Pareto Akar Penyebab Dominan

Melalui akar penyebab pada gambar di atas, menunjukkan bahwa akar penyebab yang dominan adalah Inspeksi galon dilakukan secara visual dan Petugas melakukan pekerjaan berulang. Sehingga, SS GIROBO menyimpulkan untuk menyelesaikan akar

penyebab tersebut dengan prosentase sebesar 83,33%. Oleh karena itu, upaya utama diarahkan untuk menciptakan beberapa alternatif pembuatan alat dengan metode yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan dalam penurunan tingginya biaya *reject* galon sesudah produksi.

Selanjutnya dilakukan pengujian beberapa alternatif solusi untuk akar penyebab dominan, yaitu inspeksi galon dilakukan secara visual dan petugas melakukan pekerjaan berulang dilengkapi dengan analisa *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) yang bertujuan untuk mengidentifikasi serta menganalisa kegagalan setiap alternatif sebagai berikut:

Tabel 1. Alternatif Solusi

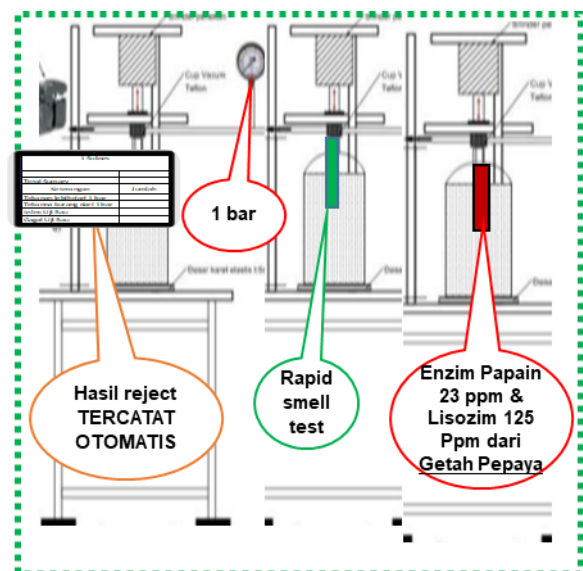
Alternatif	FMEA (RPN)	Ket
1. Inspeksi galon kosong oleh dua petugas <i>quality control</i>	RPN=SxOxD RPN=9x8x7 =504	Tidak dipilih
2. Menciptakan <i>detector</i> kebocoran galon pada tekanan 0.2 bar	RPN=SxOxD RPN=8x7x6 =336	Tidak dipilih
3. Menciptakan <i>detector</i> kebocoran galon pada tekanan 0.5 bar	RPN=SxOxD RPN=7x6x5 =210	Tidak dipilih
4. Menciptakan <i>detector</i> kebocoran galon pada tekanan 1 bar	RPN=SxOxD RPN=6x7x4 =168	Tidak dipilih
5. Menciptakan detektor kebocoran galon pada tekanan 1 bar dan uji kontaminan dengan metode <i>Rapid Smell Test</i>	RPN=SxOxD RPN=5x6x3 =90	Tidak dipilih
6. Menciptakan detektor kebocoran galon pada tekanan 1 bar dan uji kontaminan dengan metode <i>rapid smell test</i> dan desinfeksi galon dengan enzim papain 1% (4,6ppm) dari getah pepaya	RPN=SxOxD RPN=5x6x2 =60	Tidak dipilih
7. Menciptakan detektor kebocoran galon pada tekanan 1 bar dan uji kontaminan dengan metode <i>rapid smell test</i> dan desinfeksi galon dengan enzim papain 3% (13,8ppm) dari getah pepaya	RPN=SxOxD RPN=5x5x2 =50	Tidak dipilih
8. Menciptakan detektor kebocoran galon pada tekanan 1 bar dan uji kontaminan dengan metode <i>rapid smell test</i> dan desinfeksi galon dengan enzim papain 5% (23ppm) dari getah pepaya	RPN=SxOxD RPN=4x5x2 =40	Tidak dipilih

9. Menciptakan detektor kebocoran galon pada tekanan 1 bar dan uji kontaminan dengan metode <i>rapid smell test</i> dan desinfeksi galon dengan enzim lisozim 1% (25ppm) dari getah pepaya	RPN=SxOxD RPN=4x5x2 =40	Tidak dipilih
10. Menciptakan detektor kebocoran galon pada tekanan 1 bar dan uji kontaminan dengan metode <i>rapid smell test</i> dan desinfeksi galon dengan enzim lisozim 3% (75ppm) dari getah pepaya	RPN=SxOxD RPN=4x4x2 =32	Tidak dipilih
11. Menciptakan detektor kebocoran galon pada tekanan 1 bar dan uji kontaminan dengan metode <i>rapid smell test</i> dan desinfeksi galon dengan enzim lisozim 5% (125ppm) dari getah pepaya	RPN=SxOxD RPN=3x4x2 =24	Tidak dipilih
12. Menciptakan detektor kebocoran galon pada tekanan 1 bar dan uji kontaminan dengan metode <i>rapid smell test</i> dan desinfeksi galon dengan enzim papain 5% (23ppm) dan enzim lisozim 1% (25ppm) dari getah pepaya	RPN=SxOxD RPN=3x3x2 =18	Tidak dipilih
13. Menciptakan detektor kebocoran galon pada tekanan 1 bar dan uji kontaminan dengan metode <i>rapid smell test</i> dan desinfeksi galon dengan enzim papain 5% (23ppm) dan enzim lisozim 3% (75ppm) dari getah pepaya	RPN=SxOxD RPN=2x3x2 =12	Tidak dipilih
14. Menciptakan detektor kebocoran galon pada tekanan 1 bar dan uji kontaminan dengan metode <i>rapid smell test</i> dan desinfeksi galon dengan enzim papain 3% (13,8 ppm) dan enzim lisozim 3% (75ppm) dari getah pepaya	RPN=SxOxD RPN=2x2x2 =8	Tidak dipilih
15. Menciptakan detektor kebocoran galon pada tekanan 1 bar dan uji kontaminan dengan metode <i>rapid smell test</i> dan desinfeksi galon dengan enzim papain 5% (23 ppm) dan enzim lisozim 5% (125ppm) dari getah pepaya	RPN=SxOxD RPN=1x1x2 =2	Tidak dipilih

16. Menciptakan detektor kebocoran galon pada tekanan 1 bar dan uji kontaminan dengan metode <i>rapid smell test</i> dan desinfeksi galon dengan enzim papain 5% (23 ppm) dan enzim lisozim 5% (125ppm) dari getah pepaya dan membuat <i>dashboard</i> GIROBO BIOFECT untuk menghitung jumlah galon reject sebelum produksi secara otomatis	RPN=SxOxD RPN=1x1x1 =1	Dipilih
---	---------------------------	---------

Hasil Kerja

SS GIROBO menentukan solusi terbaik melalui alternatif terpilih (Alternatif 16) berupa: Menciptakan detektor kebocoran galon pada tekanan 1 bar dan uji kontaminan dengan metode *rapid smell test* dan desinfeksi galon dengan enzim papain 5% (23 ppm) dan enzim lisozim 5% (125ppm), serta membuat *dashboard* GIROBO BIOFECT untuk menghitung jumlah galon reject sebelum produksi secara otomatis, sebagai alat detektor kebocoran dan kontaminan galon kosong dengan metode *Rapid Smell Test* Berbasis IOT serta pencatatan galon reject secara otomatis.



Gambar 3. Rancangan GIROBO BIOFECT

Metode yang digunakan dalam penerapan GIROBO BIOFECT adalah metode EPC (*Engineering, Procurement dan Construction*) dengan tahapan sebagai berikut:

1. Rapat koordinasi internal
2. Merancang alat GIROBO BIOFECT
3. Pengadaan alat dan bahan GIROBO BIOFECT
4. Merancang pembuatan *detector* kebocoran
5. Membuat detektor kontaminan dengan metode *Rapid Smell Test* berbasis IOT
6. Membuat desinfektan dari enzim papain dan lisozim
7. Memasang alat desinfektan enzim
8. Merancang tampilan *output* GIROBO BIOFECT
9. Membuat GIROBO BIOFECT

10. Testing GIROBO BIOFECT

11. Mengukur dan memvalidasi pengukuran perbaikan

Hasil validasi menunjukkan bahwa memenuhi aspek mutu, sehingga dapat disimpulkan bahwa pelaksanaan perbaikan yang telah berhasil. GIROBO BIOFECT (*Gallon Inspection Robotic Bio Disinfectan*) sebagai alat detektor kebocoran dan kontaminan galon dengan metode *Rapid Smell Test* berbasis IOT sekaligus terintegrasi dengan sistem desinfeksi hijau pada pabrik AMDK K3PG.

Kesimpulan

Dari studi kasus tersebut dapat disimpulkan bahwa :

1. Alur sesudah perbaikan dengan adanya inspeksi galon dengan GIBORO BIOFECT metode *rapid smell test* berbasis IOT *reject* galon sesudah produksi dari 1.350 kali menjadi 0 (100%). Angka ini juga langsung terpantu pada *dashboard* GIROBO BIOFECT.
2. Perbandingan pareto permasalahan sebelum dan sesudah perbaikan menunjukkan permasalahan sesudah perbaikan menurun dari Rp 72.337.740 menjadi Rp 1.826.700 atau sebesar 97%.
3. SS GIROBO berhasil menurunkan biaya *reject* galon sesudah proses produksi dari rata-rata Rp 70.494.691 menjadi Rp 0/bulan atau *zero defect*.
4. Melalui perbandingan pareto akar penyebab sebelum dan sesudah perbaikan menunjukkan bahwa penyebab sesudah perbaikan menurun dari 60 menjadi 12 atau sebesar 80%
5. Jumlah bakteri rata – rata sebelum 30 kol/ml menjadi 8 kol/ml setelah perbaikan.
6. Rata – rata proses inspeksi dari 60 detik menjadi 10 detik.
7. *Safe condition* tidak ada resiko terpeleset karena lantai tidak licin.
8. Tingkat kepuasan petugas *packing* menjadi sangat puas.
9. Hasil verifikasi kinerja keuangan melalui GIROBO BIOFECT, bidang AMDK K3PG dapat melakukan penghematan sebesar Rp 835.085.798 per tahun.
10. GIROBO BIOFECT merupakan satu-satunya alat peraga yang hanya diterapkan oleh K3PG yang mendeteksi kebocoran dan bau pada kemasa galon dalam rangka mengantisipasi *reject* Galon. SS Girobo menjamin originalitas penemuan inovasi di lingkup nasional dan internasional yang telah dipublikasi tanggal 14 Desember 2021. Oleh karena itu, SS Girobo telah memiliki hak cipta No. 000392255.

Dari kesimpulan tersebut penulis menyarankan :

1. Teknologi GIROBO BIOFECT diterapkan secara menyeluruh di seluruh lini produksi dan unit kerja terkait, untuk memastikan standar kualitas dan efisiensi yang konsisten.
2. Untuk menjaga akurasi dan keandalan deteksi, sistem inspeksi perlu dilakukan kalibrasi dan pemeliharaan rutin, serta pembaruan perangkat lunak secara berkala agar tetap sesuai dengan perkembangan teknologi.

3. Perlu dilakukan pelatihan berkelanjutan bagi operator dan petugas *packing* terkait penggunaan alat, analisis data inspeksi, serta penanganan awal jika terjadi anomali, guna memastikan pemanfaatan sistem secara optimal.
4. Hasil inspeksi sebaiknya diintegrasikan ke dalam sistem manajemen mutu berbasis digital untuk mempermudah pemantauan, pelaporan, dan pengambilan keputusan secara *real-time*.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada rekan-rekan di Departemen Retail khususnya Bidang AMDK K3PG atas kerja sama dan kontribusinya selama proses studi kasus berlangsung. Penulis menyadari laporan ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi penyempurnaan karya ilmiah ini di masa mendatang.

Referensi

- Aravind, G., Bhowmik, D., Duraivel, S., & Harish, G. (2013). Traditional and medicinal uses of *Carica papaya*. *Journal of Medicinal Plants Studies*, 1(1), 7–15.
- Arsana, I. M., Gufron, A., & Ariyanto, S. R. (2017). *Analisis hasil penambalan ban pada alat penambal ban dengan pengontrol suhu otomatis*. Surabaya, Indonesia: Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya.
- Budiansyah, A., Riassetiawan, M., Djunaedi, A., & Rachim, I. A. (2023). *Analisis topik dan aktor pada diskusi GeNose C19*. Yogyakarta, Indonesia: Universitas Gadjah Mada.
- Cowan, M. M. (1999). Plant products as antimicrobial agents. *Clinical Microbiology Reviews*, 12(4), 564–582.
- Jusnita, & Danil. (2021). *Tambal ban sepeda motor yang ergonomis menggunakan Arduino Uno*. Riau, Indonesia: Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Riau.
- Nurputra, D. K., Kusumaatmadja, A., Rachman, F. A., Rukmi, D. K., Hidayat, S., Irwanto, R. R., & Darmosarkoro, W. (2022). Fast and noninvasive electronic nose for sniffing out COVID-19 based on exhaled breath-print recognition. *npj Digital Medicine*, 5(1), 1–9.
- Prajadinata, A. F., Ashari, M. I., & Sotyohadi. (2022). *Monitoring tekanan udara pada ban kendaraan bermotor*. Malang, Indonesia: Institut Teknologi Nasional.
- Ramadani, D., & Anjisman, A. (2020). *Uji efektivitas salep getah pepaya muda (Carica papaya L.) terhadap penyembuhan luka sayat pada mencit (Mus musculus)*. Surabaya, Indonesia: Universitas Muhammadiyah Surabaya.
- Suhito, I. R., & Christiena, A. (2015). *Pemurnian parsial enzim protease dari ekstrak kasar getah pepaya*. Surabaya, Indonesia: Universitas Surabaya.
- Trianingrum, D., & Munang, A. (2022). Rancangan dan pengujian alat bantu kebocoran ban sepeda motor. *Jurnal Infotekmesin*, 13(1), 52–58.
- Yuniwati, M., Hatta, M., & Rahman, A. (2008). *Pemanfaatan getah pepaya dalam pengolahan susu dangke*. Jakarta, Indonesia: LIPI.



Furniture Stool Eco-Friendly

Haryadi PR¹ Andrew Joewono¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ harypeer71@gmail.com
✉ andrew_sby@ukwms.ac.id

Kesadaran lingkungan yang meningkat, akan permasalahan limbah kayu, perencanaan produk yang berkelanjutan, tren dan nilai tambah produk. Memilih produk furnitur ramah lingkungan sebuah tanggung jawab terhadap masa depan, dengan turut berkontribusi menjaga keseimbangan alam tanpa mengorbankan kenyamanan dan estetika. Eksplorasi dimulai dengan pencarian ide, pengembangan konsep desain dan gambar produksi maka didapatkan produk berupa *stool* atau “dingklik” (bahasa Jawa) dan perwujudan karya atau produk menjadi *furniture eco-friendly*.

Kata kunci: Furniture, Stool, Eco-Friendly

Pendahuluan

Kesadaran masyarakat terhadap isu lingkungan kini semakin meningkat. Salah satu langkah nyata dalam mendukung gaya hidup berkelanjutan adalah dengan memilih furnitur ramah lingkungan. Furnitur jenis ini tidak hanya mempercantik ruangan, tetapi juga membantu mengurangi dampak negatif terhadap alam. Furnitur ramah lingkungan diciptakan untuk memberi manfaat agar bisa mengurangi jejak karbon. Jejak karbon adalah jumlah total emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari aktivitas manusia, baik secara langsung maupun tidak langsung, seperti dari transportasi, konsumsi energi, dan produksi barang. Hubungan antara furnitur dan jejak karbon, karena furnitur menyumbang jejak karbon melalui emisi dari bahan baku, manufaktur, dan transportasi, tetapi di lain sisi juga dapat menyimpan karbon dalam material kayu.

Proses manufaktur furnitur yang dimulai dari pengolahan kayu hingga penggunaan bahan kimia, menghasilkan emisi gas rumah kaca. Namun jumlah emisi ini dapat diminimalisir dengan memilih furnitur yang berkelanjutan seperti yang terbuat dari kayu yang dikelola secara bertanggung jawab, produsen dan konsumen dapat mengurangi emisi karbon secara keseluruhan dan menggunakan bahan-bahan pendukung proses pembuatan yang ramah lingkungan. Dalam perkembangannya pada bisnis furnitur ramah lingkungan menurut Kompas.com (2024) dalam laporan *Transparency Market Research* menyebut pasar furnitur ramah lingkungan pada 2023 mencapai 44,2 miliar dolar amerika. Laporan lain menyebutkan permintaan akan furnitur ramah lingkungan bisa mencapai sekitar 51 miliar dolar amerika dan akan terus bertumbuh lagi ke depannya.

Sedangkan konsep ekonomi hijau menurut Makmun (2016), bahwa *green economy* merupakan suatu konsep terkini yang merupakan perluasan dari *sustainable development*. Di negara-negara Barat *sustainable development* dengan penekanan pada lingkungan hidup, sementara di Indonesia, konsep pembangunan berkelanjutan berwawasan lingkungan hidup sudah dijalankan oleh Pemerintah Indonesia.

Metode

Metode menggunakan teknik analisis data yang diterapkan untuk memahami kasus tersebut adalah

analisis komparatif, berupa proses sistematis untuk membandingkan dua objek karya furnitur stool. Penerapan analisis komparatif, untuk menilai kinerja produk dibandingkan dengan pesaing untuk mengidentifikasi keunggulan, kelemahan, dan peluang perbaikan dari hasil pelatihan guru SMK Desain Interior dan Teknik Furnitur (DITF). Tahapan metode ini meliputi:

- Identifikasi variabel dengan menentukan variabel yang akan dibandingkan, seperti harga, kualitas, atau inovasi.
- Pengumpulan data dengan mengumpulkan data yang relevan untuk setiap entitas yang akan dibandingkan.
- Analisis kualitatif berupa memahami kekuatan dan kelemahan secara konseptual.
- Analisis kuantitatif dengan menggunakan data numerik untuk membandingkan kinerja secara objektif.
- Kesimpulan membuat sintesis dari temuan.

Identifikasi variabel dengan menentukan variabel yang akan dibandingkan adalah langkah dalam proses analisis data atau penelitian untuk menentukan aspek-aspek apa saja yang ingin dibandingkan atau dianalisis antar objek, produk, layanan, atau fenomena tertentu. Dengan diidentifikasi variabel yang akan dibandingkan, pada aspek (1) harga, berapa biaya yang harus dikeluarkan untuk memproduksi barang yang direncanakan? (2) kualitas, sejauh mana kualitas barang pasca produksi? (3) inovasi, adakah hal yang unik yang membedakan dengan produk-produk lain sejenis?. Dengan menentukan variabel-variabel tersebut maka perbandingan bisa dilakukan secara sistematis dan objektif.

Pengumpulan data dengan mengumpulkan data yang relevan untuk setiap entitas yang akan dibandingkan adalah langkah dalam analisis perbandingan (*comparative analysis*) di mana ada pengumpulan informasi yang relevan, akurat, dan setara dari setiap objek yang akan dibandingkan pada saat penyusunan konsep terhadap produk yang sudah ada, maupun pada pemilihan alternatif desain. Analisis kualitatif berupa memahami kekuatan dan kelemahan secara konseptual dengan memahami kekuatan dan kelemahan secara konseptual adalah proses analisis non-numerik yang bertujuan untuk memahami suatu entitas, program, produk, atau fenomena berdasarkan

makna, karakteristik, dan konsep-konsep penting, sehingga dapat terlihat pada kekuatan atau aspek yang mendukung, keunggulan, potensi, atau hal positif yang dimiliki serta kelemahan atau aspek yang menghambat, keterbatasan, kekurangan, atau potensi masalah.

Analisis kuantitatif dengan menggunakan data numerik untuk membandingkan kinerja secara objektif adalah analisis yang menggunakan data numerik untuk mengevaluasi dan membandingkan kinerja secara objektif melalui perhitungan dari alternatif desain produk untuk dipilih menjadi desain produk yang terpilih. Kesimpulan membuat sintesis dari temuan adalah proses merangkum, mengintegrasikan, dan menghubungkan seluruh hasil analisis menjadi pemahaman akhir yang utuh mengenai keunggulan, kelemahan, serta rekomendasi pengembangan produk *furniture* yang akan dibuat.

Hasil Kerja

Guru berperan sangat penting untuk menanamkan menanamkan kesadaran dan kebiasaan ramah lingkungan kepada peserta didik sejak dini. Hal ini dapat dilakukan, dengan mengintegrasikan pendidikan lingkungan ke dalam kurikulum, memimpin kegiatan praktis seperti daur ulang dan penghijauan, serta menjadi contoh dengan menerapkan gaya hidup berkelanjutan di kelas.

Guru perlu belajar tentang ramah lingkungan, agar dapat berperan dalam membangun karakter generasi muda, mengatasi masalah lingkungan, serta meningkatkan kualitas belajar. Cara bagaimana guru mengajar tentang lingkungan, yakni dengan mengintegrasikan ke dalam kurikulum, lakukan kegiatan praktis (terlibat kegiatan/praktik 4R), memberikan contoh langsung, menggunakan lingkungan sebagai sumber belajar serta mengajak peserta didik mencintai alam.

4R dalam produk ramah lingkungan adalah singkatan dari *reduce* (mengurangi), *reuse* (menggunakan kembali), *recycle* (mendaur ulang), dan *replace* (mengganti), yang bertujuan untuk mengelola barang atau limbah barang dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Penerapannya dapat dimulai dari tindakan sederhana sehari-hari, seperti mengurangi penggunaan produk sekali pakai, menggunakan kembali barang bekas, mendaur ulang limbah, dan mengganti produk konvensional. Tidak terkecuali peran guru kejuruan SMK pada konsentrasi keahlian Desain Interior dan Teknik Furnitur dalam berperan dalam mengajarkan kepada peserta didik, untuk menciptakan furnitur ramah lingkungan, dengan kata lain guru pantang mengajar, sebelum belajar.

Pengembangan Konsep Desain

Furnitur menurut Darsana (2012) jenis furnitur berdasarkan perencanaan ruang, meliputi furnitur melekat (*built-in furniture*). Furnitur lepas desain khusus (*custom loose furniture*) dan furnitur lepas pabrikan (*fabricated loose furniture*). Sesuai dengan situasi saat ini bahwa ramah lingkungan penting untuk dikembangkan. Ramah lingkungan menjadi dasar dalam pengembangan konsep furnitur yang dikembangkan

dalam rencana desain dan pengembangan produk furnitur berbasis limbah kayu.

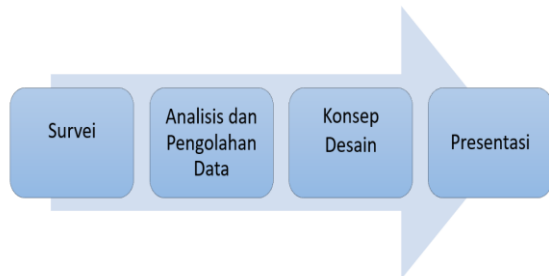
Menurut Widiyanti (2018) berkaitan dengan desain yang merupakan sebuah respon dari perkembangan zaman yang dipengaruhi oleh banyak aspek. Desain dapat dipahami sebagai sebuah kegiatan yang kompleks untuk mengoptimalkan aspek psikologi, sosial, kultural, dan ergonomi dari *user* pada lingkungan terdesain. Aksi perilaku ramah lingkungan, diwujudkan dalam (a) gaya hidup yakni mengadopsi kebiasaan sehari-hari yang mendukung keberlanjutan, seperti mengurangi penggunaan listrik, menghemat air, memilih transportasi umum atau sepeda, serta menanam tanaman, (b) proses produk barang dan jasa yaitu melalui proses produksi dari mulai bahannya hingga cara pembuangannya tidak membahayakan lingkungan, serta (c) kebermanfaatan dengan membantu menjaga keseimbangan ekosistem, menekan polusi, dan menciptakan lingkungan yang lebih sehat untuk generasi mendatang.

Hasil analisa yang dikembangkan menjadi konsep pengembangan produk, yaitu: (a) konsep *green economy* mencakup perubahan dalam cara produksi dan konsumsi, yang berfokus pada penggunaan teknologi ramah lingkungan, penggunaan energi terbarukan, dan pengurangan limbah dan polusi, (b) konsep rancangan berkelanjutan adalah meminimalisasi limbah dengan melakukan usaha memanfaatkan desain yang memilih material secara seksama terkait jangka waktu penggantian atau perawatan yang lama sehingga membantu mengkonservasi sumber daya alam atau limbah produksi dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan produk turunannya, (c) desain dapat dipahami sebagai sebuah kegiatan yang kompleks untuk mengoptimalkan aspek psikologi, sosial, kultural, dan ergonomi dari user pada lingkungan terdesain, (d) produk furnitur ramah lingkungan adalah upaya untuk menggambarkan kegiatan yang bertujuan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan alam, serta (e) *finishing* furnitur ramah lingkungan dapat dilakukan dengan menggunakan *finishing* yang aman bagi kesehatan karena minim zat kimia berbahaya, beracun, dan berbau, serta lebih berkelanjutan.

Menurut Savitri (2023), konsep yang mengangkat isu penggunaan sumber daya yang lebih efisien dan berkelanjutan yang disebut konsep *green economy*. Pada produksi furnitur dengan produk furnitur ramah lingkungan adalah upaya untuk menggambarkan kegiatan yang bertujuan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan alam. Serta merujuk pada Paryoko et al (2023), salah satu kategori konsep rancangan berkelanjutan adalah meminimalisasi limbah. Dari pertimbangan tersebut di atas maka pengembangan konsep terpilih adalah berupa pengembangan desain furnitur *stool* yang dibuat peserta secara berkelompok, dengan membuat furnitur dari kayu *recycle* atau limbah kayu.

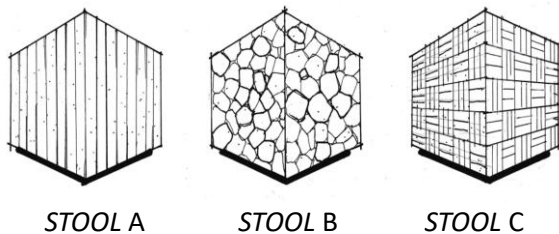
Ada 3 (tiga) desain produk alternatif yang dihasilkan dari pengembangan konsep. Konsep merupakan pengantar karya/tugas dalam bentuk tulisan serta gambar-gambar sketsa yang menjelaskan pokok pikiran berisi rencana yang akan dicapai dari bentuk, warna,

material dan konsep pendukung lainnya. Konsep ini berdasar dari kegiatan survei, analisa, penggunaan data dan literatur dan gagasan konsep desain dan dipresentasikan dilanjutkan dengan gambar detail atau gambar kerja. Proses pengembangan desain melalui bagan sebagai berikut.



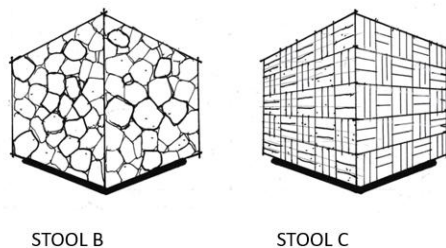
Gambar 1. Proses Pengembangan Desain

Konsep bentuk yang menjadi alternatif solusi sebagai berikut.



Gambar 2. Alternatif Pilihan 3 Desain Stool
(Tipe A, B dan C)

Setelah melalui analisis pemilihan alternatif, maka yang akan dikembangkan adalah 2 produk, yaitu desain B dan C dengan pemilihan sebagai berikut.



Gambar 3. Solusi Terpilih yang Dibuat/Diproduksi
(Tipe B dan C)

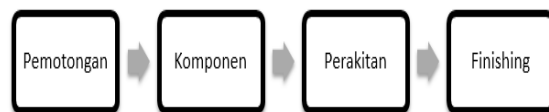
Proses Produksi

Proses pembuatan furnitur pada umumnya adalah dimulai dengan pemotongan kayu atau *log* kayu, menurut Sitanggang (2019) bahan kayu dimulai dari *log* berbentuk bulat dengan diameter 25-80 cm. Sedangkan proses produksi dalam Haryadi (2020) dalam bagan proses produksi furnitur adalah meliputi pemotongan kayu/bahan, pembuatan komponen, perakitan dan *finishing*. Proses akhir dalam proses produksi adalah pekerjaan *finishing* dilakukan diawali dengan proses menyiapkan bahan, menyiapkan peralatan dan perlengkapan, menyiapkan tempat kerja, menyiapkan komponen/elemen yang akan *difinishing* (Raharjo, 2020).

Sesuai dengan konsep ramah lingkungan maka bahan-bahan yang dipakai untuk *finishing* adalah

finishing ramah lingkungan hal ini sebagai bukti perlindungan untuk proses produksi dan pemakai. Saat ini di pasaran masih terdapat bahan-bahan *finishing*. Sedangkan di pasar masih terdapat bahan yang mengandung seperti formalin, merkuri, dan timbal yang tinggi dalam bahan *finishing* yang akan mengakibatkan masalah yang cukup serius bagi kesehatan seperti pusing, iritasi kulit, dan mual bagi beberapa orang ketika dihirup terutama adalah bahan-bahan *finishing* yang berbasis minyak atau resin (Fahrussiam, 2023).

Dalam pengembangan desain maka dipilih pembuatan *stool* berbasis limbah kayu jati dibuat dengan 2 (dua) tipe model, yaitu laminasi pola potongan tidak beraturan dan pola anyaman. Setelah desain terpilih, maka proses produksi dimulai dengan pemilihan dan pemotongan bahan, dilanjutkan dengan pembentukan, perakitan, dan tahap *finishing*. Setelah itu, dilakukan kontrol kualitas. Proses produksi dapat digambarkan sebagai berikut.

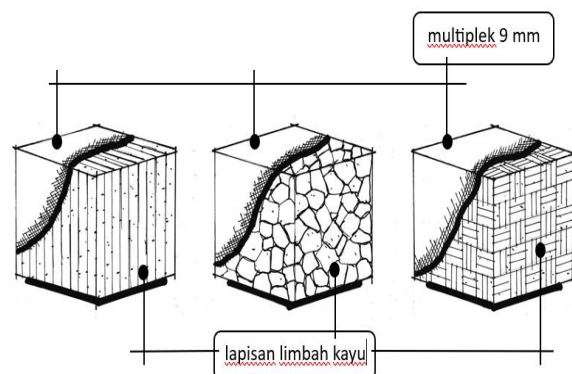


Gambar 4. Proses Pembuatan Produk Furnitur

Proses produksi, meliputi:

- 1) Melaksanakan praktek kerja yang ramah lingkungan dalam pembuatan furnitur serta memperhatikan K3.
- 2) Menyiapkan alat pembuat kotak bentukan dan alat melaminasi kayu.
- 3) Menyiapkan bahan untuk kotak bentukan dari multiplek 9 mm dan bahan limbah kayu melaminasi kayu.
- 4) Melakukan *treatment* bahan kayu ramah lingkungan
- 5) Membuat laminasi kayu.
- 6) Menyelesaikan pekerjaan melaminasi kayu (menghaluskan dan *finishing*).

Proses produksi pembuatan kotak dari multiplek 9 mm, untuk menempelkan bentukan kayu limbah agar kuat, dilanjutkan dengan proses penyelesaian furnitur. Gambar perspektif yang memperlihatkan detail lapisan *stool* dapat dilihat di bawah ini.



Gambar 5. Perspektif Detail Lapisan Stool

Hasil pengembangan produk berupa pembuatan *Stool* terlihat pada gambar berikut ini.



Gambar 6. Produk Stool Eco-Friendly Tipe 1



Gambar 7. Produk Stool Eco-Friendly Tipe 2

Kesimpulan

Pembuatan furnitur ramah lingkungan oleh peserta pelatihan guru kejuruan SMK Konsentrasi Keahlian Desain Interior dan Teknik Furnitur. Adalah guru mempunyai pemahaman dan solusi untuk pembuatan furnitur ramah lingkungan yaitu furnitur *stool eco-friendly*. Peserta pelatihan guru SMK DITF telah melakukan eksplorasi, sehingga didapatkan produk berupa *stool* atau “dingklik” (bahasa Jawa) melalui proses penggalian konsep, pembuatan desain dan perwujudan karya atau produk.

Diharapkan guru peserta pelatihan akan mampu (1) memahami konsep produk ramah lingkungan serta pentingnya keberlanjutan dalam kehidupan sehari-hari, (2) mengidentifikasi bahan, proses, dan fungsi produk ramah lingkungan yang dihasilkan guru, (3) menunjukkan sikap peduli lingkungan melalui penggunaan dan dukungan terhadap produk yang tidak merusak ekosistem, (4) mengembangkan kreativitas dengan merancang ide awal produk ramah lingkungan versi mereka sendiri, (5) memberikan keteladanan dalam menerapkan prinsip *reduce, reuse, recycle* (3R) pada pembuatan atau penggunaan produk, (6) menganalisis kelebihan dan manfaat produk ramah lingkungan dibandingkan produk konvensional, serta (7) meningkatkan literasi lingkungan melalui diskusi, refleksi, atau tugas analisis terkait produk tersebut.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih ditujukan kepada:

1. Bapak Masrukhan Budiyo, S.H, M.M selaku Kepala BBPPMPV Seni dan Budaya Yogyakarta.
2. Bapak Dr. Wanto, ST, MT selaku Kepala Bagian Tata Usaha BBPPMPV Seni dan Budaya Yogyakarta.
3. Serta semua pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu yang telah membantu terlaksananya pembuatan artikel Prosiding Seminar Praktik Keinsinyuran VII Tahun 2026.

Referensi

- Darsana, W., & Pane, S. F. (2012). *Desain interior 1*. Jakarta, Indonesia: Fakultas Seni Rupa IKJ.
- Fahrussiam, F., et al. (2023). Pengenalan metode finishing ramah lingkungan (yakisugi) pada generasi milenial Desa Perina: Inovasi produk furniture yang unik dan estetika tinggi. *Jurnal Malikussaleh Mengabdikan*, 2(2), 369–375. <https://doi.org/10.29103/imm.v2n2.13605>
- Kompas.com. (2024). Permintaan pasar furnitur ramah lingkungan tembus 44,2 miliar dolar AS. Diakses pada 20 Oktober 2025.
- Kumar, M. C. Rao, & Ravindranadh, K. (2013). Innovations in teaching and learning: Top down or bottom up? *Indian Journal of Applied Research*, 3(6), 453.
- Makmun, M. (2016). Green economy: Konsep, implementasi dan peran Kementerian Keuangan. *Jurnal Ekonomi dan Pembangunan*, 19(2), 1–15. <https://doi.org/10.14203/JEP.19.2.2011.1-15>
- Paryoko, V. G. P. J., & Rachman, R. A. F. N. (2023). Spatial design analysis dalam proses perencanaan dan perancangan interior. *Waca Cipta Ruang: Jurnal Ilmiah Desain Interior*, 9(1), 17–24. <https://doi.org/10.34010/wcr.v9i1.8457>
- PR, H. (2020). *Melakukan komunikasi di tempat kerja DU/DI furnitur*. Ponorogo, Indonesia: Uwais Inspirasi Indonesia.
- Purnama, S. (2009). *Teknik finishing mebel*. Semarang, Indonesia: Dahara Prize.
- Raharjo, H. P. (2020). *Menyiapkan pekerjaan finishing furnitur*. Yogyakarta, Indonesia: Deepublish.
- Savitri, & Safitri, R. (2023). Furnitur anak dari kayu palet dengan pewarna alami ramah lingkungan. In *Prosiding Penelitian dan PKM ISBI Bandung 2023* (pp. 247–250). <https://doi.org/10.26742/pib.v0i0.3159>
- Sitanggang, N., et al. (2019). *Manajemen kewirausahaan furnitur*. Yogyakarta, Indonesia: Deepublish.
- Wahyuni, H., & Erwantiningsih, E. (2020). Sosialisasi finishing mebel dengan bahan ramah lingkungan di Kelurahan Bukir Kota Pasuruan. *Jurnal Masyarakat Merdeka*, 3(1).
- Widiyanti, C. T., & Firmansyah, R. (2018). Spatial design analysis dalam proses perencanaan dan perancangan interior. *Idealog: Ide dan Dialog Indonesia*, 3(2). <https://doi.org/10.25124/idealog.v3i2.1559>

Kegagalan *Lifting Air Compressor* di Proyek Pembangunan Fasilitas Produksi Gas Matindok

Y.Pradiktya¹ Andrew Joewono¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ y.pradiktya@gmail.com

✉ andrew_sby@ukwms.ac.id

Pendahuluan

Proyek Pengembangan Gas Matindok milik PT Pertamina EP (PEP) terletak di Kabupaten Banggai Provinsi Sulawesi Tengah. Proyek ini membangun dua fasilitas pemrosesan gas, antara lain Proyek Pembangunan Fasilitas Produksi Gas Donggi dan Proyek Pembangunan Fasilitas Produksi Gas Matindok dengan masing-masing kapasitas 60 MMSCFD dan 65 MMSCFD. Proyek Matindok sendiri akan membangun Central Processing Plant (CPP) dengan 7 buah sumur, dengan fasilitas utama adalah *flowlines*, *inlet/test manifold*, *separation unit*, *acid gas removal unit*, *sulphur recovery unit*, *dehydration unit*, *dew point control unit*, *utilities*, dan lain-lain.

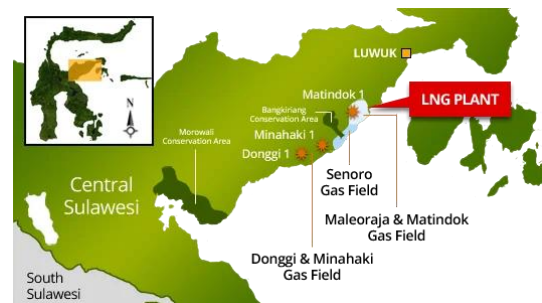
Gas yang masuk ke dalam CPP akan melewati unit pemisahan untuk menghilangkan cairan yang masuk, dan gas akan dikompresi dan di-sweetened (menghilangkan CO₂ and H₂S yang terkandung). Proses ini berlangsung di dalam *Acid Gas Removal Unit (AGRU)* dan akan menghasilkan *sweet gas* dan gas asam. *Sweet gas* akan didehidrasi dan diatur agar sesuai dengan persyaratan kualitas gas yang akan dijual. Sementara gas asam akan masuk pada *Sulphur Recovery Unit (SRU)* berdasarkan proses *Shell-Paques*, di mana kandungan sulfurnya akan dipulihkan kembali untuk menghasilkan sulfur elemental. Sulfur elemental yang pulih kembali sebagai kue ini akan diproses lebih lanjut untuk menghasilkan pupuk. Air yang dihasilkan akan diproses sebelum diinjeksikan kembali ke sumur Maleoraja, dan akan distabilkan sebelum dikirim ke Senoro melewati *trunkline* sedangkan gas yang dihasilkan akan dijual melalui *flowline* kepada Donggi-Senoro LNG.

Pembangunan CPP Matindok dengan kapasitas 65 MMSCFD sejak 2014 dengan EPCC Contractor Konsorsium Wika-Technip (KWT) / (PT Wijaya Karya (Persero), Tbk. dan PT. Technip Indonesia) memiliki nilai proyek US\$234 juta. Dalam fase konstruksinya, salah satu paket pekerjaan konstruksi *mechanical* (di luar

Aktivitas / kegiatan *lifting and rigging* adalah aktivitas / kegiatan yang tidak dapat dihilangkan dalam bidang konstruksi khususnya di industri EPCC (*Engineering, Procurement, Contruction, and Commissioining*) dan merupakan aktivitas yang beresiko terhadap tenaga kerja, peralatan kerja, ataupun aset jika mengalami kegagalan / kecelakaan kerja. Salah satu contohnya adalah Kegagalan *Lifting Air Compressor* yang terjadi pada tahun 2016 di Proyek Pembangunan Fasilitas Produksi Gas Matindok milik PT Pertamina EP di Kabupaten Banggai Provinsi Sulawesi Tengah yang dikerjakan oleh Konsorsium PT Wijaya Karya (Persero) Tbk. dengan PT. Technip Indonesia (KWT) sebagai EPCC Contractor. Mengetahui penyebab serta memberikan pembelajaran dan pengalaman secara teknis dan non teknis pada kejadian Kegagalan *Lifting Air Compressor* ini dengan menggunakan analisa sebab akibat berdasarkan *Standart Codes* dan prosedur yang berlaku diharapkan menjadi salah satu referensi untuk membuat rencana aktivitas / kegiatan *lifting and rigging* yang aman dan lancar.

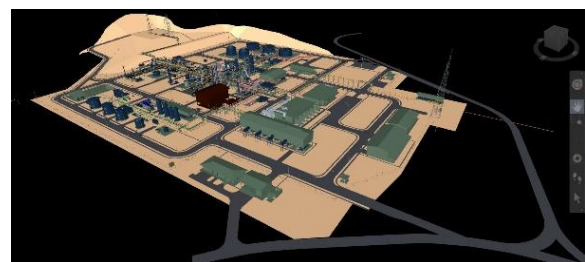
Kata kunci: Konstruksi, *Lifting*, *Rigging*, *Standart Codes*

scope tankage dan HVAC) ditunjuk satu subkontraktor oleh KWT atas persetujuan PEP yaitu PT. Guna Teguh Abadi (GTA). Secara kontraktual pekerjaan konstruksi *mechanical* yang diberikan KWT ke GTA adalah lumpsum terbatas waktu (6 bulan) dengan efektif *date* dari tanggal 20 Agustus 2015.

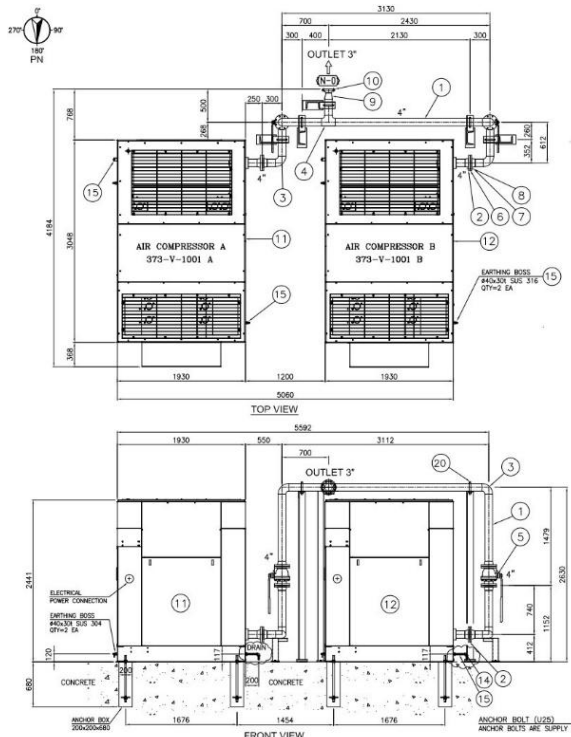


Gambar 1. Peta Lokasi Proyek Pengembangan Gas Matindok (Explorasi.id, 2018)

Dari *scope of work* konstruksi mekanikal yang menjadi tanggung jawab GTA, *Air Compressor - A/B (Tag.no 373-V-1001 A/B)* dengan *empty weight* 5136 kg untuk tiap *Air Compressor*-nya menjadi salah satu *equipment* yang harus di-install oleh GTA di site CPP Matindok. Dalam proses instalasinya, saat *install above foundation* menggunakan Crane 250T, terjadi kecelakaan / kegagalan *lifting* pada *Air Compressor-B* di tanggal 24 Februari 2016.



Gambar 2. Naviswork 3D dari CPP Matindok



Gambar 3. Air Compressor

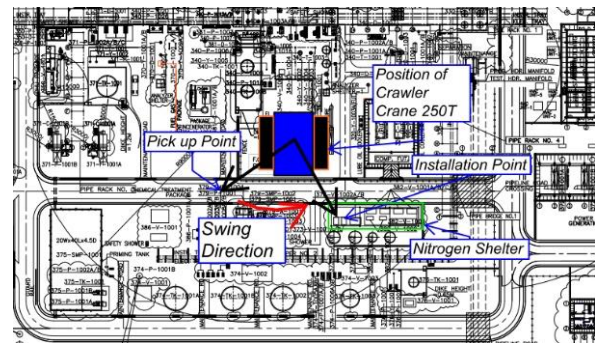
Pada hari Rabu, 24 Februari 2016 selesai melakukan *Toolbox Meeting* dan pembagian pekerjaan dari (*Superintendent*) *SI Rigger* (Heri) di kantor GTA, *Tim Rigger* langsung bersiap di lokasi kerja masing-masing. Supervisor (*Spv*) *Rigger* (Edu P.) sudah menyiapkan *lifting gears* sesuai *Lifting Plan* yang telah di-*approved* oleh KWT dan PEP di lokasi sebelah selatan area *AGRU Structure*, di dekat *crawler crane* 250T berada.

Pada pukul 08:45 WITA di sekitar area *Nitrogen Shelter*, 1 Grup *Rigger* yang terdiri dari 6 pekerja telah menyelesaikan pekerjaan *loading steel plate* dan *boom* dari crane 550T ke atas *truck trailer*. Setelah *loading* 3 pekerja GTA yaitu Juri Sakdan (*Foreman Rigger*, bersertifikat), Ambotola (*Rigger-2*, tidak bersertifikat), Sardi (*Rigger-1*, tidak bersertifikat) kemudian melakukan kegiatan *lashing steel plate* di atas *truck trailer*.

Setelah selesai mengangkat aksesoris crane 550T, Feriandi (*Rigger-1*, tidak bersertifikat) menginstruksikan operator crane 250T untuk *swing* ke arah *Instrument Air Compressor* (*Pick Up Point*), diikuti oleh Abdul Rahman (*Rigger-2*, tidak bersertifikat), Randiyada (*Rigger-2*, tidak bersertifikat) melakukan persiapan memasang *lifting gears* dan tidak termasuk *lifting frame* untuk pengangkatan *Air Compressor B* (373-V-1001B) atas inisiatif sendiri tanpa diawasi oleh Spv / *Foreman* dengan alasan untuk mempercepat pekerjaan karena akan turun hujan (pada saat itu cuaca cerah).

Pada pukul 08:50 WITA *Tim Rigger* yang mempersiapkan *lifting Air Compressor B* (373-V-1001B), tanpa mengganti konfigurasi *lifting gears* yang telah digunakan sebelumnya, sehingga konfigurasi yang dipakai untuk pengangkatan / *lifting Air Compressor B* (373-V-1001B) tidak sesuai dengan *lifting plan* yang telah disetujui oleh KWT dan PEP. *Tim Rigger* tersebut tidak menginfokan terlebih dahulu kepada *Foreman* dan Spv (Edu P.) bahwa akan dilakukan pengangkatan /

lifting Air Compressor B (373-V-1001B), dan pada saat itu posisi Spv (Edu P.) sedang menuju *Site Office Mechanical GTA*.



Gambar 4. Posisi Crane, Pick Up Point, Installation Point, dan Swing Direction

Pada pukul 09:00 WITA *Tim Rigger* melakukan pengangkatan / *lifting Air Compressor B* (373-V-1001B) dengan menggunakan crane 250T (Operator Crane: Suharto) atas instruksi dari Feriandi. Pada saat pengangkatan vertikal setinggi 50 cm dilakukan *hanging* selama 30 detik, dan tidak terjadi perubahan posisi equipment yang diangkat. Dilanjutkan dengan pengangkatan sampai ketinggian 10 meter, pada saat itu equipment tersebut berputar 90 derajat ke arah horizontal dari equipment, berlawanan arah jarum jam sehingga posisi motor ke sebelah barat. Beberapa saat kemudian, *rigger* (Feriandi) menginstruksikan operator crane untuk melakukan *swing boom crane* ke arah *Nitrogen Shelter* (ke arah timur). Pada saat itu, equipment berputar vertikal ke bawah dengan posisi motor menghadap ke bawah. *Webbing sling* pada *Hook Block Crane* mengalami slip (karena ikatan hidup) dan tidak dapat menahan equipment yang berputar vertikal ke bawah sehingga equipment membentur *life line* yang terbuat dari *scaffolding* di atas *Nitrogen Shelter*.

Akibat benturan yang terjadi dua panel *Enclosure Air Compressor* terlepas, jatuh ke bawah dan *life line scaffolding* rusak. Operator crane segera mengambil tindakan *swing* ke arah luar menjauh dari *Nitrogen Shelter* dengan maksud menghindari benturan equipment dengan *steel structure*. Pada pukul 09:10 WITA aktifitas *lifting* tersebut dihentikan dengan posisi equipment tersebut masih tergantung dengan posisi *base frame* berada di atas.



Gambar 5. Posisi Air Compressor B ((373-V-1001B) Twisted



Gambar 6. Life Line dari Scaffolding di Nitrogen Shelter yang Terkena Benturan Dari Air Compressor B (373-V-1001B)

Metode

Metode pengumpulan data dilakukan dengan observasi, wawancara, dan juga studi dokumen sehingga analisa sebab akibat berdasarkan komparasi dengan *Standart Codes* dan prosedur yang berlaku dipilih untuk menganalisa penyebab kejadian kegagalan *lifting air compressor*.

Hasil Kerja

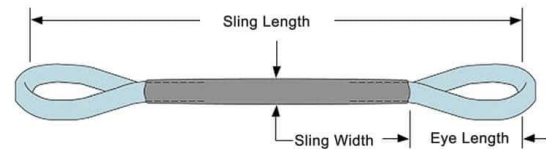
Sesuai *Standart Codes ASME B30.10 Hooks, Section 10-1.11 Operating Practies* dituliskan bahwa untuk pekerjaan *liffing* and *rigging* maka pada *Hook*, beban kejut harus dihindari dan beban harus diposisikan di tengah-tengah pada *bowl/saddle* dari *hook*.



Gambar 7. Arrangement Webbing Sling dari Main Hook Crane 250T

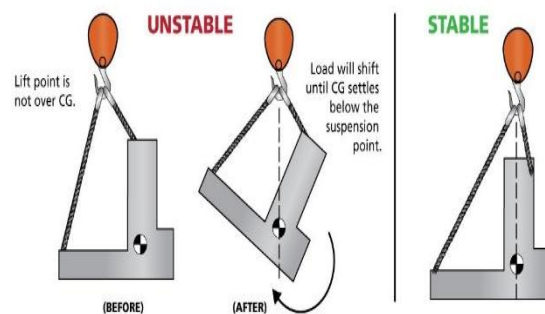
Jika melihat Gambar 7 terlihat jelas kesalahan yang mendasar pada proses *rigging* / pengikatan beban ke *main hook crane*. *Webbing sling* yang digantungkan pada *main hook crane* pengaturannya bukan pada *end connection* / *eye connection* (bagian ujung *webbing sling*) akan tetapi *webbing sling* ditekuk dan pada

bagian *belt / strap* (pita datar) yang digantungkan pada *main hook crane*. Hal seperti ini sering disebut dalam kalangan praktisi di bidang konstruksi dengan sebutan ikatan hidup. Dan hal ini tidak diperbolehkan untuk dilakukan pada *hook* alat angkat. Jika ada sedikit pergerakan dinamis (termasuk juga angin yang mendorong beban yang diangkat), sangat mungkin *webbing sling* yang tergantung pada *hook* dengan ikatan hidup dapat mengalami *slip* / bergeser.



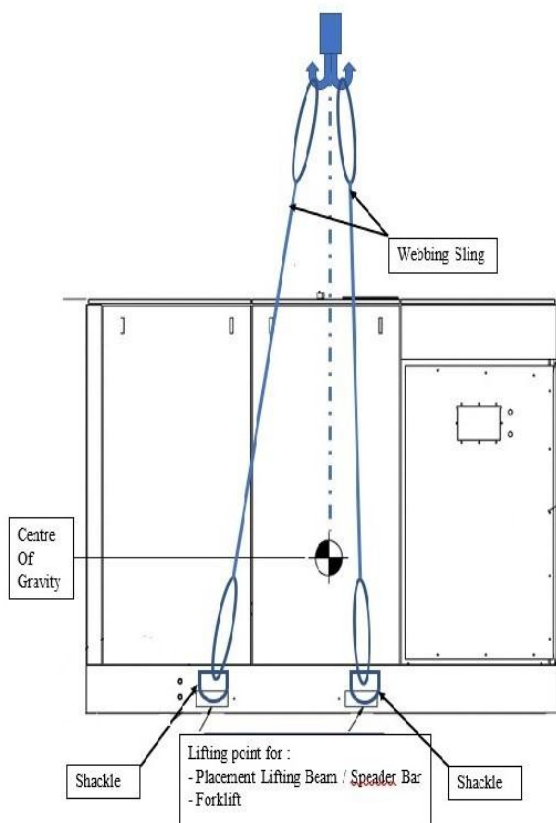
Gambar 9. Webbing Sling

Centre of gravity (COG) / titik pusat beban dari beban yang diangkat harus selalu diperhatikan untuk berada tepat lurus di bawah *hook crane* saat *lifting* / pengangkatan. Jika *rigging* tidak tepat maka posisi beban yang diangkat akan *twist* / bergerak dari posisi awal hingga beban tersebut menyesuaikan *centre of gravity*-nya lurus tepat di bawah *hook crane*. Diperlukan *rigging* yang tepat untuk sebuah aktivitas *lifting* / pengangkatan, salah satu tujuannya adalah memastikan posisi *COG* sudah berada tepat lurus dibawah *hook crane* sehingga posisi beban nantinya tidak akan berubah / bergerak saat *lifted* / diangkat.



Gambar 10. Rigging Plan

Penulis melakukan penggambaran *rigging plan* dengan mengikuti *Standart Codes* tersebut di atas. Terlihat bahwa *COG* dari beban berada tepat di bawah *hook crane*. Dari gambar tersebut dapat dilihat juga bahwa panjang *sling / webbing sling* yang diperlukan / digunakan tidak akan selalu sama panjangnya karena memperhatikan *lifting point* / titik angkat dan *centre of gravity* / titik pusat beban dari beban / barang yang akan dilakukan *lifting* / pengangkatan. Karena ketersediaan variasi panjang *sling / web sling* yang terbatas yang ada di pasaran maka untuk melakukan *adjustment* / penyesuaian panjang dari *sling / webbing sling* dapat dilakukan dengan penambahan *shackle* atau *chain block* pada titik yang membutuhkan *adjustment* / penyesuaian.



Gambar 11. Pengaruh COG dan Panjang Sling pada Kegiatan Lifting (Huyett, 2021)

Selain hal-hal tersebut di atas, kegiatan *lifting and rigging* dalam praktik keinsinyuran wajib mengetahui dan menerapkan semua *Standard Codes* dan prosedur yang berlaku agar pekerjaan *lifting and rigging* dapat berjalan dengan aman dan lancar. Sebelum melakukan kegiatan *lifting and rigging* dalam praktik keinsinyuran, dapat dilakukan *study* sederhana dengan bantuan software *Autocad* untuk membantu memastikan penentuan kelurusan antara COG dari beban yang akan diangkat dengan *hook crane* serta membantu memastikan besaran panjang dari *sling / webbing sling* di tiap *lifting point* agar dapat ditentukan penggunaan *lifting gears* lain yang diperlukan untuk kegiatan *lifting / pengangkatan* tersebut.

Kesimpulan

Dari studi kasus ini dapat disimpulkan bahwa penyebab dari kegagalan *lifting air compressor* adalah:

1. *Webbing sling* pada *main block crane* 250T pada posisi hidup.
2. *Arrangement lifting gear* aktual tidak sesuai dengan *lifting plan*.
3. Instruksi pengangkatan dilakukan oleh orang yang tidak berwenang (*Rigger-1*) dan tidak berkompentensi (tidak ada sertifikasi *rigger*).
4. Tidak ada komunikasi antara pekerja dan Supervisor (*Spv*) untuk detail dan ijin pengangkatan *equipment*.

Sehingga disarankan :

1. Mengetahui serta menerapkan *Standart Codes* dan prosedur yang berlaku untuk membuat rencana aktivitas / kegiatan *lifting and rigging*.

2. Menggunakan software *Auctocad* untuk membantu membuat *lifting and rigging plan*.
3. Melakukan *briefing / toolbox meeting* sesaat sebelum aktivitas / kegiatan *lifting / pengangkatan*.
4. Saling mengingatkan antar sesama personil terkait perilaku dan atau keadaan tidak aman.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih ditujukan kepada Bapak Ir. Andrew Joewono, S.T. M.T., IPU., ASEAN Eng., APEC Eng. yang telah memberikan bimbingan dan semangat dalam penulisan artikel ini.

Referensi

- ASME. (2015). *ASME B30.26: Rigging hardware*. The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME. (2021). *ASME B30.5: Mobile and locomotive cranes*. The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME. (2022). *ASME B30.23: Personnel lifting systems*. The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME. (2024). *ASME B30.9: Slings*. The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME. (2024). *ASME B30.10: Hooks*. The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME. (2025). *ASME B30.21: Lever hoists*. The American Society of Mechanical Engineers.
- Huyett. (2021). *Rigging terms: A rigging equipment and lifting glossary*. Retrieved from <https://www.huyett.com/blog/rigging-terms>
- Indonesia, P. (1970). *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 1 Tahun 1970 tentang keselamatan kerja*. Jakarta, Indonesia.
- Nobel Riggindo. (2024). *Rigging: Definisi, bahan, dan jenis finishingnya*. Retrieved from <https://nobelriggindo.co.id/rigging-definisi-bahan-dan-jenis-finishingnya>
- PT Pertamina EP. (2015). *Lifting & rigging procedure: Matindok Gas Development Project*.
- Pemerintah Indonesia. (1985). *Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor PER.05/MEN/1985 tentang pesawat angkat dan angkut*. Jakarta, Indonesia.
- Pemerintah Indonesia. (1991). *Peraturan Pertambangan dan Energi Nomor 06 P/0746/M.PE/1991 tentang pemeriksaan keselamatan kerja atas instalasi peralatan dan teknik dalam pertambangan minyak dan gas bumi serta panas bumi*. Jakarta, Indonesia.
- Pemerintah Indonesia. (1998). *Keputusan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi Nomor 84.K/38/DJM/1998 tentang pedoman dan tata cara pemeriksaan keselamatan kerja atas instalasi, peralatan, dan teknik dalam usaha pertambangan minyak dan gas bumi serta panas bumi*. Jakarta, Indonesia.
- Pemerintah Indonesia. (2010). *Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor PER.09/MEN/2010 tentang operator dan petugas pesawat angkat dan angkut*. Jakarta, Indonesia.



Penerapan Prinsip Keinsinyuran dalam Pengembangan Media Pembelajaran Digital untuk Meningkatkan Keselamatan dan Efisiensi Praktikum Laboratorium Konstruksi

Putri D. K. Djahamouw^{1,2} Tarsisius D. W. Budianta¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

² Politeknik Negeri Kupang

✉ putridwikananti28@gmail.com

Perkembangan teknologi digital menuntut inovasi pembelajaran di pendidikan vokasi teknik agar lebih efisien dan berorientasi pada keselamatan kerja. Studi ini menerapkan prinsip keinsinyuran dalam mengembangkan media pembelajaran digital berbentuk video interaktif di Laboratorium Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang. Permasalahan utama yang dihadapi adalah rendahnya pemahaman mahasiswa baru terhadap penggunaan alat laboratorium dan penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) akibat keterbatasan waktu pengenalan alat serta metode pembelajaran konvensional. Penelitian ini menggunakan pendekatan *engineering design process* dengan tahapan identifikasi masalah, perancangan, implementasi, dan evaluasi hasil, disertai analisis sebab-akibat menggunakan *Fishbone Diagram*. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan media digital meningkatkan pemahaman mahasiswa terhadap fungsi alat, kepatuhan terhadap penggunaan Alat Pelindung Diri (APD), serta efisiensi waktu praktikum. Penerapan solusi ini terbukti meningkatkan mutu, efisiensi, dan keselamatan pembelajaran praktikum, sekaligus menunjukkan peran nyata insinyur profesional dalam merancang inovasi berbasis teknologi di lingkungan pendidikan vokasi teknik.

Kata kunci: Keinsinyuran, Pembelajaran Digital, Keselamatan Kerja, Laboratorium Konstruksi, Efisiensi Praktikum

Pendahuluan

Pendidikan vokasi di bidang teknik memiliki peran strategis dalam mencetak sumber daya manusia yang kompeten dan siap menghadapi tantangan dunia industri modern. Perkembangan teknologi digital dalam era Revolusi Industri 4.0 telah mengubah paradigma pembelajaran dari sistem konvensional menuju sistem yang lebih interaktif, fleksibel, dan berbasis teknologi informasi. Pada institusi pendidikan tinggi vokasi, termasuk Politeknik Negeri Kupang, penerapan pembelajaran digital menjadi bagian penting untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi proses belajar-mengajar, khususnya pada kegiatan praktikum yang menuntut keterampilan teknis dan ketepatan operasional.

Laboratorium merupakan komponen utama dalam pendidikan teknik karena berfungsi sebagai sarana penerapan teori menjadi keterampilan praktis. Namun, efektivitas kegiatan praktikum sangat bergantung pada pemahaman mahasiswa terhadap peralatan dan prosedur kerja. Berdasarkan hasil pengamatan di Laboratorium Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang, ditemukan bahwa sebagian besar mahasiswa baru mengalami kesulitan dalam mengenali fungsi alat dan prosedur keselamatan kerja (K3). Hal ini disebabkan oleh keterbatasan waktu pengenalan alat, metode pembelajaran yang masih bersifat verbal, dan belum tersedianya media pembelajaran visual yang menarik dan mudah diakses. Kondisi tersebut tidak hanya menghambat efektivitas pembelajaran tetapi juga meningkatkan potensi risiko keselamatan kerja di laboratorium.

Sejalan dengan semangat transformasi digital pendidikan vokasi dan penerapan prinsip keinsinyuran,

dibutuhkan inovasi pembelajaran yang mampu menjawab permasalahan tersebut secara efisien dan berkelanjutan. Oleh karena itu, dalam proyek studi kasus ini dikembangkan **media pembelajaran digital berbentuk video interaktif** yang dirancang untuk meningkatkan pemahaman mahasiswa terhadap penggunaan peralatan dan penerapan keselamatan kerja di Laboratorium Konstruksi. Penerapan prinsip keinsinyuran dilakukan melalui tahapan analisis masalah, perancangan, implementasi, serta evaluasi hasil untuk menilai efektivitas media pembelajaran dalam meningkatkan keselamatan dan efisiensi pelaksanaan praktikum di lingkungan pendidikan teknik vokasi.

Kerangka Konseptual

Kerangka konseptual dalam studi kasus ini disusun untuk menggambarkan keterkaitan antara penerapan prinsip keinsinyuran, pengembangan media pembelajaran digital, dan peningkatan keselamatan serta efisiensi pelaksanaan praktikum di Laboratorium Konstruksi. Berdasarkan teori *engineering design process* (Eide et al, 2012) dan konsep *multimedia learning* (Mayer, 2009), kegiatan rekayasa pendidikan dilakukan melalui tahapan identifikasi masalah, perancangan solusi digital, implementasi, dan evaluasi hasil. Faktor utama yang menjadi dasar pengembangan adalah temuan awal bahwa rendahnya pemahaman mahasiswa terhadap alat dan penerapan keselamatan kerja disebabkan oleh keterbatasan waktu, metode pembelajaran konvensional, dan belum adanya media digital yang representatif. Oleh karena itu, penerapan prinsip keinsinyuran dilakukan untuk menghasilkan inovasi media pembelajaran yang efisien, adaptif, dan aman.

Secara konseptual, hubungan antarunsur dalam proyek ini dapat dijelaskan sebagai berikut: penerapan **prinsip keinsinyuran (X1)** memengaruhi **perancangan media pembelajaran digital (X2)**, yang kemudian berpengaruh pada **peningkatan efektivitas pembelajaran (Y1)** dan **peningkatan keselamatan kerja mahasiswa (Y2)**. Hubungan ini membentuk sistem rekayasa pendidikan yang terukur dan berorientasi pada peningkatan mutu pembelajaran vokasi teknik. Secara singkat Kerangka Konseptual dapat dijelaskan sebagai berikut:

Prinsip Keinsinyuran → Media Pembelajaran Digital →
Efisiensi & Keselamatan Praktikum

Metode

Studi ini menggunakan pendekatan **studi kasus keinsinyuran** yang berfokus pada penerapan prinsip *engineering design process* untuk menyelesaikan permasalahan pembelajaran praktikum di Laboratorium Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang. Proses penelitian terdiri atas empat tahapan utama, yaitu **identifikasi masalah, perancangan solusi, implementasi, dan evaluasi hasil**. Data dikumpulkan melalui **observasi langsung, wawancara terstruktur** dengan dosen pengampu dan teknisi laboratorium, serta **studi dokumen** terhadap pedoman praktikum dan standar keselamatan kerja yang berlaku. Selain itu, dilakukan **uji coba media pembelajaran digital** kepada kelompok mahasiswa baru sebagai pengguna awal untuk menilai efektivitas dan keterpahaman media yang dikembangkan.

Analisis permasalahan dilakukan menggunakan **metode Fishbone Diagram (Ishikawa)** untuk mengidentifikasi akar penyebab rendahnya efektivitas pembelajaran dan penerapan K3. Evaluasi efektivitas media dilakukan dengan metode **analisis deskriptif kualitatif**, berdasarkan hasil observasi dan kuesioner mahasiswa, untuk menilai peningkatan pemahaman dan kesadaran terhadap penggunaan alat serta Alat Pelindung Diri (APD).

Dalam pengembangan media pembelajaran digital, penyusunan konten dan prosedur kerja mengacu pada **Standar Operasional Prosedur (SOP) Laboratorium Konstruksi Politeknik Negeri Kupang**, serta prinsip **Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)** sesuai **Permenakertrans No. PER.05/MEN/1996** dan **SNI terkait pengujian bahan konstruksi**. Seluruh tahapan pelaksanaan mengikuti etika profesi insinyur sebagaimana diatur dalam **Undang-Undang Nomor 11 Tahun 2014 tentang Keinsinyuran**.

Pelaksanaan studi kasus ini sepenuhnya berlandaskan pada prinsip etika profesi insinyur sebagaimana diatur dalam **Undang-Undang Nomor 11 Tahun 2014 tentang Keinsinyuran** dan **Kode Etik Insinyur Indonesia**. Dalam konteks proyek ini, etika profesi diterapkan dengan menjunjung tinggi integritas, tanggung jawab sosial, keselamatan pengguna, dan kejujuran akademik dalam seluruh proses kegiatan. Setiap tahapan proyek, mulai dari perancangan, pengembangan, hingga implementasi media pembelajaran digital, dilakukan dengan memperhatikan keselamatan kerja dan keamanan pengguna. proyek ini menggambarkan tanggung jawab seorang insinyur pendidik dalam memberikan solusi inovatif yang berorientasi pada peningkatan mutu pembelajaran dan budaya keselamatan kerja. Nilai-nilai profesional seperti akuntabilitas,

objektivitas, dan kolaborasi juga menjadi fondasi penting dalam pelaksanaan kegiatan. Dengan demikian, proyek ini tidak hanya menghasilkan inovasi teknis, tetapi juga mencerminkan implementasi nyata dari sikap dan perilaku profesional seorang insinyur dalam lingkungan akademik.

Hasil Kerja

Hasil Kerja dan Keterkaitan dengan Teori Keinsinyuran

Kegiatan studi kasus ini menghasilkan **media pembelajaran digital berbentuk video interaktif** yang berisi pengenalan alat-alat laboratorium, prosedur penggunaan, serta penerapan keselamatan kerja (*Keselamatan dan Kesehatan Kerja/K3*) bagi mahasiswa baru Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang. Pengembangan media dilakukan berdasarkan tahapan *engineering design process*, mulai dari identifikasi kebutuhan, perancangan, implementasi, hingga evaluasi.

Hasil penerapan menunjukkan bahwa penggunaan video pembelajaran interaktif memberikan peningkatan signifikan terhadap pemahaman mahasiswa. Berdasarkan hasil kuesioner terhadap 15 responden mahasiswa baru, sebanyak **87%** menyatakan video memudahkan mereka memahami fungsi alat, **80%** merasa lebih sadar akan pentingnya penggunaan Alat Pelindung Diri (APD), dan **73%** menilai pelaksanaan praktikum menjadi lebih efisien dibandingkan metode konvensional.

Secara keilmuan, hasil ini sejalan dengan teori *multimedia learning* oleh Mayer (2009), yang menjelaskan bahwa kombinasi antara informasi visual dan verbal dapat meningkatkan daya serap dan pemahaman konsep teknis hingga 80%. Selain itu, penerapan prinsip *system thinking* dalam desain media digital memastikan proses rekayasa tidak hanya berorientasi pada hasil, tetapi juga memperhatikan keselamatan dan efisiensi operasional, yang merupakan dua pilar utama dalam praktik keinsinyuran profesional. Selain itu, penerapan pendekatan *engineering design process* dalam pengembangan media pembelajaran ini terbukti efektif dalam menghasilkan solusi yang sistematis dan terukur. Hal ini memperlihatkan bahwa penerapan prinsip keinsinyuran tidak hanya relevan pada konteks industri, tetapi juga sangat bermanfaat dalam pengembangan sistem pembelajaran teknik.

Urgensi, Manfaat, dan Keterkaitan dengan Profesi Keinsinyuran

Proyek ini memiliki urgensi tinggi karena menjawab kebutuhan nyata di lingkungan pendidikan vokasi teknik, khususnya terkait **rendahnya pemahaman mahasiswa baru terhadap prosedur kerja laboratorium dan penerapan K3**. Kondisi ini berpotensi menimbulkan risiko kecelakaan kerja serta menurunkan efektivitas pembelajaran.

Sebagai seorang insinyur profesional yang juga berperan dalam dunia pendidikan, penulis menerapkan **pendekatan keinsinyuran pendidikan (*educational engineering*)** untuk menghasilkan solusi yang efisien, aman, dan adaptif terhadap perkembangan teknologi. Pendekatan ini memperlihatkan bagaimana prinsip keinsinyuran, seperti efisiensi sistem, keselamatan kerja, optimalisasi sumber daya, dan inovasi teknologi, dapat diterapkan di bidang pendidikan teknik.

Dari sisi profesi, proyek ini memperkuat kompetensi utama seorang insinyur, yaitu **kemampuan memecahkan masalah kompleks dengan pendekatan analitis dan**

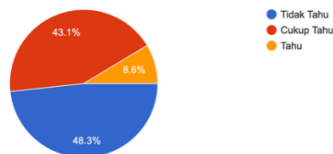
rekayasa sistematis. Hasil kegiatan juga berkontribusi terhadap peningkatan budaya keselamatan di lingkungan laboratorium dan mendukung kebijakan digitalisasi pembelajaran vokasi sebagaimana diamanatkan oleh Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi melalui program transformasi pendidikan vokasi (Kemendikbudristek, 2020).

Hasil proyek ini sejalan dengan temuan **Li & Liang (2024)** serta **Haberbosch et al. (2025)** yang menunjukkan bahwa integrasi laboratorium digital dan media visual mampu meningkatkan keselamatan kerja mahasiswa hingga 90% serta mempercepat adaptasi terhadap alat baru. Dengan demikian, proyek ini tidak hanya memberikan manfaat lokal di Politeknik Negeri Kupang, tetapi juga berpotensi menjadi model penerapan inovasi keinsinyuran pendidikan di institusi vokasi lainnya.

Penyajian Data dan Visualisasi Hasil

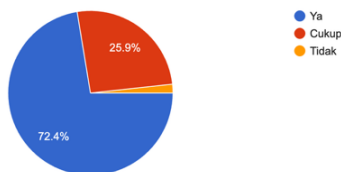
Untuk memperjelas hasil yang dicapai, Gambar 1, Gambar 2, dan Tabel 1 berikut menyajikan hasil implementasi media pembelajaran digital terhadap peningkatan pemahaman dan efisiensi pelaksanaan praktikum.

Sebelum menonton Video ini, apakah anda sudah mengetahui cara penggunaan Hand tool dan Pengoperasian Mesin Statis pada Lab Konstruksi?
58 responses



Gambar 1. Respon Pengguna Sebelum Penerapan Media Pembelajaran Digital

Setelah menonton Video ini, apakah anda akhirnya mengetahui dan mengerti cara penggunaan Hand tool dan Pengoperasian Mesin Statis pada Lab Konstruksi?
58 responses



Apakah Video ini menarik dan membantu anda dalam pembelajaran?
58 responses



Gambar 2. Hasil Evaluasi pemahaman dan kesadaran mahasiswa secara visual

Tabel 1. Hasil Evaluasi Efektivitas Media Pembelajaran Digital di Laboratorium Konstruksi

Aspek yang Dinilai	Sebelum Implementasi	Setelah Implementasi	Peningkatan (%)
Pemahaman fungsi alat	50%	85%	+35
Kepatuhan penggunaan APD	65%	95%	+30
Efisiensi waktu praktikum	-	30% lebih cepat	—
Jumlah kecelakaan kerja ringan	2 kasus / semester	0 kasus	Eliminasi penuh

Hasil pada Tabel 1 menunjukkan adanya peningkatan nyata pada seluruh indikator kinerja laboratorium setelah diterapkannya media pembelajaran digital. Dari perspektif keinsinyuran, hal ini menggambarkan keberhasilan penerapan solusi berbasis teknologi untuk meningkatkan **keamanan (safety)**, **efisiensi waktu (time efficiency)**, dan **kinerja sistem pembelajaran (system performance)** secara bersamaan.

Peningkatan pemahaman mahasiswa terhadap fungsi alat sebesar 35% disebabkan oleh penyajian visual dalam video yang memungkinkan mahasiswa melihat langsung urutan penggunaan alat sesuai SOP. Hal ini konsisten dengan prinsip *experiential learning* dan konsep *multimedia learning* oleh Mayer (2009), yang menegaskan bahwa penyajian informasi visual-verbal meningkatkan retensi hingga 80%. Selain itu, peningkatan kepatuhan terhadap penggunaan APD menunjukkan keberhasilan pendekatan keinsinyuran dalam memperkuat aspek keselamatan kerja melalui rekayasa perilaku dan desain sistem pembelajaran yang berfokus pada mitigasi risiko.

Dengan demikian, proyek ini menjadi bukti bahwa penerapan prinsip keinsinyuran dalam konteks pendidikan vokasi dapat menghasilkan solusi inovatif yang berdampak langsung terhadap mutu pembelajaran dan keselamatan kerja.

Kesimpulan

Penerapan prinsip keinsinyuran dalam pengembangan media pembelajaran digital di Laboratorium Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang terbukti mampu meningkatkan efektivitas dan keselamatan kegiatan praktikum. Hasil implementasi menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada pemahaman mahasiswa terhadap fungsi alat (dari 50% menjadi 85%), kepatuhan penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) (dari 65% menjadi 95%), serta efisiensi waktu pelaksanaan praktikum yang meningkat sekitar 30%. Tidak ditemukan kasus kecelakaan kerja ringan selama periode uji coba, yang menandakan keberhasilan penerapan pendekatan teknologi dalam mendukung budaya keselamatan kerja.

Secara keilmuan, proyek ini menunjukkan bagaimana prinsip keinsinyuran, khususnya efisiensi sistem, inovasi teknologi, dan keselamatan kerja, dapat diterapkan secara nyata dalam konteks pendidikan vokasi teknik. Pengembangan media pembelajaran berbasis video interaktif tidak hanya menjawab permasalahan pembelajaran konvensional, tetapi juga mendorong transformasi digital di lingkungan laboratorium teknik.

Sebagai tindak lanjut, media pembelajaran ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan integrasi ke dalam sistem pembelajaran daring kampus serta diperluas penerapannya pada laboratorium lain di jurusan teknik sipil maupun program studi vokasi lain. Kolaborasi antarinsinyur pendidik dalam pengembangan konten multimedia teknis juga direkomendasikan untuk memperkaya inovasi dan memperkuat peran profesi insinyur dalam mendukung pendidikan vokasi yang adaptif dan berkelanjutan.

Diskusi dan Keterbatasan Studi

Pelaksanaan proyek penerapan media pembelajaran digital di Laboratorium Konstruksi Politeknik Negeri Kupang telah menunjukkan hasil yang positif terhadap peningkatan pemahaman mahasiswa, efisiensi waktu praktikum, dan kesadaran keselamatan kerja. Namun demikian, proyek ini juga memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu dicermati untuk penyempurnaan pada tahap pengembangan berikutnya.

Pertama, cakupan implementasi masih terbatas pada satu laboratorium dan satu angkatan mahasiswa, sehingga efektivitas media pembelajaran belum dapat digeneralisasi secara luas ke seluruh jurusan atau institusi sejenis. Kedua, keberhasilan media digital sangat dipengaruhi oleh ketersediaan perangkat teknologi dan konektivitas internet, yang tidak selalu merata di lingkungan kampus vokasi. Ketiga, evaluasi efektivitas pembelajaran masih berfokus pada aspek kognitif dan perilaku keselamatan, sementara aspek afektif dan motivasi belajar mahasiswa belum dieksplorasi secara mendalam.

Selain itu, proyek ini masih bersifat uji coba awal dan belum terintegrasi penuh ke dalam sistem pembelajaran daring kampus. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk melibatkan lebih banyak partisipan, memperluas jenis media interaktif (misalnya dengan teknologi realitas virtual atau simulasi 3D), serta menggunakan metode evaluasi kuantitatif yang lebih komprehensif. Dengan demikian, pengembangan media pembelajaran digital dapat terus disempurnakan menjadi sistem rekayasa pendidikan yang berkelanjutan, efisien, dan adaptif terhadap perkembangan teknologi.

Implikasi Keinsinyuran dan Rencana Pengembangan

Penerapan prinsip keinsinyuran dalam proyek ini membuktikan bahwa seorang insinyur tidak hanya berperan dalam bidang teknis, tetapi juga memiliki tanggung jawab sosial dan edukatif dalam memastikan keamanan, efisiensi, serta keberlanjutan proses pembelajaran di lingkungan pendidikan vokasi. Inovasi media pembelajaran digital yang dikembangkan memperlihatkan bagaimana pendekatan rekayasa sistem dapat diterapkan di luar konteks industri, yaitu untuk menyelesaikan permasalahan di bidang pendidikan teknik secara efektif dan berorientasi pada keselamatan kerja.

Secara profesional, proyek ini memperkuat kompetensi insinyur dalam aspek **analisis sistem, manajemen risiko, dan optimalisasi proses pembelajaran teknis**. Penggunaan pendekatan digital juga menjadi bukti kemampuan adaptif insinyur terhadap perubahan teknologi dan kebutuhan era industri 4.0. Hasil yang diperoleh dapat menjadi model penerapan rekayasa pendidikan di institusi vokasi lainnya, baik pada skala lokal maupun nasional.

Rencana pengembangan ke depan adalah memperluas penerapan media pembelajaran ini pada laboratorium lain di lingkungan Politeknik Negeri Kupang, serta mengintegrasikannya dengan platform *Learning Management System (LMS)* kampus. Selain itu, pengembangan lebih lanjut dapat diarahkan pada pembuatan **simulasi berbasis realitas virtual (VR)** agar mahasiswa dapat berlatih menggunakan alat secara aman sebelum praktik langsung. Implementasi ini diharapkan mampu mendukung misi pendidikan vokasi yang unggul, adaptif terhadap teknologi, serta berorientasi pada keselamatan dan profesionalisme keinsinyuran.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ketua Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang yang telah memberikan kesempatan dan dukungan kepada penulis untuk berkarya serta mengembangkan inovasi pembelajaran di Laboratorium Konstruksi. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Kepala Laboratorium Konstruksi yang telah memberikan izin dan kepercayaan kepada penulis untuk mengimplementasikan ilmu serta melakukan pengembangan media pembelajaran digital di lingkungan laboratorium. Penghargaan yang tulus juga penulis sampaikan kepada Pranata Laboratorium Konstruksi yang telah membantu dan mengarahkan penulis dalam penggunaan serta pengoperasian alat-alat laboratorium selama kegiatan praktikum berlangsung.

Penulis tidak lupa mengucapkan terima kasih kepada Dosen Pembimbing yang telah memberikan arahan, saran, dan masukan konstruktif dalam penyusunan laporan studi kasus ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada rekan-rekan sejawat di Jurusan Teknik Sipil atas ide, dukungan, dan kerja sama yang diberikan selama proses pelaksanaan kegiatan dan penyelesaian laporan ini. Semoga segala bentuk bantuan dan kolaborasi ini menjadi kontribusi nyata dalam mendukung pengembangan inovasi keinsinyuran di bidang pendidikan teknik vokasi.

Referensi

- Eide, A. R., Jenison, R. D., Northup, L. L., & Mickelson, S. K. (2012). *Engineering fundamentals and problem solving* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Garrison, D. R., & Kanuka, H. (2004). Blended learning: Uncovering its transformative potential in higher education. *The Internet and Higher Education*, 7(2), 95–105.
<https://doi.org/10.1016/j.iheduc.2004.02.001>
- Goetsch, D. L. (2011). *Occupational safety and health for technologists, engineers, and managers* (7th ed.). Pearson Education.
- Haberbosch, M., Wuttke, H., & Böhm, M. (2025). Combining virtual and hands-on lab work in a blended approach: Increasing safety knowledge and student motivation. *Education Sciences*, 15(1), 22–31.
<https://doi.org/10.3390/educsci15010022>
- Kemendikbudristek. (2020). *Kebijakan Merdeka Belajar–Kampus Merdeka (MBKM): Panduan pelaksanaan di pendidikan vokasi*. Direktorat Jenderal Pendidikan Vokasi, Jakarta, Indonesia.
- Li, J., & Liang, W. (2024). Effectiveness of virtual laboratory in engineering education: A meta-analysis. *PLOS ONE*, 19(4), e0316269.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0316269>



- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia learning* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Nugroho, D., Santosa, A., & Hidayat, R. (2019). Analisis penerapan K3 di laboratorium teknik sipil terhadap kesadaran mahasiswa. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 23(1), 15–22.
- Republik Indonesia. (1996). *Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Nomor PER.05/MEN/1996 tentang sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja (SMK3)*. Jakarta, Indonesia.
- Republik Indonesia. (2014). *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2014 tentang keinsinyuran*. Jakarta, Indonesia.
- Wahyudi, M. N. A. (2023). Understanding virtual laboratories in engineering education: A systematic review. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*, 18(12), 121–139. <https://doi.org/10.3991/ijet.v18i12.42855>
- Zaneldin, E. (2019). Video-based e-learning for an undergraduate engineering course. *Education and Information Technologies*, 25(6), 4781–4795. <https://doi.org/10.1177/2042753019870938>



Analisis Dampak dan Penyebab Kebocoran Condenser pada Sistem Degasser di PT Asia Pacific Rayon Dalam Perspektif Keinsinyuran

Davit Susanto¹ Rio Joko Purnomo² Rivqi Ali Syahid³

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ davitsusanto1992@mail.ugm.ac.id

Degasser merupakan sistem yang berfungsi dalam proses pemisahan gas *hydrogen sulfide* (H_2S) dan *carbon disulfide* (CS_2) yang merupakan hasil samping reaksi antara larutan *spinbath* (SPB) dan *viscose* dalam pembentukan serat rayon. Sistem *degasser* dalam industri rayon memegang peranan penting karena membantu proses *recycle sulfur* (S) sehingga mengurangi penggunaan *chemical* yakni *sulfur* (S), *sulfuric acid* (H_2SO_4) dan juga *caustic* (NaOH). Hal tersebut sejalan dengan komitmen perusahaan dalam mendukung program *Sustainability Development Goals* (SDGs). Selain itu *degasser* juga membantu mencegah pencemaran lingkungan akibat gas emisi H_2S dan CS_2 yang dihasilkan, serta mengurangi dampak kesehatan bagi pekerja khususnya terhadap paparan gas H_2S dan CS_2 yang memiliki sifat beracun. Pada tahun 2024 terjadi kebocoran *condenser* dalam sistem *degasser line 1* dan *line 2*. Sebagai bagian dari tanggung jawab profesi insinyur, dilakukan langkah isolasi dan perencanaan perbaikan pada *degasser condenser* tersebut. Proses perbaikan memerlukan pendekatan keinsinyuran yang komprehensif, meliputi analisis risiko teknis, perencanaan kerja yang sistematis, dan penerapan prinsip keselamatan. Kebocoran tersebut berdampak pada penurunan performa *degasser* yang mengakibatkan pemisahan gas H_2S dan CS_2 dalam larutan SPB tidak berjalan optimal. Studi ini dilakukan untuk menentukan penyebab utama dan dampak yang diakibatkan kebocoran pada *degasser condenser*. Metode analisis yang digunakan yaitu dengan melakukan pengumpulan data, yakni spesifikasi material, peralatan, dan parameter operasi yang kemudian dilakukan perbandingan dengan kondisi aktual. Dari hasil analisis yang dilakukan, kebocoran *degasser condenser* diakibatkan tidak adanya *demister* dalam sistem *degasser* yang berfungsi mencegah adanya *acid carryover* dari larutan SPB. Direkomendasikan pemasangan *demister* pada sistem *degasser* untuk mencegah kebocoran yang sama terulang kembali. Kebocoran *degasser condenser* memberi dampak penurunan *flow RG* dari $810 \text{ Nm}^3/\text{h}$ menjadi $511 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (*line 1*) dan $618 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (*line 2*), mengurangi produksi *acid RG* di *WSA plant* dari $61,25 \text{ kg/Tvsf}$ menjadi $40,81 \text{ kg/Tvsf}$ (*line 1*) dan $43,53 \text{ kg/Tvsf}$ (*line 2*), serta memperbesar konsumsi *caustic* (NaOH) dari $35,4 \text{ kg/Tvsf}$ menjadi $39,9 \text{ kg/Tvsf}$ (*line 1*) dan 41 kg/Tvsf (*line 2*).

Kata kunci: *Degasser*, *Condenser*, Kebocoran, Gas Emisi (H_2S , CS_2), SDGs, Keinsinyuran

Pendahuluan

PT Asia Pacific Rayon merupakan salah satu industri yang bergerak dibidang produksi serat rayon/ *viscose*. Bahan baku yang digunakan berasal dari hutan tanaman industri (HTI) menjadikannya produk yang ramah lingkungan dan berkelanjutan (*sustainable*). Adapun proses produksi dilakukan dengan cara mereaksikan larutan *viscose* dengan larutan *spinbath* (SPB) sehingga menghasilkan produk utama serat rayon. Dari hasil reaksi tersebut juga dihasilkan beberapa produk samping yakni; *sodium sulfate* (Na_2SO_4), air, serta gas *hydrogen sulfide* (H_2S) dan *carbon disulfide* (CS_2) (Kudva & Sahu, 2020). Adapun larutan *viscose* diperoleh dari

reaksi antara selulosa dan alkali (WILKES, 2001). Reaksi berlangsung pada suhu $20-30^\circ\text{C}$ (Mendes et al., 2021).

Degasser merupakan sistem yang berfungsi dalam proses pemisahan gas H_2S dan CS_2 yang merupakan hasil samping dari proses reaksi antara larutan SPB dan larutan *viscose* dalam pembentukan serat rayon (*viscose*). Pemisahan dilakukan dengan cara menguapkan larutan SPB tersebut pada sebuah *degasser vessel* dalam kondisi vakum kemudian dikondensasikan melalui *condenser*. Gas yang telah dipisahkan, disebut dengan *Rich Gas* (RG) kemudian dikirim menuju *Wet Sulfuric acid* (WSA) Plant untuk dibakar sehingga menghasilkan *sulfuric acid* (H_2SO_4) (Maurer, 2016). *Sulfuric acid* (H_2SO_4) tersebut kemudian digunakan

kembali pada larutan SPB. Proses tersebut berlangsung secara terus menerus dengan sistem tertutup (*closed system*).

Sistem *degasser* dalam industri rayon (*viscose*) memegang peranan penting karena membantu proses *recycle sulfur* (S) sehingga mengurangi penggunaan *chemical* yakni *sulfur* (S), *sulfuric acid* (H_2SO_4), dan juga *caustic* (NaOH). Hal tersebut tentu sejalan dengan komitmen perusahaan dalam mendukung program *Sustainability Development Goals* (SDGs). Selain itu *degasser* juga membantu mencegah pencemaran lingkungan akibat gas H_2S dan CS_2 yang dihasilkan dalam industri rayon, serta yang tidak kalah penting, adanya *degasser* mampu mengurangi dampak kesehatan bagi pekerja khususnya terhadap paparan gas H_2S dan CS_2 yang memiliki sifat beracun (Lei, 2011). Selain itu gas CS_2 juga dapat menyebabkan gangguan kardiovaskular, kejiwaan, neuropsikologis, endokrin, dan reproduksi (Majumdar, 2022).

Pada tahun 2024 terjadi kebocoran pada *degasser condenser line 1* dan *line 2*. Kebocoran tersebut berdampak pada penurunan performa *degasser* yang mengakibatkan pemisahan gas H_2S dan CS_2 dalam larutan SPB tidak berjalan optimal. Akibatnya, jumlah gas H_2S dan CS_2 yang terlarut semakin meningkat. Sebagai bagian dari tanggung jawab profesi insinyur, dilakukan langkah isolasi dan perencanaan perbaikan pada *degasser condenser* tersebut. Proses perbaikan memerlukan pendekatan keinsinyuran yang komprehensif, meliputi analisis risiko teknis, perencanaan kerja yang sistematis, dan penerapan prinsip keselamatan. Adapun tantangan dalam proses perbaikan tersebut adalah kebakaran dan ledakan akibat sisa gas H_2S dan CS_2 yang terperangkap dalam sistem. Oleh karena itu, dibutuhkan perencanaan teknik yang matang dan penerapan etika keinsinyuran untuk menjamin keselamatan personel dan peralatan. Proses perbaikan meliputi proses isolasi, dekontaminasi gas sisa, *purging*, *welding*, *hydrotest* dan *commissioning*. Banyaknya tahapan tersebut memerlukan koordinasi lintas disiplin keinsinyuran, termasuk bidang mekanikal, kimia, dan keselamatan kerja yang berdampak pada durasi perbaikan yang relatif panjang.

Dampak dari isolasi *degasser condenser* tersebut mengakibatkan penurunan jumlah produksi *acid RG*, selain itu untuk mencegah gas H_2S terlepas ke atmosfer selama proses perbaikan, maka gas tersebut dialirkan menuju *scrubber* untuk proses absorpsi dengan bantuan larutan *caustic* (NaOH) dimana hal ini akan berdampak pada kenaikan konsumsi *caustic* (NaOH).

Dalam penelitian ini berfokus melakukan analisis dampak yang diakibatkan kebocoran *degasser condenser* di PT Asia Pacific Rayon, menentukan penyebab kebocoran (*root cause*) dan rekomendasi perbaikan agar permasalahan tersebut tidak terulang di kemudian hari.

Metode

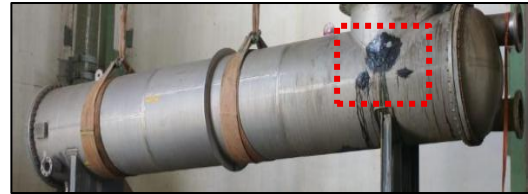
Metode analisis yang digunakan melalui pengumpulan data PI (*process information*) meliputi *flowmeter Rich Gas* (RG), *flowmeter caustic* (NaOH) yang kemudian di konversi dalam *excell*. Selain itu, juga dilakukan pengumpulan data spesifikasi *design* dari

vendor degasser yang kemudian dilakukan perbandingan dengan kondisi aktual.

Hasil Kerja

Analisis Permasalahan

Dari hasil analisa data yang dilakukan kebocoran tidak terjadi pada *plat condenser*, melainkan pada sambungan las (*welding joint*) (Gambar 1).



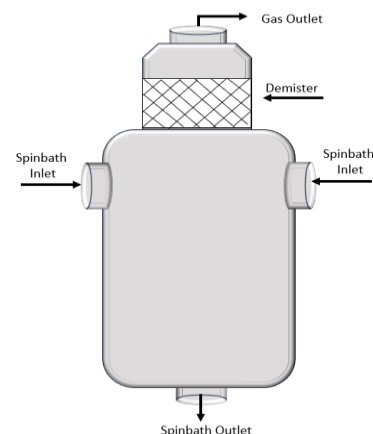
(a)

(b)

Gambar 1. Titik Kebocoran Bagian Condenser
a) line 1 b) line 2

Kebocoran pada sambungan las (*welding joint*) tersebut dapat disebabkan beberapa hal yakni, kegagalan pengelasan (*welding*) pada saat proses fabrikasi awal atau diakibatkan kontak dengan bahan yang bersifat korosif (asam), sehingga merusak struktur material *condenser* atau dapat juga kombinasi keduanya. Mengenai penyebab kegagalan saat proses fabrikasi, hal ini sulit dibuktikan, mengingat sebelum proses instalasi berlangsung, semua peralatan sudah melewati tahapan *quality check* (QC).

Pada penyebab kedua, yakni adanya kontak dengan bahan yang bersifat korosif dapat mungkin terjadi, mengingat larutan yang dialirkan pada sistem *degasser* merupakan larutan SPB yang bersifat asam. Perihal pencegahan *acid carryover* tersebut, *vendor* telah memberikan rekomendasi pemasangan *demister* pada *degasser* (Gambar 2). Fungsinya untuk mencegah *acid* dari larutan SPB terbawa menuju *condenser*.



Gambar 2. Degasser Vessel



Gambar 3. Demister

Dari hasil pengecekan kondisi aktual ternyata pada *degasser* tidak terdapat *demister* sebagaimana yang seharusnya, melainkan hanya terpasang suatu *grating* sederhana (Gambar 4).



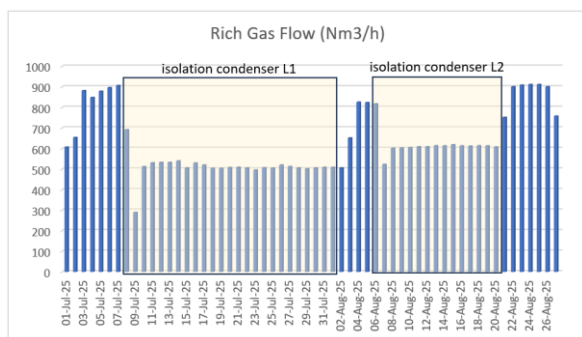
Grating

Gambar 4. Kondisi Bagian Top Vessel Degasser

Dari hasil temuan ini, penyebab utama kebocoran pada *condenser* diakibatkan adanya *acid carryover* (*spinbath*) yang berkontak langsung dengan bagian *condenser* sehingga menyebabkan kebocoran.

Penurunan Flow Rich Gas (RG)

Kebocoran *condenser* menyebabkan sistem *degasser* harus diisolasi sehingga mengurangi jumlah *flow* RG yang dikirim menuju *Wet Sulfuric acid (WSA) Plant*. Isolasi berlangsung selama 25 hari (*line 1*) terjadi penurunan *flow* RG rata-rata dari 810 Nm³/h menjadi 511 Nm³/h, sedangkan pada *line 2* terjadi penurunan rata-rata *flow* RG menjadi 618 Nm³/h dengan proses isolasi selama 15 hari (Gambar 5). Penurunan *flow* RG tersebut dikarenakan tidak ada proses pemisahan gas H₂S dan CS₂ yang terlarut dalam SPB pada saat *degasser condenser* tersebut diisolasi untuk perbaikan.

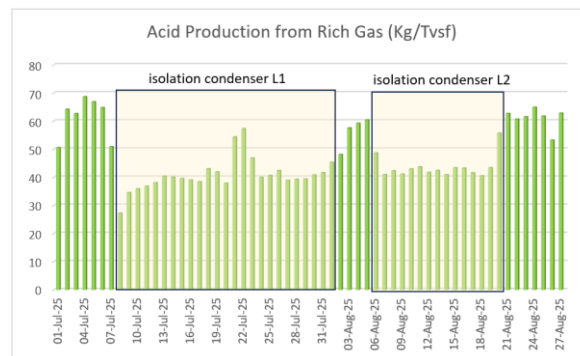


Gambar 5. Grafik Rich Gas Flow

Penurunan Produksi Acid Rich Gas (RG)

Adanya penurunan *flow* RG yang dikirim menuju *Wet Sulfuric acid (WSA) plant* mengakibatkan produksi *acid* yang dihasilkan mengalami penurunan dari rata-rata 61,25 kg/Tvsf sebelum isolasi *degasser* menjadi

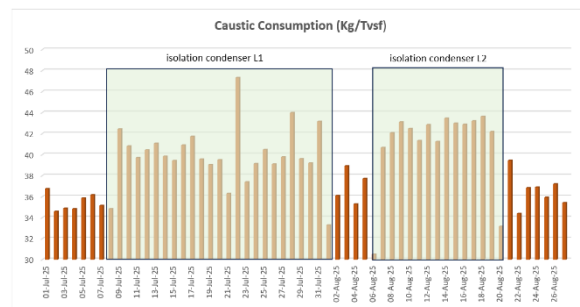
40,81 kg/Tvsf (*line 1*) dan 43,53 kg/Tvsf (*line 2*) pada saat isolasi berlangsung (Gambar 6).



Gambar 6. Grafik Acid Production Rich Gas

Kenaikan Konsumsi Caustic (NaOH)

Pada saat proses isolasi *degasser condenser*, selain berdampak pada penurunan *flow* RG dan produksi *acid*, memberi dampak juga terhadap kenaikan konsumsi *caustic* (NaOH). Kenaikan tersebut dikarenakan gas H₂S dan CS₂ yang dihasilkan dari reaksi pembentukan serat rayon (*viscose*) akan dialirkan secara langsung menuju *scrubber* untuk dikontakan dengan *caustic* (NaOH) agar gas tersebut tidak lepas ke atmosfer/lingkungan. Dari Gambar 7 terlihat kenaikan rata-rata konsumsi *caustic* (NaOH) dari 35,4 kg/Tvsf sebelum isolasi menjadi 39,9 kg/Tvsf (*line 1*) dan 41 kg/Tvsf (*line 2*).



Gambar 7. Grafik Konsumsi Caustic (NaOH)

Rekomendasi

Berdasarkan hasil analisa yang dilakukan, maka direkomendasikan untuk melakukan pemasangan *demister* pada sistem *degasser*. Karena memiliki nilai *Return on Investment (ROI)* yang lebih cepat yaitu 1,6 bulan jika dibandingkan dengan pergantian dengan *spare part* baru yang membutuhkan ROI selama 1,3 tahun.

Kesimpulan

Kebocoran *degasser condenser* diakibatkan adanya *acid carryover* dari larutan SPB yang bersifat asam. Hal tersebut dikarenakan tidak adanya *demister* pada sistem *degasser* yang berfungsi mencegah *acid carryover*. Perlu dilakukan penambahan *demister* pada sistem *degasser* di PT Asia Pacific Rayon untuk mencegah kebocoran terulang kembali.

Kebocoran *condenser* juga mengakibatkan kerugian finansial yakni dari penurunan produksi *acid* sebesar 306,52 USD/hari atau 12.261 USD selama proses isolasi *degasser* berlangsung, dan kenaikan konsumsi *caustic*



(NaOH) sebesar 1.269 USD/hari atau 50.775 USD selama proses isolasi *degasser* berlangsung.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih kepada Ibu Ir. Lusia Permata Sari Hartanti, S.T., M.Eng., CIOMP., IPM., ASEAN Eng selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan bimbingan, saran dan arahan dari penyusunan awal hingga akhir artikel ini.

Referensi

- Deepanjan Majumdar. (2022). *Carbon disulphide and hydrogen sulphide emissions from viscose fibre manufacturing industry: A case study in India*.
- Kudva, A., & Sahu, G. (2020). *AdChE-2020-Mathematical Modelling for Evaluation of Multi-Stage Flash Evaporator for Concentrating Na₂SO₄, H₂SO₄, ZnSO₄ and H₂O Mixture*. <https://ssrn.com/abstract=3707575>
- Lei, Hongyang. (2011). *Experimental and modeling studies of bubble degassing*. Library and Archives Canada = Bibliothèque et Archives Canada.
- Mendes, I. S. F., Prates, A., & Evtuguin, D. V. (2021). Production of rayon fibres from cellulosic pulps: State of the art and current developments. In *Carbohydrate Polymers* (Vol. 273). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118466>
- WILKES, A. G. (2001). The viscose process. In *Regenerated Cellulose Fibres* (pp. 37–61). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781855737587.37>
- Maurer. (2016). Manual Book Degasser System.

Sensitivity Grouping Based on Grammage of Paper at PM₃ Web Inspection System

Rioko¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ riokoisme@gmail.com

Defects on the paper web is a parameter that we are monitoring at and controls especially to improve runnability in winder machine, increase safety of worker and machine since we will reduce the machine speed if found large hole defect on the paper map to minimize breakdown. Web Inspection System is one of the vision technology to detect the defects in paper web. In implementation of WIS, we still found instability with the system, like flooding or freezing in the camera system. While flooding is because too many defects detected and Empty defect is because not detecting at all. One of the reason is because Paper Machine #3 has wide range grammage for the product from 50 to 160 GSM. as our responsibility of the system we focus and keep striving excellence with the Production complaint and asking advice from the vendor who has competencies for the system, we have done manual adjustment for several grades which is to increase or decrease the positive low (Light spot) in inspection threshold for primary. This action is become our idea to make automatically changing the positive low inspection threshold based on grammage. Firstly we make five groups of the sensitivity, sensitivity 0 (270) is for lower GSM and sensitivity 5 (170) is for higher GSM, then we put all grades into respective sensitivity group based on grammage. Every time the grades is produced in PM₃, we will monitor and observe the defect map which is need to move to other group or stay in existing group. It will continues until all grades goes to the correct group of sensitivity. And the result all grades will be running without any instability. This implementation gives significant result to our system even there is a room for continuous improvement.

Keywords: Defect, Safety, Web Inspection System, Responsibility, Striving Excellence, Sensitivity, Thresholds, Grammage, Continuous Improvement

Introduction

A high-speed camera is a device capable of capturing moving images with exposures of less than 1/1000 second, or frame rates in excess of 250 frames per second. (High-Speed Photography, Preface p.5, Mar 1949). It is used for recording fast-moving objects as photographic images onto a storage medium. (<https://en.wikipedia.org>). The web inspection system is a key tool in developing quality controls consistent with these customer expectations (Gary le Roux & Visy Tumut, 2013).

APRIL is one of company with vision to support Sustainable Development in Pulp and Paper Industry so we concern about climate positive, thriving landscape, inclusive progress and sustainable growth. Using latest technology of camera to detect the defect is good option to increase the runnability, safety, knowledge and skill of employee. With the new system, we will not using the halogen lamp substituted with new led technology that less heat and power. Not toxic means good for climate positive. Procemex Paper Web Inspection System provides continuous detection of all paper defects. (Procemex.com). One of the product is transmission WIS. It means camera located opposite the led and paper web is on the middle (Figure 1).

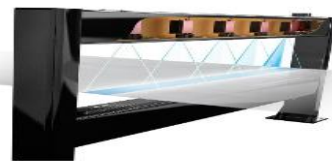


Figure 1. WIS Transmission

A grayscale range is defined as a spectrum of shades between black and white, where 0 represents black and 255 represents white, with every other number in between representing different shades of gray. (www.sciencedirect.com).

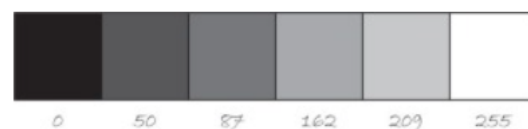


Figure 2. Grayscale 8 bit

In PM₃ Web Inspection System, we use 10 bit data for grayscale then we have range from 0 - 1023. So we need to understand about paper level or luma that is around 480. Value 0 means Dark and 1023 means Very Bright or Hole.

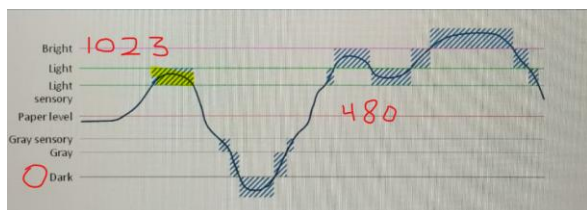


Figure 3. Paper level (Haapalainen, J (2.11.2020). System Settings)

Thresholding is the simplest method of image segmentation. From a grayscale image, thresholding can be used to create binary images. (Parthima Guruprasad, June 2020). Inspection threshold that mainly we used in PM3 WIS are :

- Positive High (BRIGHT) → 520
- Positive Low (LIGHT) → 270
- Negative High (GRAY) → -250
- Negative Low (DARK) → -400

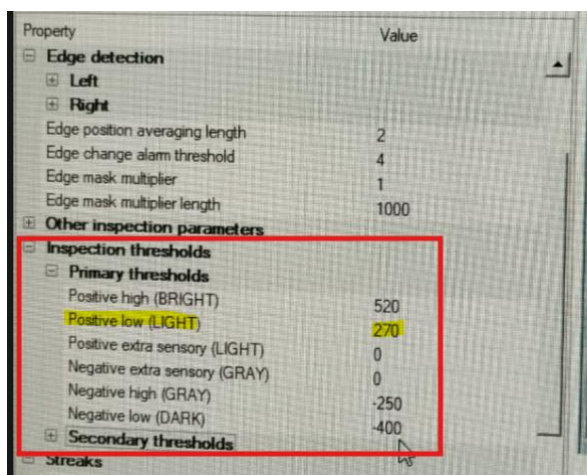


Figure 4. Inspection Threshold

So from this setting, we get segmentation for the defect classification.

Table 1. Threshold Segmentation

No	Defect Classification	Grayscale Value
1	Hole	>1000
2	Light Spot	750>x>1000
3	Paper Level	230>x>750
4	Gray Spot	80>x>230
5	Dark Spot	<80

Paper Machine #3 produces fine paper with maximum speed on 1500mpm, with max web width 6500mm and has wider product from 50 to 160 GSM (Gram Square Metres), our Production PM3 is always follow the instruction of PPIC (Production Planning and Inventory Control) Department. What to produce and How many Ton do we need to produce?. This is based on our customer need.

PM3 Web Inspection System	
Machine Data	
Max machine speed	1500 m/min
Max web width	6500 mm
Paper	52-160 g/m ²
Grade	Fine Paper

Figure 5. Paper Machine 3 Data

(from *Proposal of Scope of Supply or Riau Andalan Pulp & Paper PM3 One Platform Web Inspection System*)

Methodology

At beginning, we created five groups of sensitivities with different threshold of positive low of inspection.

Table 2. Group of Sensitivity

Group	Positive Low	Light Spot
Default Group	250	480 + 250 = 730
Sensitivity 0	270	480 + 270 = 750
Sensitivity 1	245	480 + 245 = 725
Sensitivity 2	220	480 + 220 = 700
Sensitivity 3	195	480 + 195 = 675
Sensitivity 4	180	480 + 180 = 660
Sensitivity 5	170	480 + 170 = 650

With those group, we will have different value for detecting light spot of paper. Sensitivity 0 has value 270. It means WIS will detect light spot defect at level of 480 (paper level) + 270 (positive low) equals to 750. We will put all paper with lower grade in this group. The assumption is with normal range, I will detect so many defects and could lead to flood the defect map.



Figure 6. Flooding in defect map

Reverse action with the higher grade, we will put on sensitivity 5 value 170, so the light spot threshold will be 650. Because if in normal range, it will not detect any defect and leads to blank defect map.

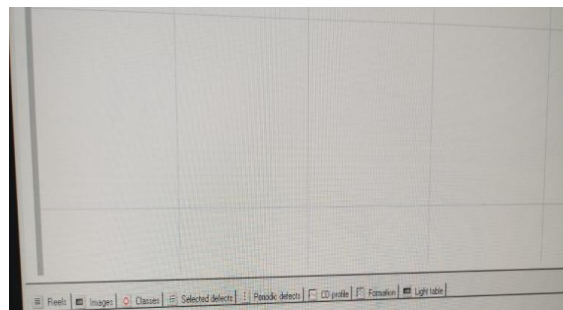


Figure 7. Empty Defect in Defect Map

Then we will list out all grade that is produced in Paper machine #3 and put into sensitivity group based on grammage of product.

Table 3. Grade Code in PM3 with Sensitivity Group

Grade Code	Grouping	GSM
OR040780	SENSITIVITY 0	78
TR020550	SENSITIVITY 0	55
IR04075C	SENSITIVITY 1	75
DR060800	SENSITIVITY 1	80
DR060700	SENSITIVITY 1	70
MR060670	SENSITIVITY 1	67
OR060580	SENSITIVITY 1	58
OR060750	SENSITIVITY 1	75
XR060680	SENSITIVITY 1	68
OR060701	SENSITIVITY 1	70
MR060650	SENSITIVITY 1	65
XR040580	SENSITIVITY 1	58
IR04075C	SENSITIVITY 1	75
OR060700	SENSITIVITY 1	70
OR040680	SENSITIVITY 1	68
OR040580	SENSITIVITY 1	58
OR060600	SENSITIVITY 1	60
OR040640	SENSITIVITY 1	64
OR060900	SENSITIVITY 1	90
DR061000	SENSITIVITY 1	100
OR061200	SENSITIVITY 1	120
OR061000	SENSITIVITY 1	100
XR060800	SENSITIVITY 1	80
OR060550	SENSITIVITY 1	55
XR060600	SENSITIVITY 1	60
XR060580	SENSITIVITY 1	58
OR060650	SENSITIVITY 1	65
XR060560	SENSITIVITY 1	56
XR060700	SENSITIVITY 1	70
DR060900	SENSITIVITY 1	90
DR060800	SENSITIVITY 1	80
DR060700	SENSITIVITY 1	70
OR060700	SENSITIVITY 1	70
OR040680	SENSITIVITY 1	68
OR040580	SENSITIVITY 1	58
OR060600	SENSITIVITY 1	58
OR040640	SENSITIVITY 1	64
OR060900	SENSITIVITY 1	90
DR061000	SENSITIVITY 1	100
OR061200	SENSITIVITY 1	120
OR061000	SENSITIVITY 1	100
XR060800	SENSITIVITY 1	80
OR060550	SENSITIVITY 1	55
XR060600	SENSITIVITY 1	60
XR060580	SENSITIVITY 2	58
ER060900	SENSITIVITY 2	90
OR060800	SENSITIVITY 2	80
MR080800	SENSITIVITY 3	80
XR061000	SENSITIVITY 3	100
DR061200	SENSITIVITY 3	120
XR061200	SENSITIVITY 3	120
ER040900	SENSITIVITY 3	90
OR061100	SENSITIVITY 3	110
DR061450	SENSITIVITY 3	145
ER041000	SENSITIVITY 3	100
IR04090C	SENSITIVITY 3	90
IR04105C	SENSITIVITY 3	105
XR061000	SENSITIVITY 3	100
DR061200	SENSITIVITY 3	120
XR061200	SENSITIVITY 3	120
ER040900	SENSITIVITY 3	90
OR061100	SENSITIVITY 3	110
DR061450	SENSITIVITY 3	145
ER041000	SENSITIVITY 3	100

IR040900	SENSITIVITY 3	90
IR04105C	SENSITIVITY 3	105
OR061600	SENSITIVITY 5	60
WR061500	SENSITIVITY 5	150
OR061300	SENSITIVITY 5	130
OR061150	SENSITIVITY 5	115
DR061600	SENSITIVITY 5	160
DR061500	SENSITIVITY 5	150
DR061400	SENSITIVITY 5	140
OR061400	SENSITIVITY 5	140
OR061500	SENSITIVITY 5	150
OR061600	SENSITIVITY 5	160
WR061500	SENSITIVITY 5	150
OR061300	SENSITIVITY 5	130
OR061150	SENSITIVITY 5	115
DR061600	SENSITIVITY 5	160
DR061500	SENSITIVITY 5	150
DR061400	SENSITIVITY 5	140
OR061400	SENSITIVITY 5	140
OR061500	SENSITIVITY 5	150
OR061600	SENSITIVITY 5	160
WR061500	SENSITIVITY 5	150
OR061300	SENSITIVITY 5	130
OR061150	SENSITIVITY 5	115
DR061600	SENSITIVITY 5	160
DR061500	SENSITIVITY 5	150
DR061400	SENSITIVITY 5	140
OR061400	SENSITIVITY 5	140
OR061500	SENSITIVITY 5	150
OR061600	SENSITIVITY 5	160
WR061500	SENSITIVITY 5	150
OR061300	SENSITIVITY 5	130
OR061150	SENSITIVITY 5	115
DR061600	SENSITIVITY 5	160
KR041000	DEFAULT GROUP	100
IR04070C	DEFAULT GROUP	70
OR04068L	DEFAULT GROUP	68
KR041200	DEFAULT GROUP	120
KR040800	DEFAULT GROUP	80
TR020520	DEFAULT GROUP	52

From above table then we could get the visualization of average of grammage versus sensitivity.

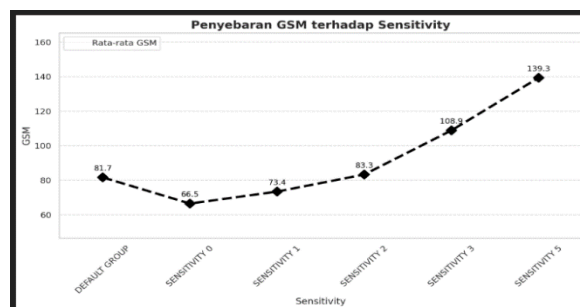


Figure 8. Average Grammage vs Sensitivity

And the spread of grammage with sensitivity.

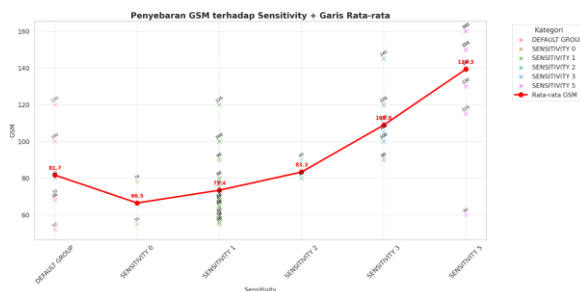


Figure 9. Spread of GSM vs Sensitivity

We will do monitoring and observation with all the grade code is produced in PM3 and if found with the flooding or empty defect then our action is to move the grade code to another group that is up or down. It depends on the condition that need to make more or less sensitive.

Result and Analysis

Before implement the auto grouping sensitivity then we need to do manual adjustment of positive low inspection threshold to get the correct sensitivity level. From Figure 10, we can see before and after adjustment.

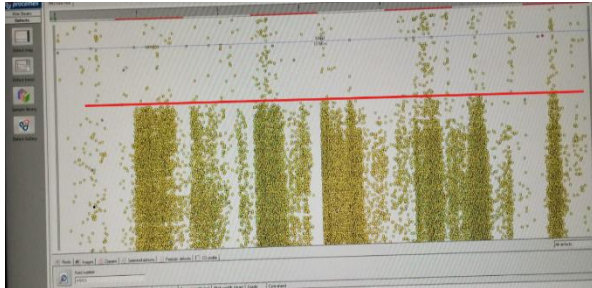


Figure 10. Manual Adjustment of Positive Low Threshold

After implemented the auto grouping of sensitivity then we could see the result for some PM3 grade code.



Figure 11. OR040580 → 58GSM

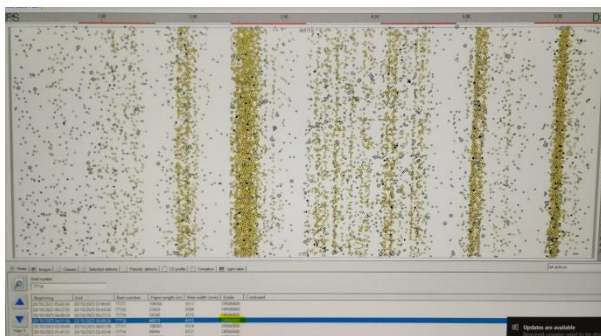


Figure 12. OR060600 → 60 GSM

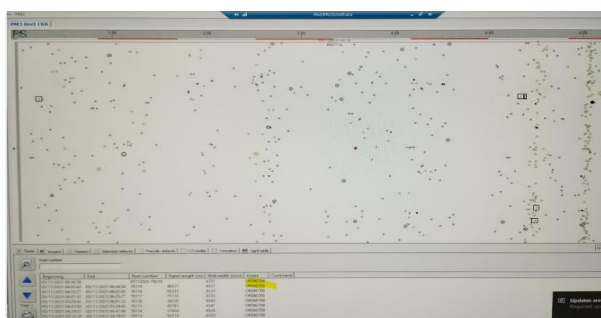


Figure 13. OR060700 → 70 GSM

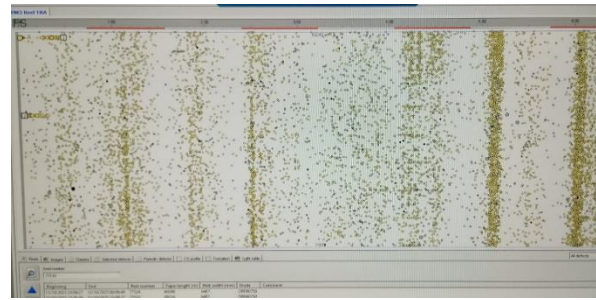


Figure 14. OR060750 → 75 GSM

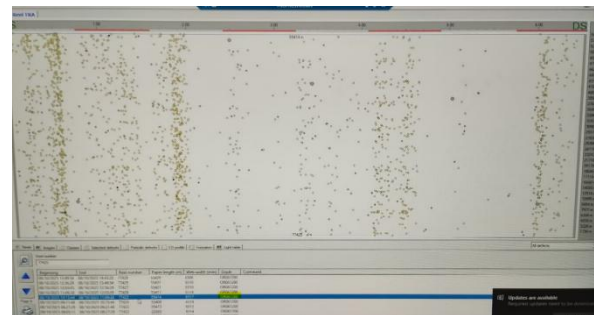


Figure 15. OR060120 → 120 GSM

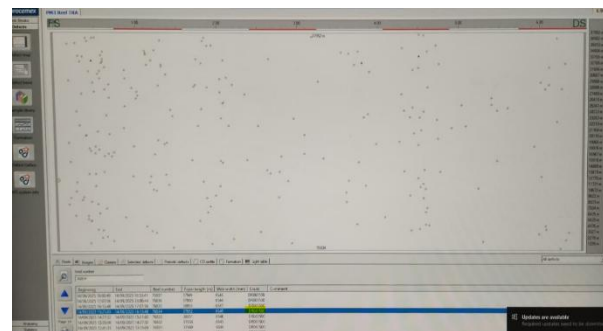


Figure 16. DR061500 → 150 GSM

Even we already make grouping of sensitivity it doesn't mean that we already finish the issue of instability of WIS System. Sometimes cleanliness of camera lens and led light is also important to get the clear image on the defect map. Some little adjustment still needed to cover many grade code in Paper Machine #3. Because some grade has same grammage but it doesn't mean it will has same ingredient of paper recipes.

For sustainable and continuous improvement in our company, so we need study more in detail and there is still room for improvement especially in how to make our WIS keep running well. Because this technology is quite new and will always develop to follow the camera, led light and computer software technology.

Conclusion

After implement our idea of sensitivity grouping with some observation and adjustment of group, we could get the conclusion that :

1. In Paper machine 3 with wider range Product grammage then we need to concern to do some treatment and adjustment to keep our Web Inspection System Running Well.
2. We need to strengthen our basic or fundamental about web inspection system.



3. Summary of sensitivity of paper that higher grammage is become less sensitive and lower grammage is more sensitive. So we need to locate the correct primary positive low threshold to accommodate for all grade code.
4. Paper level is around 480, if positive low is 270 then we could get the light spot is around 750. Also if negative high -250 then we will get spot gray around 230.
5. But for overlapping parameter is still there, because different paper grade code is not only based on grammage, but it has different ash content, different color shade and other ingredients.
6. Continuous Improvement is one values that best for employee or personel to develop our skill and knowledge.
7. High quality paper, best technology and good people will create our sustainable company with development growths in the future.

Words of Thanks

I would like to thank Dr. Lusia Permata Sari Hartanti as my lecturer always gives her best support, patient and motivation in my Engineer Profession Program at Widya Mandala Chatolic University Surabaya. Also thank to Dika Akilla Asmaraman, S.T. as a Procemex Specialist that relentless helping and support for our project in Riau Andalan Kertas and shares his knowledge about Web Inspection System.

Reference

- Haapalainen, J. (2020, November 2). *System settings: User manual*. Procemex Oy Ltd.
- Prathima, G. (2020, June). *Overview of different thresholding methods in image processing*. Vivekananda Institute of Technology, Bangalore, India.
- Procemex Oy Ltd. (2020, April 17). *Proposal of scope of supply for Riau Andalan Pulp & Paper PM3 one platform web inspection system*. Jyväskylä, Finland.
- Procemex. (n.d.). *Web inspection*. Retrieved from <https://www.procemex.com/web-inspection/>
- Procemex. (n.d.). *Visy Tumut boosts PM efficiency and paper quality*. Retrieved from <https://www.procemex.com/success-stories/visy-tumut-boosts-pm-efficiency-and-paper-quality/>
- Society of Motion Picture and Television Engineers. (1949). *High-speed photography*. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Wikipedia contributors. (n.d.). *High-speed camera*. In *Wikipedia*. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/High-speed_camera
- ScienceDirect. (n.d.). *Grayscale range*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/grayscale-range>



Peningkatan *Gross Weight Acceptance* di Pabrik Pulp Dryer 1 dengan Mengimplementasikan Sistem Kendali Adaptif Menggunakan PLC (*Programmable Logic Controller*)

Christ Freben Dommaris Saragih¹ Daniel
Afrizal Manurung¹ Edward Didy Sunarya¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

- ✉ christsaragih86@gmail.com
- ✉ danielmanurung@gmail.com
- ✉ edward.didy.s@gmail.com

Parameter kualitas *bale pulp* merupakan salah satu indikator utama dalam memastikan kestabilan mutu produk dan efisiensi proses produksi di *Pulp Dryer Plant*. Salah satu parameter penting yang dipantau secara rutin adalah *gross weight* atau berat kotor *bale pulp*. Berdasarkan standar mutu yang ditetapkan oleh *Technical Department* PT Riau Andalan Pulp and Paper (PT RAPP), *bale pulp* harus memiliki *gross weight* sebesar 2020 ± 9 kg. Permasalahan yang sering terjadi di lapangan adalah adanya variasi *gross weight* yang melebihi atau kurang dari rentang standar. *Bale pulp* dengan berat dibawah atau diatas standar umumnya disebabkan oleh beberapa hal yaitu kadar air dalam *bale pulp* yang tidak stabil, ketidakakuratan sistem kendali di area *Cutter Layboy Maintable*, atau kesalahan kalibrasi timbangan. Tujuan dari studi kasus ini adalah untuk mengimplementasikan sistem kendali adaptif dan sistem yang mudah untuk operasional dan *troubleshooting* pada area *Cutter Layboy Maintable*. Dengan penerapan tindakan korektif tersebut diharapkan deviasi *gross weight* di luar standar dapat diminimalkan. Perbaikan sistem PLC di PD1 terbukti memberi dampak positif yang signifikan terhadap *level acceptance* kualitas *bale pulp* berupa GW dengan nilai rata-rata 90,1% sebelum perbaikan, dan menjadi 95,3% setelah perbaikan di periode kinerja Maret – Agustus 2015.

Kata kunci: *Gross Weight, Pulp Quality, PLC, Pulp Dryer Plant, Cutter Layboy*

Pendahuluan

Kualitas *bale pulp* merupakan salah satu faktor utama dalam menjaga konsistensi mutu produk di PT Riau Andalan Pulp and Paper (RAPP). Parameter penting yang digunakan untuk menilai kualitas tersebut adalah *gross weight* atau berat total *bale pulp*. Berdasarkan standar mutu pabrik, berat *bale pulp* yang diterima harus berada dalam rentang nilai 2020 ± 9 kilogram, dengan batas bawah 2011 kg dan batas atas 2029 kg. Nilai yang menjadi target dari PT RAPP adalah nilai *acceptance* > 95%. *Bale* yang memiliki berat di luar rentang tersebut dikategorikan *off specification* atau tidak sesuai standar mutu. Pada area *Pulp Dryer Plant 1* (PD1), variasi berat *bale pulp* di luar batas toleransi masih sering terjadi. Kondisi ini menyebabkan penurunan tingkat penerimaan mutu (*quality acceptance level*), ketidakseimbangan tonase terhadap target produksi, serta potensi ketidaksesuaian produk dengan spesifikasi pelanggan.

Salah satu penyebab utama variasi berat tersebut adalah ketidakstabilan proses penimbangan tumpukan lembaran *unit bale pulp* di peralatan *Cutter Layboy Maintable*, yang secara langsung mempengaruhi berat material sebelum proses pengepresan dan pembungkusan di area *Balingline*. Mesin PD1 dibangun dari tahun 1993-1994 dengan sistem kendali yang masih konvensional, dan pada bagian modul penimbang masih menggunakan modul lama yaitu Philips PR1614 *batching controller*. Seiring berjalan waktu pada saat studi kasus dilakukan pada tahun 2014-2015, modul Philips tersebut sudah masuk kategori *obsolete phase*,

artinya unit dan suku cadang sudah berada dalam masa tidak diproduksi lagi, bahkan sudah sangat minim jumlahnya di pasar. Selain itu modul Philips memiliki beberapa keterbatasan sehingga tidak mudah untuk teknisi dan operator melakukan monitoring kinerja dan melakukan perbaikan parameter penimbangan di *Cutter Layboy Maintable*.

Sebagai langkah perbaikan untuk menjamin terjadinya keberlanjutan bisnis (*sustainable business*) di pabrik *Pulp Dryer*, dilakukan studi kasus dengan fokus pada mempelajari dan mengimplementasikan inovasi dalam hal kemampuan sistem kendali di *Cutter Layboy Maintable* melalui penerapan logika kendali adaptif berbasis aplikasi PLC (*Programmable Logic Controller*). Sistem kendali ini dirancang untuk menyesuaikan parameter operasi secara otomatis terhadap variasi kecepatan dan gangguan kondisi lainnya proses di lapangan, sehingga penimbangan *bale pulp* menjadi lebih presisi, mudah dimonitor, *flexible* dan menghasilkan *bale pulp* dengan berat yang stabil sesuai standar mutu perusahaan dan kebutuhan pelanggan.

A. Overview Proses *Pulp Dryer*

Proses *pulp dryer* merupakan tahap akhir dalam produksi *pulp* lembaran sebelum produk dikirim ke pelanggan. Tujuan utama proses ini adalah mengeringkan *pulp* dari bentuk bubur menjadi lembaran kering dengan kadar air sekitar 10%, kemudian dipotong dan dipadatkan menjadi *bale pulp* dengan berat standar. Di *Pulp Dryer Plant* PT Riau Andalan Pulp and Paper (PT RAPP), proses ini terdiri dari beberapa tahapan utama yaitu *Wet End Section*, *Dryer Section*, *Cutter Layboy Maintable* dan *Balingline Section*.

B. Parameter Gross Weight (GW)

Kualitas *bale pulp* diukur melalui beberapa parameter, antara lain kadar air (*moisture*), berat jenis lembaran pulp (*basis weight*), kerapian pembungkusan dan *gross weight*. Parameter *gross weight* menjadi salah satu indikator utama dalam memastikan keseragaman produk dan kepuasan pelanggan. Di PD1 PT RAPP, standar berat bale pulp ditetapkan sebesar 2020 ± 9 kilogram, dengan batas bawah 2011 kg dan batas atas 2029 kg. Nilai yang menjadi target dari PT RAPP adalah nilai *acceptance* > 95%. Bale pulp yang beratnya di luar rentang tersebut dikategorikan sebagai *off specification*.

Beberapa parameter dan nilai penting dalam kendali penimbangan GW di *Cutter Layboy Maintable* adalah sebagai berikut:

a. Additional Factor (AF)

Nilai AF di PD1 merupakan nilai total berat pembungkus dan kawat pengikat 8 *bale pulp* yang disatukan menjadi 1 tumpukan unit *bale pulp*. Nilainya adalah 32 kg.

b. Setpoint (SP)

Nilai ini merupakan nilai total berat GW dikurang berat AF (*Additional Factor*), nilai SP di PD1 adalah $2020 - 32 = 1988$ kg.

c. Last Weight (LW)

Last weight merupakan nilai penimbangan terakhir yang tercatat. Nilai bisa bervariasi tergantung banyak faktor seperti kestabilan *maintable*, getaran dari peralatan dan gesekan antara peralatan yang mempengaruhi nilai timbangan.

d. Set (SET)

Merupakan nilai parameter yang memerintahkan *fork* untuk turun, mengambil unit *bale pulp* yang berikutnya. Nilai *set* didapatkan dari SP dikurangi rata-rata nilai *overshoot* (AVG OVS).

e. Overshoot (OVS)

Merupakan nilai galat antara SET dengan LW, misal SET: 1960 kg, LW: 1990 kg, OVS = $1990 - 1960 = 30$ kg.

f. Total Drop

Merupakan jumlah unit *bale pulp* dalam periode waktu tertentu. 1 unit *bale pulp* memiliki berat ideal 2020 kg.

g. Accept Drop

Merupakan jumlah unit *bale pulp* yang masuk dalam rentang bawah dan atas yaitu 2011-2029 kg.

h. Acceptance Level (%)

Merupakan nilai persentase berat yang diterima sesuai batas atas batas bawah. $\% \text{ Acceptance} = (\text{Accept Drop} / \text{Total Drop}) \times 100\%$.

Metode

Dalam studi ini metoda yang dilakukan adalah studi sistem kendali semula (*existing*) pada area *Cutter Layboy Maintable*, pengumpulan data *gross weight* sistem semula, analisa sistem penimbangan semula, perancangan sistem kendali adaptif yang baru dan pengumpulan data *gross weight* baru setelah perbaikan sistem diimplementasikan.

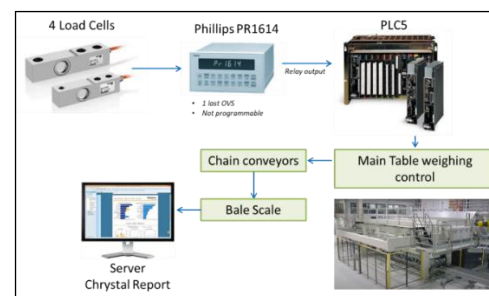
A. Sistem Kendali Existing Cutter Layboy Maintable

Gambar 1 menunjukkan rancangan original dari sistem penimbangan GW PD1. 4 buah *load cells* dihubungkan dan diparameterisasi di modul Philips PR1614. Keluaran dari Philips PR1614 berupa *digital relay output* perintah *Fork* turun mengambil unit *bale pulp* yang baru. Selanjutnya PLC memberi perintah *Main Table* turun ke posisi timbang selama 5 detik, ambil nilai *Last Weight*. Selanjutnya *bale pulp* ditransfer ke area *Baling Line* menggunakan *conveyor system*. Setelah melewati 6 *equipment conveyor*, unit *bale pulp* akan ditimbang di *Bale Scale* dan data disimpan di *server Chrystal Report*. Data ini menjadi data yang dipakai untuk penjualan ke pelanggan.

Diagram alir (*flow chart*) sistem penimbangan semula di area *Cutter Layboy Maintable* PD1 ditunjukkan pada Gambar 2. Parameter *Set Point*, *Preset*, *Calming Time*, *High Safety Limit* dan lainnya dilakukan pada modul Philips PR1614. Selanjutnya penimbangan dimulai pada *Main Table*, sampai mencapai nilai *Set* yang dihitung internal dalam module Philips PR1614, lalu diaktifkan *relay output* untuk perintahkan *Fork* ambil unit bale pulp yang baru.

B. Data Gross Weight Sistem Kendali Semula

Dalam Tabel 1 berikut menunjukkan performa nilai capaian GW PD1 dalam 6 bulan terakhir, dengan target > 95%. Pada tabel menunjukkan data dalam rentang waktu 6 bulan terakhir tidak ada dalam 1 bulan penuh mencapai *target acceptance* >95%. Hasil sesuai target hanya didapatkan dalam beberapa hari. Bisa dilihat dari nilai MAX (%) berkisar 95,7% - 98,2%. Dengan artian target bisa dicapai namun belum dapat dicapai dengan stabil dan konsisten setiap harinya.



Gambar 1. Sistem Kendali Penimbangan Existing

Tabel 1. Baseline Data GW PD1 Periode
September 2014 – Februari 2015

Bulan	Gross Weight (%)	Moisture (%)
September 2014	81,6	89,7
Oktober 2014	90,2	93,4
November 2014	93,0	93,9
Desember 2014	90,6	90,2
Januari 2015	91,8	90,3
Februari 2015	88,2	89,1

C. Analisa Sistem Kendali Semula

Sistem semula kendali penimbangan GW PD1 dijelaskan pada Gambar 2 berupa diagram alir (*flow chart*) sistem penimbangan semula di area *Cutter Layboy Maintable* PD1. Parameter *Set Point*, *Preset*, *Calming Time*, *High Safety Limit* dan lainnya dilakukan

pada modul Philips PR1614. Selanjutnya penimbangan dimulai pada Main Table, sampai mencapai nilai *Set* yang dihitung internal dalam module Philips PR1614, lalu diaktifkan *relay output* untuk perintahkan *Fork* ambil unit bale pulp yang baru. Beberapa limitasinya adalah modul Philips PR1614 melakukan kalkulasi internal tanpa bisa diakses dan dimonitor *logic* didalamnya (*black box*), modul Philips PR1614 hanya mengambil 1 nilai galat terakhir dan tidak melakukan perhitungan rata-rata.

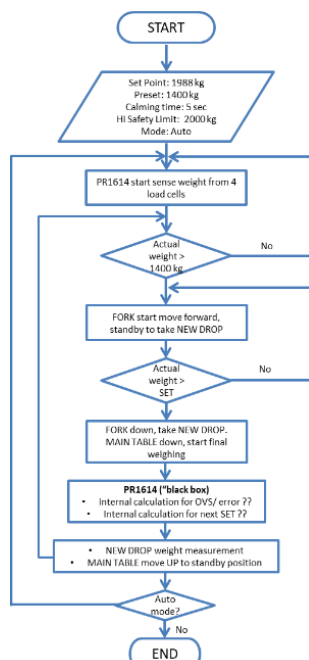
Hal ini menyebabkan sistem kendali menjadi tidak stabil dan cenderung *hunting*, dikarenakan nilai galat yang terus berubah seiring berjalan waktu dan tidak mengakomodir gangguan yang akan terus berubah variabelnya. Tidak dilengkapi parameter untuk memperlambat laju turunnya *maintable*, sehingga pembacaan timbangan menjadi tidak stabil (*hunting*). Tidak tersedia peralatan tatap muka (HMI) untuk teknisi dan operator melakukan perbaikan dan pemantauan kinerja sistem penimbangan. Beberapa peluang di atas akan diimplementasikan pada perancangan sistem kendali adaptif yang baru untuk sistem penimbangan di *Cutter Layboy Maintable*.

Hasil Kerja

Dalam studi ini pun dilakukan perancangan sistem kendali adaptif yang baru dan pengumpulan data gross weight baru setelah perbaikan sistem diimplementasikan.

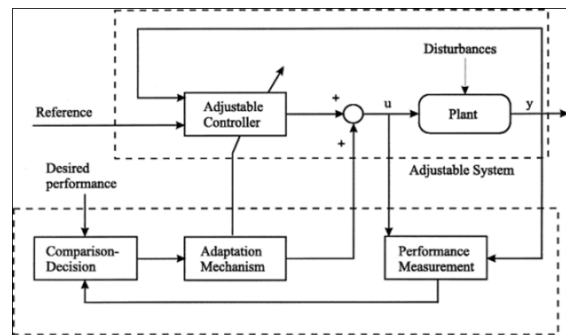
A. Perancangan Sistem Kendali Adaptif

Sistem kendali adaptif adalah metode pengendalian yang mampu menyesuaikan parameter operasinya terhadap perubahan kondisi proses tanpa memerlukan intervensi manual. Sistem ini bekerja dengan prinsip *self-tuning* dan *feedback control*, di mana parameter pengendalian diperbarui secara dinamis berdasarkan hasil keluaran sistem dan dipengaruhi gangguan (sciencedirect.com).



Gambar 2. Diagram Alir Sistem Kendali Penimbangan Semula

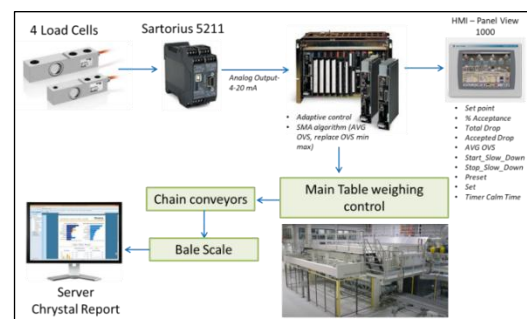
Dalam konteks *Cutter Layboy Maintable* PD1, sistem kendali adaptif diterapkan mekanisme adaptasi berupa penghitungan nilai galat rata-rata (*average overshoot*) dari 8 nilai lampau (OVS_n-1, OVS_n-2, OVS_n-3, OVS_n-4, OVS_n-5, OVS_n-6, OVS_n-7, OVS_n-8). Nilai OVS yang berubah-ubah dipengaruhi beberapa faktor eksternal berupa getaran di *maintable*, gesekan di *Stopper-Evener* atau nilai BW yang kendalinya dilakukan di area *Wet End*. Dengan sistem ini, pengendalian penimbangan menjadi lebih akurat, *real-time*, dan *flexible* saat mendapatkan gangguan.



Gambar 3. Skema Adaptive Control
(Handbook of Cognitive Science, 2008)

Gambar 4 menunjukkan rancangan baru dari sistem penimbangan GW PD1. 4 buah *load cells* dihubungkan dan diparameterisasi di modul Sartorius 5211. Keluaran dari Sartorius 5211 berupa *analog output* 4-20mA yang memberi bacaan berat unit bale pulp dengan rentang nilai 0 – 2500 kg. Selanjutnya PLC melakukan beberapa perhitungan nilai set yang baru dengan mempertimbangkan nilai beberapa *error*, sehingga sistem lebih adaptif dan tahan akan gangguan.

Selanjutnya PLC memberi perintah *Main Table* turun ke posisi timbang selama 5 detik, ambil nilai *Last Weight* dan *Last Overshoot*. Selanjutnya *bale pulp* ditransfer ke area *Baling Line* menggunakan *conveyor system*. Setelah melewati 6 *equipment conveyor*, unit *bale pulp* akan ditimbang di *Bale Scale* dan data disimpan di server *Chrystal Report*. Data ini menjadi data yang dipakai untuk penjualan ke pelanggan sama halnya dengan desain semula.



Gambar 4. Sistem Kendali Penimbangan yang baru
(Terintegrasi)

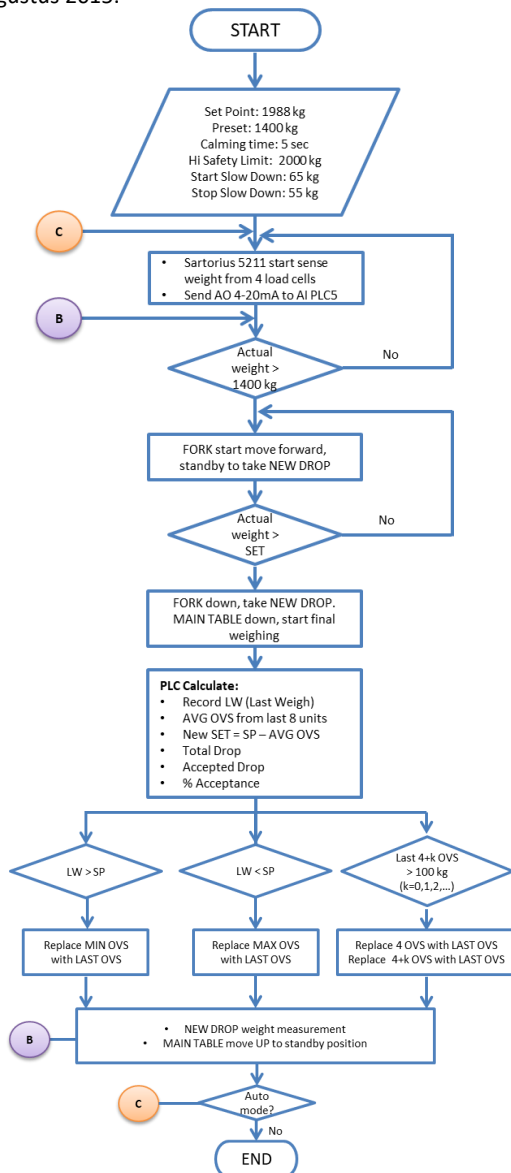
Diagram alir dalam Gambar 5 menunjukkan rancangan baru sistem kendali adaptif GW PD1. Parameter yang dimasukkan ke PLC melalui HMI berupa *Set Point*, *Preset*, *Calming Time*, *High Safety Limit*, *Start Slow Down* dan *Stop Slow Down*. Pengkabelan 4 buah *load cell* dihubungkan ke modul Sartorius 5211 dan

modul ini memberikan sinyal AO 4-20 mA dan diterima di AI modul PLC untuk membaca nilai berat 0 – 2500 kg. Perhitungan baru dalam PLC yang dapat diakses oleh *Engineer* atau Teknisi Automation adalah catatan *Last Weight*, perhitungan rata-rata galat dari 8 nilai OVS, perhitungan *New Set* yang adaptif, nilai *Total Drop*, *Accepted Drop* dan % *Acceptance* yang akan dimunculkan di HMI.

Perhitungan juga dilakukan dengan menbandingkan nilai *Last Weight* dengan *Set Point*. Nilai Set yang baru adalah Set Point dikurangi AVG OVS, dimana AVG OVS sudah disesuaikan oleh PLC untuk penggantian nilai *min-max*, dan melakukan *force* bila ada galat > 100 kg berturut-turut 4 kali atau lebih.

B. Data Gross Weight Sistem Kendali Adaptif

Setelah selesai dilakukan perubahan sistem PLC yang adaptif dan terintegrasi dengan *weighing transmitter* dan HMI, dalam Tabel 2 berikut ditunjukkan performa 6 bulan setelah dilakukan perbaikan sistem pada periode Maret - Agustus 2015.



Gambar 5. Diagram Alir Sistem Kendali Penimbangan Adaptif

Tabel 2 Hasil Data GW PD1 Setelah Perbaikan Sistem

Bulan	Gross Weight (%)	Moisture (%)
Maret 2015	88,2	95,1
April 2015	95,0	90,7
Mei 2015	96,5	89,7
Juni 2015	97,5	92,2
Juli 2015	96,8	91,0
Agustus 2015	98,0	81,5

Kesimpulan

Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai penimbangan di *Cutter Layboy Maintable* PD1 adalah tidak ada akses teknisi melihat *logic internal* modul Philips PR1614, adanya gangguan berupa vibrasi dan gesekan yang tidak dapat dikompensasi oleh *weighing module* Philips PR1614 dan juga faktor minimnya peralatan tatap muka antara mesin dan operator.

Perbaikan dan inovasi industry pada sistem PLC di PD1 berupa perancangan dan implementasi sistem kendali adaptif dan terintegrasi dengan HMI, terbukti memberi dampak positif yang signifikan terhadap *level acceptance* kualitas *bale pulp* berupa GW dengan nilai rata-rata 90,1% sebelum perbaikan, dan menjadi 95,3% setelah perbaikan di periode kinerja Maret – Agustus 2015.

Implementasi PLC-HMI mempermudah teknisi melakukan parameterisasi dan memonitor nilai-nilai penting dalam proses penimbangan antara lain *Set point*, *Acceptance level* (%), *Last Weight*, 8 buah *overshoot* terakhir, *Start Slow Down* dan *Stop Slow Down* untuk menjaga kestabilan proses penimbangan. Dibuatnya SOP dan sosialisasi cara penggunaan HMI dan konsep kendali yang baru terhadap operator, supervisor dan teknisi terbukti cukup membantu kinerja GW PD1 di setiap shift (pagi, sore dan malam). Hal ini meningkatkan juga komunikasi yang selaras antara *Production* dan *Maintenance*.

Ucapan Terimakasih

Dalam penyusunan laporan ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi:

- Bapak Hendra Tri Purnawan, Bapak Jaco Olivier, dan Bapak Wilim selaku Manajemen PT Riau Andalan Pulp and Paper atas dukungan terkait pengembangan sumber daya manusia (*People Development*), dan arahan dalam pelaksanaan Program Profesi Insinyur UKWMS.
- Dr. Ir. Lusya Permata Sari Hartanti, S.T., M.Eng., CIOMP., IPM., ASEAN Eng. sebagai dosen pembimbing penulis yang memberikan bantuan dan bimbingan sehingga laporan studi kasus ini bisa diselesaikan tepat waktu.

Referensi

- Allen-Bradley. (1994). *1785 PLC-5 family programmable controllers*. Allen-Bradley Company.
- Hertanto, B., Purwanto, D., & Arifin, A. (2014). *Kontrol proses penimbangan pulp berbasis estimasi Kalman* (Tesis). Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.



- Kitano, S., Sato, T., Araki, N., & Yamamoto, T. (2010). Improvement in a performance-adaptive control system for a weigh feeder. In *Proceedings of the SICE Annual Conference 2010*.
- Rockwell Automation. *Classic 1785 PLC-5 programmable controllers user manual*. Retrieved November 2025, from https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1785-um001_-en-p.pdf
- ScienceDirect. *Adaptive control system*. Retrieved October 2025, from <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/adaptive-control-systems>
- Valmet. *Pulp dryers: Rebuilding for added value*. Retrieved October 2025, from <https://www.valmet.com/insights/articles/pulp/pulp-dryers>
- Valmet. *Technologies, automation and services for pulp production*. Retrieved October 2025, from <https://www.valmet.com/pulp>
- APDS. *Life cycle assessment*. Retrieved October 2025, from <https://www.apds.co.uk/services/drive-services/life-cycle-assessment/>



Peran Arsitek dalam Pengelolaan Desain dan Pengawasan Pembangunan Masterplan Rumah Sakit Islam Jakarta Pondok Kopi Berbasis Keberlanjutan

Muhammad Nur Sholehuddin¹, Ir. Rasional Sitepu, M.Eng., IPU., ASEAN Eng.²

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ nursholeharchitects@gmail.com

Pembangunan fasilitas pelayanan kesehatan memerlukan peran insinyur profesional yang mampu mengintegrasikan aspek fungsional, teknis, dan nilai kemanusiaan. Artikel ini membahas praktik keinsinyuran di Rumah Sakit Islam Jakarta Pondok Kopi (RSIJPK), di mana penulis berperan sebagai arsitek, kurator desain, supervisor pengawasan, dan kepala teknis. Studi kasus ini menyoroti proses perencanaan dan pelaksanaan pembangunan masterplan RSIJPK yang mencakup gedung Bunker Radioterapi, Oncology Center, Gedung Medik Sentral, serta Gedung Parkir dan Rawat Inap IVF. Pendekatan dilakukan melalui kolaborasi multidisiplin dan penerapan prinsip keberlanjutan (*Sustainable Development Goals*). Hasilnya menunjukkan pentingnya profesionalisme, komunikasi tim, dan penerapan prinsip K3L untuk mencapai efisiensi, keselamatan, dan manfaat jangka panjang bagi umat manusia.

Kata kunci: Profesionalisme, Rumah Sakit, Manajemen Proyek, Keberlanjutan, K3L

Pendahuluan

Rumah sakit sebagai institusi pelayanan publik menuntut sistem perencanaan dan pembangunan yang tidak hanya memenuhi standar teknis, tetapi juga menjunjung nilai kemanusiaan, etika, dan keberlanjutan. Pembangunan masterplan RSI Jakarta Pondok Kopi merupakan upaya strategis untuk menjawab kebutuhan layanan kesehatan masyarakat urban yang terus berkembang. Sebagai arsitek yang mendapat amanah menjadi kurator desain, supervisor pengawasan, dan kepala teknis, penulis dihadapkan pada tantangan profesional, yaitu mengoordinasikan berbagai disiplin teknik, menjaga mutu hasil konstruksi, serta memastikan keberlanjutan desain terhadap lingkungan dan kebutuhan pasien.

Metode

Metode yang digunakan meliputi: (1) analisis kebutuhan fungsional, (2) kurasi desain arsitektural berkelanjutan, (3) supervisi pengawasan konstruksi, (4) manajemen risiko dan K3L, serta (5) kolaborasi profesional lintas disiplin. Pendekatan ini sejalan dengan nilai profesionalisme, tanggung jawab sosial, dan etika keinsinyuran sebagaimana diatur dalam UU No. 11 Tahun 2014 tentang Keinsinyuran.

Hasil Kerja

1. Implementasi Keinsinyuran dalam Pengembangan Proyek Rumah Sakit Islam Jakarta Pondok Kopi

Penerapan praktik keinsinyuran pada proyek Pembangunan Gedung Medik Sentral, Gedung Radioterapi dan Oncology Center, serta Gedung Parkir dan Rawat Inap IVF di Rumah Sakit Islam Jakarta Pondok Kopi (RSIJPK) merupakan bentuk nyata integrasi ilmu arsitektur, manajemen konstruksi, dan rekayasa teknik bangunan berorientasi keberlanjutan.

Proyek ini berlandaskan *dokumen masterplan RSIJPK* (RSIJPK, 2024) dan Permenkes No. 24 Tahun 2016 tentang Persyaratan Teknis Bangunan Rumah Sakit, dengan acuan *WHO Health Facility Design Guidelines* (2020).

Sebagai arsitek sekaligus insinyur praktik, penulis memegang peran ganda sebagai kurator desain dan kepala teknis lapangan, mengoordinasikan berbagai disiplin teknik bersama PT Global Rancang Selaras (konsultan perencanaan) dan PT Maksi Solusi Enjinering (manajemen konstruksi). Kolaborasi ini difokuskan untuk menjaga keselarasan antara kebutuhan fungsional klinis, keamanan pasien, dan efisiensi sumber daya konstruksi.

Masukan dari *Tim Pre-Construction Risk Assessment (PCRA)* RSIJPK turut menjadi fondasi penting dalam proses awal pembangunan, terutama pada penilaian risiko lingkungan, keselamatan pekerja, serta kelayakan struktur eksisting di sekitar area pembangunan. Hasil asesmen tersebut membantu tim desain dan pelaksana dalam menentukan strategi mitigasi risiko sejak tahap perencanaan.

2. Keterkaitan Hasil Kerja dengan Keilmuan dan Urgensi Proyek

Kegiatan ini tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga mencerminkan penerapan keilmuan arsitektur rumah sakit sebagai bagian dari profesi insinyur yang beretika dan bertanggung jawab sosial. Menurut Undang-Undang No. 11 Tahun 2014 tentang Keinsinyuran, setiap praktik keinsinyuran harus memperhatikan keselamatan publik, keberlanjutan lingkungan, dan efisiensi sumber daya.

Urgensi proyek ini sangat tinggi mengingat RSI Jakarta Pondok Kopi merupakan rumah sakit Islam yang berkembang menuju *tertiary care hospital* dengan pelayanan onkologi terpadu. Ruang lingkup pekerjaan yang dikelola meliputi perancangan dan pembangunan fasilitas medis berteknologi tinggi seperti bunker

radioterapi (dikerjakan oleh PT. Gekha Karunia Abadi), serta integrasi sistem tata udara dan kontrol infeksi (oleh PT. Green Solutions Indonesia).

Secara klinis, pengembangan ini juga didukung oleh analisis kebutuhan ruang dan pola alur pasien hasil diskusi klinis oleh dr. Andri Yunia Kusumawati, MKM dan Tim *Pre-Construction Risk Assessment* (PCRA) RSIJPK, yang memberikan dasar empiris dalam penyusunan *layout* medik dan sirkulasi pasien. Kolaborasi lintas profesi ini memperkuat konsep *evidence-based design* dalam arsitektur rumah sakit.

Dalam praktiknya, penerapan prinsip keinsinyuran di lingkungan rumah sakit Islam menuntut keseimbangan antara ketepatan teknis dan kepekaan sosial. Pembangunan fasilitas kesehatan tidak semata persoalan struktur dan fungsi ruang, tetapi juga menyangkut pengalaman pengguna, baik pasien, tenaga medis, maupun masyarakat sekitar. Oleh karena itu, setiap tahapan perencanaan di RSI Jakarta Pondok Kopi diawali dengan penelaahan mendalam terhadap *user journey* pasien, efisiensi pergerakan logistik medis, serta integrasi antara sistem utilitas dan kenyamanan ruang. Pendekatan berbasis pengguna ini menjadi dasar pengambilan keputusan desain yang berdampak langsung pada efektivitas pelayanan kesehatan.

Dalam tataran manajemen proyek, prinsip keberlanjutan juga diterapkan melalui optimalisasi sumber daya dan kontrol mutu yang berkelanjutan. Pemanfaatan material lokal, pengelolaan limbah konstruksi, serta penerapan sistem *Building Management System* (BMS) pada fasilitas baru merupakan bagian dari strategi efisiensi energi dan pengurangan dampak lingkungan. Langkah ini sejalan dengan agenda *Sustainable Development Goals* (SDGs) poin 3, 9, dan 11, yang menekankan pentingnya pembangunan infrastruktur kesehatan yang tangguh, inovatif, dan berkeadilan.

Selain aspek teknis, proses pembangunan juga menjadi wadah pembelajaran kolektif antarprofesi. Interaksi rutin antara arsitek, insinyur sipil, elektromedik, serta tim manajemen rumah sakit memperkuat budaya *knowledge sharing* dan meningkatkan kesadaran lintas disiplin terhadap keselamatan serta keberlanjutan. Hal ini mencerminkan makna sejati dari praktik keinsinyuran, yaitu menghadirkan solusi yang tidak hanya berfungsi dengan baik, tetapi juga memberi nilai manfaat bagi kehidupan dan kemanusiaan. Manfaat langsung hasil kerja ini antara lain:

1. Meningkatkan kualitas tata ruang dan efisiensi sirkulasi pasien serta tenaga medis.
2. Menjamin kesesuaian antara kebutuhan fungsional klinis dan aspek teknis bangunan.
3. Menjadi model pengembangan rumah sakit beridentitas Islam yang modern dan berkelanjutan.

Keberhasilan ini tidak lepas dari keterlibatan aktif Tim Sarana dan Prasarana RSIJPK yang melakukan evaluasi dan kontrol mutu lapangan secara periodik. Proyek ini membuktikan bahwa profesionalisme insinyur bukan hanya menguasai aspek teknis, tetapi juga tanggung jawab sosial dan etika publik.

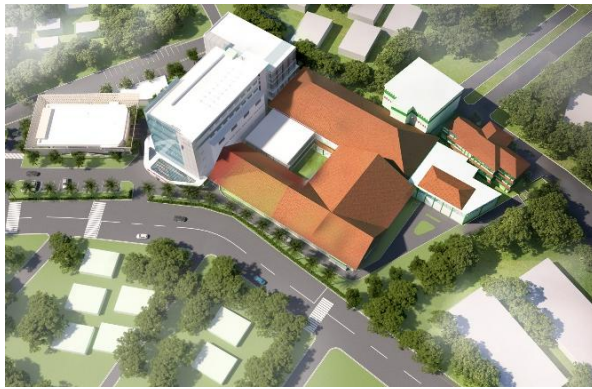
3. Dokumentasi Teknis dan Kolaborasi Profesional

Hasil kerja proyek RSIJPK terdokumentasi dalam laporan teknis dan laporan manajemen konstruksi yang disusun secara sistematis. PT Mentari Prima Niaga sebagai kontraktor utama memastikan pelaksanaan pekerjaan sesuai dengan desain dan standar mutu yang telah disetujui, sementara PT Maksi Solusi Enjinering melaksanakan fungsi audit teknis dan pengawasan progres proyek. Kontribusi signifikan juga datang dari Tim *Pre-Construction Risk Assessment* (PCRA) RSIJPK, yang memberikan rekomendasi tentang zona aman, rencana evakuasi darurat, serta pengendalian dampak getaran dan kebisingan terhadap area pelayanan aktif rumah sakit.

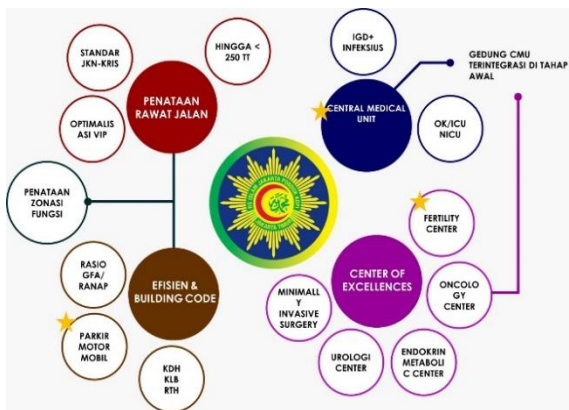
Selain itu, proses koordinasi lintas disiplin menumbuhkan budaya kerja kolaboratif di lingkungan rumah sakit. Melalui rapat rutin antara tim perencana, pelaksana, dan pengawas, setiap kendala teknis di lapangan dapat diantisipasi lebih awal. Digitalisasi dokumen pengawasan dan laporan harian proyek juga diterapkan untuk meningkatkan transparansi, akuntabilitas, serta kemudahan evaluasi progres. Upaya ini memperkuat penerapan prinsip *Continuous Quality Improvement* (CQI) yang menjadi fondasi mutu dalam pelayanan fasilitas kesehatan modern.

Tabel 1. Merangkum Struktur Kolaborasi Profesional Lintas Disiplin yang Mendukung Keberhasilan Proyek

Komponen	Pelaksana Teknis	Fungsi Utama
Desain Arsitektur & Kurasi	PT Global Rancang Selaras	Perencanaan dan validasi desain
Pelaksanaan Konstruksi	PT Mentari Prima Niaga	Konstruksi fisik bangunan
Manajemen Konstruksi	PT Maksi Solusi Enjinering	Kontrol mutu, waktu, dan biaya
Sistem Tata Udara	PT Green Solutions Indonesia	Pengendalian suhu, kelembapan, dan infeksi udara
Struktur Bunker Radioterapi	PT Gekha Karunia Abadi	Keamanan radiasi dan ketahanan struktur
Validasi Ruang Medik	dr. Andri Yunia Kusumawati, MKM	Analisis fungsional ruang klinis
Pengawasan Internal	Tim Sarana & Prasarana RSIJPK	Monitoring dan pelaporan onsite
Analisis Risiko Awal	Tim PCRA RSIJPK	Evaluasi dan mitigasi risiko pra-konstruksi



Gambar 1. Menunjukkan Layout Zonasi Risiko Konstruksi dan Pengendalian Akses Pekerja Terhadap Area Pelayanan Aktif, Hasil Kolaborasi antara Tim Perencana dan PCRA RSJIPK



Gambar 2. Dokumen Arsitektur TABG RS Islam Jakarta Pondok Kopi

Kesimpulan

Penerapan prinsip keinsinyuran dalam pembangunan masterplan RSJIPK menunjukkan bahwa kolaborasi lintas disiplin, pengawasan profesional, dan perhatian terhadap keberlanjutan menghasilkan proyek yang efektif serta bermanfaat luas. Saran bagi insinyur di bidang kesehatan adalah mengintegrasikan prinsip *green hospital design*, menjaga sinergi antarprofesi, dan mengembangkan sistem pengawasan digital.

Penerapan praktik keinsinyuran di lingkungan rumah sakit Islam juga mencerminkan sinergi antara nilai keilmuan dan spiritualitas. Arsitek-insinyur berperan tidak hanya sebagai perancang dan pengawas teknis, tetapi juga sebagai penjaga amanah keberlanjutan lingkungan dan kemaslahatan umat. Dalam konteks RSI Jakarta Pondok Kopi, prinsip keberlanjutan diwujudkan melalui desain hemat energi, pengendalian limbah konstruksi, serta optimalisasi pencahayaan dan ventilasi alami yang sejalan dengan nilai rahmatan lil 'alamin. Dengan demikian, profesi arsitek-insinyur berkontribusi dalam membangun rumah sakit yang tidak hanya efisien secara teknis, tetapi juga berdaya guna sosial, ekologis, dan spiritual bagi masyarakat luas.

Ucapan Terimakasih

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga kegiatan Praktik Keinsinyuran serta penyusunan makalah ini dapat terselesaikan dengan baik. Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya melalui Program Studi Profesi Insinyur, serta kepada Rumah Sakit Islam Jakarta Pondok Kopi yang telah memberikan dukungan dan kesempatan dalam pelaksanaan proyek Pembangunan Gedung Medik Sentral, Gedung Radioterapi dan Oncology Center, serta Gedung Parkir dan Rawat Inap IVF.

Penghargaan yang tulus penulis sampaikan kepada pembimbing akademik Ir. Rasional Sitepu, M.Eng., IPU., ASEAN Eng., pembimbing lapangan Didi Bastari, AMTE, Tim Sarana dan Prasarana RSJIPK, serta seluruh rekan kerja dan tim proyek atas arahan, dukungan, dan kerja samanya selama proses kegiatan berlangsung.

Ucapan terima kasih yang mendalam penulis persembahkan kepada keluarga besar tercinta atas doa, cinta, dan dukungan yang tiada henti:

- Drs. Muhammad Miftah Yudha, M.Si
- Dr. Sulkiah Hendrawati, S.H., M.H
- Shofiyatul Innayah, S.Ak., M.Ak.
- Nur Fitriyati, A.Md.
- Shofiya Mucharroma Turrochmah, A.Md.
- Suden Bahaudin, S.Pi.
- Iman Suseno, S.E
- Rizkita Putri, S.H.
- Muhammad Abdul Haris, S.Si

Akhirnya, dengan penuh rasa syukur, penulis menyampaikan terima kasih yang paling istimewa kepada dr. Tsabitha Hauro Narundana, yang senantiasa menjadi sumber semangat, inspirasi, dan penguat dalam setiap langkah proses ini.

Referensi

- Abdullah, M., & Rahardjo, I. (2021). Smart hospital concept and its application in Indonesia. *Jurnal Teknologi Informasi Kesehatan*, 5(2), 87–96.
- American Society for Healthcare Engineering (ASHE). (2022). *Sustainable healthcare facility design guidelines*. ASHE Press.
- Arup Group. (2023). *Sustainable design for healthcare: Integrating environmental and human wellbeing*. Arup Publications.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2021). *SNI 03-6572-2021 tentang tata cara perancangan sistem ventilasi dan pengkondisian udara pada bangunan rumah sakit*. Jakarta, Indonesia: BSN.
- Basuki, A., & Wulandari, R. (2022). Implementasi prinsip ergonomi pada desain ruang rawat inap rumah sakit. *Jurnal Rekayasa Bangunan dan Lingkungan*, 18(1), 44–52.
- Briggs, R., & Wilson, C. (2020). *Engineering ethics in the construction of health facilities*. Taylor & Francis.
- Fathurrahman, A., & Rahmawati, D. (2021). Implementasi prinsip green hospital pada desain fasilitas kesehatan di Indonesia. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 25(3), 155–162.
- Gibson, M., & Hewitt, S. (2021). *Resilient hospital infrastructure: Strategies for energy efficiency and climate adaptation*. Elsevier.
- Hamid, N., & Qomar, A. (2023). Integrasi sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja (SMK3) dalam proyek pembangunan rumah sakit. *Jurnal Keinsinyuran Indonesia*, 2(1), 11–22.
- Hidayat, S. (2022). Digitalisasi pengawasan proyek konstruksi rumah sakit menggunakan BIM (building information modeling). *Jurnal Sistem dan Infrastruktur Teknik Sipil*, 6(3), 203–214.
- Ikatan Arsitek Indonesia (IAI). (2023). *Pedoman perencanaan arsitektur rumah sakit di Indonesia*. IAI Press.
- International Federation of Consulting Engineers (FIDIC). (2020). *Code of ethics and professional conduct*. FIDIC.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2016). *Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 24 Tahun 2016 tentang persyaratan teknis bangunan rumah sakit*. Jakarta, Indonesia.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2017). *Peraturan Menteri PUPR Nomor 02/PRT/M/2017 tentang bangunan gedung hijau*. Jakarta, Indonesia.
- Larasati, D., & Nugroho, P. (2020). Analisis efisiensi energi dan kenyamanan termal pada bangunan fasilitas kesehatan. *Jurnal Energi dan Bangunan Hijau*, 12(2), 59–70.
- Mazzi, A., Angell, B., & Wheeler, A. (2022). Evidence-based design in hospital architecture: Linking space, process, and patient wellbeing. *Journal of Healthcare Engineering*, 9(4), 221–238.
- Muhammadiyah Council for Health. (2023). *Panduan desain rumah sakit Islami berbasis keberlanjutan*. Majelis Pembina Kesehatan Umum (MPKU) PP Muhammadiyah.
- Narundana, T. H. (2024). *Diskusi dan tinjauan klinis terhadap kebutuhan ruang medik dan pasien di Rumah Sakit Islam Jakarta Pondok Kopi*. Rumah Sakit Islam Jakarta Pondok Kopi.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2021). *Guidelines for construction safety and health in healthcare facilities*. U.S. Department of Health and Human Services.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2021). *Health infrastructure and innovation report 2021*. OECD Publishing.
- Prasetyo, Y., & Wibisono, H. (2022). Integrasi building management system (BMS) dalam pengelolaan rumah sakit modern. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Bangunan*, 14(2), 45–53.
- PT Gekha Karunia Abadi. (2024). *Dokumen pelaksanaan pekerjaan bunker radioterapi Rumah Sakit Islam Jakarta Pondok Kopi*. Jakarta, Indonesia.
- PT Global Rancang Selaras. (2024). *Dokumen perencanaan dan pengembangan desain gedung medik sentral, gedung radioterapi dan oncology center, serta gedung parkir dan rawat inap IVF Rumah Sakit Islam Jakarta Pondok Kopi*. Jakarta, Indonesia.
- PT Green Solutions Indonesia. (2024). *Dokumen spesifikasi dan pelaksanaan sistem tata udara (AC) proyek RSI Jakarta Pondok Kopi*. Jakarta, Indonesia.
- PT Maksi Solusi Enjineri. (2024). *Laporan manajemen konstruksi proyek pembangunan gedung medik sentral, gedung radioterapi dan oncology center, serta gedung parkir dan rawat inap IVF RSI Jakarta Pondok Kopi*. Jakarta, Indonesia.
- PT Mentari Prima Niaga. (2024). *Dokumen pelaksanaan pekerjaan proyek pembangunan gedung medik sentral, gedung radioterapi dan oncology center, serta gedung parkir dan rawat inap IVF RSI Jakarta Pondok Kopi*. Jakarta, Indonesia.
- Republik Indonesia. (2014). *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2014 tentang keinsinyuran*. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2014 Nomor 38.
- Rumah Sakit Islam Jakarta Pondok Kopi. (2024a). *Dokumen perencanaan dan pengembangan masterplan berbasis keberlanjutan*. Jakarta, Indonesia.
- Rumah Sakit Islam Jakarta Pondok Kopi. (2024b). *Laporan kegiatan pembangunan gedung medik sentral, gedung radioterapi dan oncology center, serta gedung parkir dan rawat inap IVF*. Jakarta, Indonesia.
- Setiawan, E., & Arifin, T. (2023). Evaluasi sistem tata udara berbasis kesehatan lingkungan pada gedung medik rumah sakit. *Jurnal Teknik dan Manajemen Bangunan*, 15(1), 88–99.
- Sitepu, R. (2024). *Arahan dan bimbingan praktik keinsinyuran bidang arsitektur rumah sakit*. Program Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya.
- Tim Pembangunan Gedung RSI Jakarta Pondok Kopi. (2024). *Laporan pelaksanaan dan koordinasi teknis proyek pembangunan gedung medik sentral, radioterapi, dan gedung parkir*. Jakarta, Indonesia.
- Tim Pre-Construction Risk Assessment (PCRA) RSI Jakarta Pondok Kopi. (2024). *Laporan asesmen risiko pra-konstruksi proyek pembangunan gedung medik sentral, gedung radioterapi dan oncology center, serta gedung parkir dan rawat inap IVF*. Jakarta, Indonesia.
- Tim Sarana dan Prasarana RSI Jakarta Pondok Kopi. (2024). *Laporan koordinasi teknis, monitoring, dan evaluasi pelaksanaan proyek gedung medik sentral, gedung radioterapi dan oncology center, serta gedung parkir dan rawat inap IVF*. Jakarta, Indonesia.
- United Nations Development Programme (UNDP). (2020). *Sustainable development goals implementation guide for health infrastructure*. UNDP.



- Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya. (2024). *Template prosiding seminar praktik keinsinyuran VII*. Surabaya, Indonesia.
- Widya Teknik Journal. (2024). *Guidelines for authors*. Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya.
- World Health Organization (WHO). (2020). *Health facility design guidelines*. WHO.
- World Health Organization (WHO). (2022). *Healthy environments for healthy people: Design principles for sustainable health facilities*. WHO Press.
- Yuliani, C., & Firmansyah, A. (2023). Penerapan continuous quality improvement (CQI) pada proyek pembangunan rumah sakit. *Jurnal Profesi Insinyur Indonesia*, 3(1), 33–40.
- Zhang, L., & Chen, H. (2022). *Hospital design and engineering integration for patient safety*. Springer Nature.



Penerapan *Job Safety Analysis* (JSA) pada Praktikum Instalasi Listrik Rumah di SMKK St. Louis Surabaya

Andreas Ervan Pradana^{1,2} Rasional Sitepu²

¹ Teknik Audio Video, SMKK St. Louis Surabaya

² Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ andreaservan.14@gmail.com

✉ rasional@ukwms.ac.id

Penelitian studi kasus ini bertujuan untuk menganalisis penerapan *Job Safety Analysis* (JSA) pada kegiatan praktikum instalasi listrik rumah di SMKK St. Louis Surabaya. Penerapan JSA menjadi upaya dalam peningkatan keselamatan dan kesehatan kerja (K3) murid-murid dan guru selama kegiatan praktikum. Penelitian ini menggunakan pendekatan campuran, yaitu metode kuantitatif, kualitatif, dan triangulasi, demi memperoleh hasil analisis yang lebih komprehensif. Data diperoleh melalui observasi kegiatan praktikum, penyebaran angket kepada siswa-siswi untuk menilai pemahaman dan penerapan aspek keselamatan kerja. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar siswa telah memahami pentingnya JSA, namun penerapannya masih belum optimal terutama dalam aspek identifikasi bahaya dan penggunaan alat pelindung diri (APD). Melalui penerapan metode JSA, diharapkan siswa-siswi dapat terlatih dan mengenali potensi bahaya kerja, mengambil langkah pencegahan yang tepat, serta menumbuhkan budaya kerja yang aman dan disiplin di lingkungan SMKK St. Louis Surabaya.

Kata kunci: *Job Safety Analysis*, Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Instalasi Listrik, SMKK St. Louis Surabaya, Studi Kasus

Pendahuluan

Sekolah Menengah Kejuruan memiliki peran strategis dalam mempersiapkan sumber daya manusia yang terampil, produktif, dan siap masuk dalam dunia industri. Selain pengetahuan dan keterampilan saat praktikum, peserta didik perlu memahami dan menerapkan prosedur kerja yang sesuai dengan prinsip Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) (Ashari & Sari, 2023). Peserta didik harus dibekali dengan pemahaman akan potensi bahaya dan mampu menerapkan langkah-langkah pencegahan kecelakaan kerja. Kenyataannya, kesadaran dan penerapan K3Lh di lingkungan Sekolah masih sering diabaikan, baik karena keterbatasan sarana prasarana, kurangnya pengawasan, maupun rendahnya pemahaman akan risiko kerja di bidang teknik.

Seperti kegiatan praktikum instalasi listrik rumah, memiliki risiko tinggi bila tidak dilakukan dengan prosedur keselamatan yang benar. Bahaya seperti tersengat arus listrik, luka karena penggunaan perkakas tangan, serta kebakaran akibat hubungan arus pendek, bisa terjadi bila keselamatan kerja diabaikan (Yusriyyah et al, 2024). Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan yang sistematis untuk mengidentifikasi potensi bahaya, menganalisis risiko, serta menentukan langkah pengendalian yang tepat sebelum praktikum dimulai. Salah satu pendekatan yang relevan adalah *Job Safety Analysis* (JSA), yaitu metode yang menggunakan setiap tahapan kegiatan untuk menentukan potensi bahaya, dan merancang tindakan pengendalian. Dengan demikian, kegiatan praktik dapat berlangsung aman, efektif, dan membentuk budaya kerja yang aman.

Metode

Pengumpulan data untuk artikel ini menggunakan dua cara, yaitu melalui observasi langsung melalui praktikum dengan hasil dari lembar praktikum dan wawancara tidak langsung (*G-form*). Observasi dilakukan di Laboratorium

bengkel Teknik Audio Video SMKK St. Louis saat praktikum instalasi listrik, mengamati secara langsung dan melihat melalui laporan hasil praktikum. Wawancara tidak langsung, mengumpulkan data melalui pertanyaan yang disediakan melalui *Google Formulir*, dan diisi oleh siswa-siswi yang telah melakukan praktikum.

Data yang digunakan adalah data dari dua sumber, yaitu hasil kuesioner dengan menggunakan *Google Formulir* dan laporan hasil praktikum. Hasil kuesioner dengan *Google Formulir* yang diisi adalah mengenai pemahaman dan penerapan JSA, bagian ini bersifat kuantitatif karena berisi angka skala dan satu pertanyaan terbuka. Laporan hasil praktikum adalah hasil dari praktikum instalasi listrik yang dilaporkan dengan kondisi nyata dan kendala yang dialami, bersifat kualitatif, berupa uraian pengalaman dan observasi nyata siswa di lapangan. Karena sumber data yang dimasukkan berbeda karakter, maka akan diambil metode campuran (*triangulasi data*) untuk menggabungkan karakter kuantitatif dan kualitatif.

Hasil Kerja

Data

Berdasarkan hasil analisis kuantitatif dari pengolahan data kuesioner yang diisi oleh siswa SMKK St. Louis Surabaya mengenai penerapan *Job Safety Analysis* (JSA) pada praktikum instalasi listrik rumah, diperoleh nilai rata-rata dari seluruh pernyataan sebesar 4,46 pada skala Likert 1-5. Nilai ini termasuk dalam kategori “Sangat Baik”, yang menunjukkan bahwa siswa memiliki tingkat pemahaman dan kesadaran tinggi terhadap pentingnya penerapan JSA dalam kegiatan praktikum.

Pernyataan dengan skor tertinggi adalah “Dengan JSA saya dapat bekerja lebih aman dan tertib selama praktikum” dan “Menurut saya JSA sangat penting dalam semua kegiatan praktikum”, masing-masing dengan nilai rata-rata 4,76, menggambarkan sikap positif siswa terhadap penerapan JSA. Sedangkan skor terendah berada pada

pernyataan “Saya memahami langkah-langkah dalam menyusun JSA secara lengkap” dengan nilai 4,16, yang mengindikasikan masih perlunya pembinaan dan bimbingan dalam pemahaman teknis penyusunan JSA. Secara umum, hasil kuantitatif ini menunjukkan bahwa siswa sudah memiliki persepsi positif terhadap JSA, namun implementasi teknisnya masih perlu diperkuat melalui pendampingan langsung pada saat pelaksanaan praktikum agar prinsip-prinsip keselamatan benar-benar diterapkan secara konsisten.

Berdasarkan analisis kualitatif dari lima laporan praktikum siswa, diperoleh beberapa kata utama yang menggambarkan penerapan *Job Safety Analysis* (JSA) selama kegiatan instalasi listrik rumah. Kata yang paling sering muncul adalah “Kecelakaan atau Cedera” dan “Alat/Peralatan”, masing-masing ditemukan pada sekitar 62,5% laporan, menunjukkan bahwa siswa banyak menyoroti aspek keselamatan dan kesiapan peralatan kerja. Kata “Listrik/Tegangan” dan “Prosedur/Langkah Kerja” muncul pada 50% laporan, menandakan adanya perhatian terhadap sumber bahaya listrik dan tahapan pelaksanaan kerja.

Kata “APD (Alat Pelindung Diri)” muncul pada 37,5% laporan, yang menunjukkan bahwa sebagian siswa sudah menyadari pentingnya penggunaan APD, namun penerapannya masih belum merata di semua kelompok. Sementara itu, kata “Pengawasan/Guru” dan “Saran/Perbaikan” hanya ditemukan pada 25% laporan, yang menandakan bahwa keterlibatan pengawas dan refleksi perbaikan setelah kegiatan masih perlu ditingkatkan. Dari kutipan laporan siswa juga ditemukan bahwa sebagian besar kecelakaan yang terjadi bersifat minor, seperti luka ringan saat pemotongan pipa atau terkena ujung kabel. Beberapa laporan menyebutkan bahwa kecelakaan tersebut disebabkan oleh kurangnya kehati-hatian dan penggunaan APD yang tidak lengkap.

Secara keseluruhan, hasil analisis kualitatif ini menunjukkan bahwa siswa telah memahami pentingnya aspek keselamatan kerja dan JSA, namun dalam praktiknya masih terdapat ketidakkonsistenan dalam penerapan prosedur dan penggunaan alat pelindung diri. Hal ini menunjukkan perlunya penguatan pembiasaan budaya K3 dan pengawasan yang lebih intensif selama kegiatan praktikum.

Triangulasi data dilakukan dengan membandingkan hasil analisis kuantitatif dari kuesioner siswa dan analisis kualitatif dari laporan praktikum untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai penerapan *Job Safety Analysis* (JSA). Dari hasil kuesioner, siswa menunjukkan tingkat pemahaman dan persepsi yang sangat baik terhadap JSA, dengan rata-rata skor keseluruhan sebesar 4,46 (kategori sangat baik). Mayoritas siswa menyatakan bahwa penerapan JSA membantu mereka bekerja lebih aman, tertib, dan terarah selama kegiatan praktikum. Hal ini menunjukkan bahwa siswa secara kognitif dan sikap, siswa sudah memahami pentingnya JSA dalam mencegah kecelakaan kerja.

Namun, hasil analisis kualitatif dari laporan praktikum menunjukkan bahwa implementasi JSA di lapangan belum sepenuhnya konsisten. Masih ditemukan laporan yang mencatat kejadian kecelakaan ringan, ketidaktertiban penggunaan alat pelindung diri (APD), serta kurangnya pengawasan guru atau instruktur selama kegiatan. Tema

“Kecelakaan/Cedera” dan “Alat/Peralatan” bahkan menjadi topik yang paling sering muncul dalam laporan, menunjukkan adanya kesenjangan antara pengetahuan teoritis dan praktik nyata di lapangan.

Melalui triangulasi ini dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan antara persepsi siswa tentang penerapan JSA dan pelaksanaan sebenarnya di lapangan. Siswa memahami pentingnya JSA (hasil kuesioner), namun pada tahap penerapan masih memerlukan pendampingan, pengawasan, dan pembiasaan prosedur keselamatan kerja. Secara umum, triangulasi ini menegaskan bahwa pembelajaran teori JSA telah berhasil membentuk kesadaran keselamatan, tetapi perlu ditindaklanjuti dengan penguatan praktik dan disiplin penerapan JSA agar tujuan keselamatan kerja dalam kegiatan praktikum dapat tercapai secara optimal.

Pembahasan

Terdapat analisis situasi yang menjadi permasalahan saat dilakukan praktikum instalasi listrik rumah di SMKK St. Louis Surabaya. Hasil dari analisis dibagi menjadi beberapa poin yang dianggap menjadi permasalahan yang ada di lokasi atau laboratorium tempat dilakukannya praktikum. Permasalahan penerangan sampai ke budaya kerja juga menjadi sorotan agar kegiatan praktikum diharapkan bisa aman di kemudian hari.

Kondisi laboratorium yang rapi, terang, dan terdapat rambu bahaya adalah hal yang ideal. Dalam kenyataannya masih ditemui area lab yang belum tertata rapi karena alat yang belum dikembalikan pada tempatnya, jalur listrik belum tertata dengan baik, penerangan beberapa titik kerja kurang memadai sehingga mengurangi jarak pandang. Rambu-rambu K3 dan petunjuk penggunaan alat belum tercantum atau terpasang dengan baik, sehingga tidak ada rambu yang menjadi perhatian siswa-siswi. Perlu adanya penataan ulang ruang praktikum, dan penggalakan prinsip 5R (Ringkas, Rapi, Resik, Rajin, Rawat).

Kedisiplinan siswa dalam penerapan keselamatan dan kesehatan kerja masih belum terbentuk secara penuh hingga menjadi budaya kerja. Meskipun sebagian besar siswa sudah memahami pentingnya menjaga keselamatan kerja selama praktikum berlangsung, pemahaman tersebut belum konsisten di terapkan dalam perilaku. Banyak siswa belum menjadikan prosedur K3 sebagai bagian dari budaya kerja, melainkan hanya sebatas pemahaman dan aturan tertulis saja.

Selain itu, masih terlihat beberapa siswa yang bekerja tanpa melihat dan memperhatikan kondisi lingkungan kerjanya. Kurang adanya rasa peduli terhadap keselamatan diri sendiri dan teman kerjanya membuat potensi bahaya semakin meningkat, terutama ketika peralatan listrik dan alat praktik atau alat uji digunakan secara bersamaan. Hal ini menunjukkan bahwa kesadaran mengenai saling menjaga keamanan masih perlu ditingkatkan.

Pengawasan guru yang kurang intensif ketika seluruh kelompok praktikum bekerja secara bersama juga turut mempengaruhi rendahnya kedisiplinan siswa. Dalam kondisi kelas yang ramai dan penuh aktivitas, perhatian guru menjadi terpecah sehingga beberapa tindakan tidak aman luput dari pemantauan. Situasi ini juga menyebabkan penerapan K3 masih belum terlaksana dengan optimal.

Disiplin siswa dalam penerapan K3 masih kurang, dan kesadaran akan pentingnya penerapan keselamatan kerja

belum terbentuk sebagai budaya kerja. K3 masih dipandang sebagai aturan yang perlu ditepati, dan belum dipandang sebagai kebutuhan dasar yang harus dilakukan demi menjaga keselamatan bersama.

Penggunaan alat serta bahan dalam kegiatan praktikum masih mengalami beberapa masalah yang dapat memengaruhi keselamatan kerja. Beberapa alat dan bahan yang dimanfaatkan oleh siswa telah mengalami wear atau kerusakan, tetapi tetap digunakan karena jumlah alat yang tersedia sangat terbatas. Situasi ini jelas dapat meningkatkan risiko bahaya, terutama ketika peralatan yang tidak layak digunakan dipaksakan untuk menyelesaikan tugas teknis.

Lebih lanjut, hingga saat ini tidak ada sistem untuk mencatat atau memeriksa secara berkala kondisi peralatan di bengkel. Ketidakadaan prosedur pemeliharaan yang terencana menyebabkan kerusakan alat tidak dapat terdeteksi dengan cepat. Ini membuat siswa sering menemukan alat yang tidak berfungsi secara optimal, bahkan bisa berbahaya saat digunakan. Kondisi ini menunjukkan pentingnya manajemen inventaris yang lebih baik untuk memastikan peralatan selalu dalam keadaan siap digunakan.

Dari segi kemampuan, sebagian siswa juga masih mengalami kesulitan dalam menggunakan beberapa jenis alat tangan. Kurangnya keterampilan dalam memegang, mengoperasikan, atau merawat alat dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya kecelakaan kerja. Hal ini menunjukkan bahwa pelatihan keterampilan dasar dalam penggunaan alat masih perlu ditingkatkan dalam kegiatan praktikum.

Secara umum, situasi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan alat dan bahan harus mendapat perhatian yang lebih mendalam. Risiko kecelakaan meningkat ketika siswa menggunakan alat yang rusak atau tidak tahu cara menggunakannya dengan benar. Oleh karena itu, pemeriksaan alat sebelum digunakan harus menjadi salah satu langkah penting dalam analisis keselamatan kerja (JSA), sehingga setiap pekerjaan dapat dimulai dengan peralatan yang aman dan layak pakai. Pelaksanaan Analisis Keselamatan Kerja (AKK) dalam kegiatan praktikum masih belum berfungsi secara maksimal. Meskipun sejumlah siswa telah grasp konsep dasar AKK, penerapannya belum terjalin secara rutin di setiap tahap pekerjaan. Banyak prosedur dilaksanakan tanpa analisis risiko yang cukup, sehingga sejumlah kemungkinan bahaya sering kali tidak dikenali sejak awal. Keadaan ini menunjukkan bahwa pemahaman teoretis belum sepenuhnya diimplementasikan menjadi praktik yang teratur dan menyeluruh.

Di samping itu, pemanfaatan formulir AKK sebagai sarana dokumentasi formal masih sangat minim. Formulir yang seharusnya digunakan untuk mendokumentasikan potensi bahaya, langkah kerja, dan langkah pencegahan jarang diisi dengan detail. Ketidadaan catatan ini mengakibatkan proses identifikasi dan pengendalian risiko tidak dicatat dengan baik, sehingga evaluasi keselamatan kerja menjadi sulit dilaksanakan secara teratur. Padahal, pencatatan yang baik dapat membantu siswa dan pengajar memahami pola bahaya serta langkah-langkah mitigasi yang efisien.

Secara keseluruhan, rendahnya pelaksanaan AKK dalam setiap kegiatan praktikum meningkatkan kemungkinan terjadinya kecelakaan kerja. AKK merupakan alat yang

krusial yang membantu siswa memahami koneksi antara aktivitas kerja, potensi bahaya yang mungkin timbul, serta cara-cara untuk mengendalikannya. Dengan penerapan AKK yang baik dan rutin, risiko kecelakaan dapat diminimalisir secara signifikan, sekaligus meningkatkan budaya keselamatan dan kesadaran K3 di lingkungan pendidikan.

Faktor-faktor manajerial dan kebijakan institusi pendidikan memiliki dampak besar terhadap efektivitas penerapan keselamatan kerja, termasuk dalam penerapan Analisis Keselamatan Kerja (JSA). Saat ini, tidak ada kebijakan tertulis yang mewajibkan penerapan JSA dalam setiap aktivitas praktikum. Ketidakadaan pedoman resmi ini mengakibatkan pelaksanaan JSA tidak dilakukan secara konsisten, karena baik guru maupun siswa tidak memiliki panduan jelas mengenai tanggung jawab, prosedur, dan standar yang harus diikuti.

Lebih lanjut, kegiatan pelatihan dan pembinaan mengenai K3 belum dilakukan secara teratur dan terjadwal. Program pelatihan yang seharusnya bertujuan untuk meningkatkan pengetahuan siswa mengenai potensi bahaya, penggunaan alat yang aman, serta langkah-langkah pencegahan kecelakaan belum menjadi bagian dari agenda rutin di sekolah. Tanpa adanya pelatihan yang berkelanjutan, kemampuan dan kesadaran K3 bagi siswa tidak dapat berkembang secara optimal, sehingga banyak prosedur keselamatan yang tidak dilaksanakan dengan baik.

Monitoring dan penilaian terhadap penerapan K3 masih bersifat reaktif, yaitu dilakukan setelah masalah muncul atau insiden kecil terjadi di bengkel atau laboratorium. Pendekatan seperti ini membuat potensi bahaya diabaikan hingga timbulnya kejadian yang tidak diinginkan. Padahal, pengawasan yang bersifat preventif sangat penting untuk mengidentifikasi dan menurunkan risiko sebelum menjadi masalah yang lebih serius. Secara umum, dapat disimpulkan bahwa peran manajemen sekolah sangat krusial dalam menciptakan budaya keselamatan kerja. Tanpa adanya kebijakan yang jelas, pengawasan yang berkesinambungan, dan pelatihan yang rutin, upaya penerapan JSA tidak akan berhasil secara maksimal. Untuk mendorong budaya keselamatan yang kokoh dalam konteks praktikum, sekolah perlu menginisiasi langkah-langkah proaktif melalui regulasi, pembinaan, dan penilaian yang sistematis.

Dampak dari berbagai kendala dalam penerapan keselamatan dan kesehatan kerja (K3) mulai terlihat di aktivitas praktikum sehari-hari. Risiko cedera kerja ringan masih sering terjadi, misalnya, tangan siswa sering tergores akibat penggunaan alat tangan yang tidak sesuai, atau kerusakan pada instrumen pengukur akibat kesalahan dalam pemilihan mode pada multimeter. Insiden kecil ini menunjukkan bahwa pemahaman dan keterampilan siswa dalam bekerja dengan aman perlu ditingkatkan.

Di samping itu, efisiensi kerja selama praktikum juga mengalami penurunan karena adanya gangguan teknis serta penataan alat yang tidak memadai. Peralatan yang tidak terorganisir dengan baik atau kondisi alat yang tidak siap pakai sering kali mengakibatkan proses pembelajaran berjalan lebih lambat dari yang diharapkan. Keadaan ini tidak hanya menghalangi kelancaran praktikum tetapi juga mengurangi peluang siswa untuk memahami prosedur kerja yang benar dan aman. Kekurangan dokumentasi JSA juga memberikan pengaruh besar terhadap kemampuan sekolah dalam melakukan evaluasi. Tanpa catatan yang jelas mengenai potensi risiko, langkah kerja, serta tindakan

pengendalian yang telah diterapkan, sekolah akan sulit menilai efektivitas penerapan K3. Hal ini menyebabkan identifikasi masalah dan perbaikan sistem keselamatan menjadi kurang fokus.

Secara keseluruhan, masalah-masalah ini menunjukkan bahwa sistem K3 di lingkungan sekolah belum berjalan dengan efektif dan menyeluruh. Diperlukan kolaborasi yang kuat antara guru, siswa, dan semua pihak terkait untuk memperbaiki prosedur, meningkatkan pengawasan, dan membangun kebiasaan kerja yang aman. Dengan kerjasama yang solid, proses pembelajaran praktikum bisa berlangsung dengan lebih aman, efisien, dan berkualitas.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian penerapan *Job Safety Analysis* (JSA) pada kegiatan praktikum instalasi listrik rumah di SMKK St. Louis, dapat disimpulkan bahwa secara umum siswa telah memiliki tingkat kesadaran dan pemahaman yang tinggi terhadap pentingnya keselamatan kerja. Berdasarkan hasil kuantitatif, nilai rata-rata didapati sebesar 4,46% pada skala 1-5 yang menunjukkan kategori sangat baik. Hasilnya menggambarkan bahwa siswa memandang penerapan JSA sebagai hal penting dalam penciptaan lingkungan kerja yang aman dan tertib selama praktikum berlangsung. Tetapi, ada siswa yang masih butuh pendampingan dalam memahami langkah-langkah teknis penyusunan JSA. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pemahaman siswa terhadap JSA sudah kuat dan perlu penguatan melalui bimbingan guru secara langsung.

Sementara itu, hasil kualitatif dari laporan praktikum siswa mengungkapkan bahwa sebagian besar siswa mampu mengenali potensi bahaya dan risiko kerja seperti sengatan listrik, luka akibat alat, dan area kerja yang kurang aman. Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan JSA saat praktikum belum berjalan merata. Sebagian siswa masih lalai dalam penggunaan Alat Pelindung Diri (APD), dan pengawasan guru belum dilakukan secara optimal. Selain itu, beberapa laporan menunjukkan bahwa sebagian besar insiden yang terjadi berupa kecelakaan ringan yang disebabkan oleh kurangnya kehati-hatian dan pengawasan. Hal ini mengindikasikan bahwa meski pemahaman sudah mulai terbentuk, pembiasaan dan kedisiplinan dalam penerapan masih perlu diperkuat.

Hasil Triangulasi antara data kuantitatif dan kualitatif menunjukkan adanya kesenjangan pemahaman antara teori dan pelaksanaan di lingkungan praktik. Siswa memahami konsep dan manfaat dari JSA, namun implementasinya belum baik karena ada keterbatasan fasilitas keselamatan, belum ada budaya kerja aman, dan kurangnya pengawasan secara berkala. Dengan demikian, diperlukan komitmen bersama untuk memperkuat penerapan JSA melalui pelatihan keselamatan kerja, penyediaan APD yang memadai serta pembiasaan budaya kerja disiplin dan berkelanjutan. Upaya tersebut diharapkan mampu menjadikan metode JSA sebagai sarana efektif dalam membangun budaya Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) di lingkungan pendidikan.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada berbagai pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan, terutama kepada Bapak/Ibu guru di SMKK St. Louis Surabaya yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta fasilitas dalam pelaksanaan kegiatan ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada seluruh rekan siswa yang turut berpartisipasi dalam pengumpulan data dan pelaksanaan praktikum. Juga pada pihak-pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, atas bantuan selama pengerjaan dan penyelesaian prosiding ini.

Referensi

- Ashari, H., & Sari, D. A. L. (2023). Penerapan keselamatan dan kesehatan kerja dalam praktik instalasi penerangan listrik di sekolah menengah kejuruan. *Zetroem*, 5(2), 187–192.
- Porawouw, J., Kawatu, P. A. T., Umboh, J. M. L., & Ratulangi, S. (2020). Analisis pelaksanaan metode job safety analysis (JSA) pada bagian maintenance mechanical di PT Meares Sopotan Mining (MSM) Likupang. *Kesmas*, 9(4), 94–104.
- Saraswati, A. L., Iriani, T., & Handoyo, S. S. (2019). Pengembangan job safety analysis untuk workshop praktik plumbing di pendidikan vokasional konstruksi bangunan Universitas Negeri Jakarta. *Jurnal Pendidikan Teknik Sipil (JPenSil)*, 8(2), 55–100. <https://doi.org/10.21009/jpensil.v8i2.8438>
- Sinaga, A. N., & Lukodono, R. P. (2023). Penggunaan job safety analysis (JSA) dalam mencegah potensi bahaya dan risiko akibat kecelakaan kerja. *Rekayasa Sistem dan Manajemen Industri*, 1(1), 90–102.
- Triani, N. (2017). Sosialisasi dan pelatihan penerapan prinsip keselamatan dan kesehatan kerja (K3) pada petani cengkeh di Bone dan Bulukumba, Sulawesi Selatan. *Manajemen Pendidikan dan Pelatihan*, 12(1), 99–104.
- Yusriyyah, W., Artiani, G. P., & Siagian, B. M. (2024). Identifikasi pelaksanaan kesehatan dan keselamatan kerja (K3) dengan metode job safety analysis (JSA). *[Nama jurnal tidak disebutkan]*, 23(1), 180–186.



Analisis SWOT dalam Menentukan Strategi Pengelolaan TPS3R Randuboto, Kabupaten Gresik

Niswatun Faria^{1,2} Shela Panca Aprilia²
Najwa Khoirunnisa¹ Az-zahro Fii Sabilillah²
Farikhah^{1,3} Dian Trihastuti¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

² Program Studi Manajemen Rekayasa, Universitas Internasional Semen Indonesia

³ Program Studi Budidaya Perikanan, Universitas Muhammadiyah Gresik

✉ niswatun.faria@uisi.ac.id

Timbulan sampah di Kabupaten Gresik terus meningkat hingga mencapai 146.814,53 ton pada tahun 2024, sehingga diperlukan penguatan pengelolaan sampah berbasis masyarakat melalui TPS3R. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja TPS3R Randuboto dan merumuskan strategi menggunakan analisis SWOT. Data diperoleh melalui FGD, observasi lapangan, wawancara, serta studi dokumen. Hasil perhitungan IFAS dan EFAS menunjukkan bahwa TPS3R Randuboto memiliki landasan kelembagaan yang kuat, cakupan layanan yang luas, serta inovasi pengolahan sampah, namun masih menghadapi kelemahan berupa rendahnya persentase sampah terkelola, pencatatan operasional yang tidak konsisten, dan tingginya residu. Pemetaan analisis SWOT menempatkan TPS3R Randuboto pada Kuadran I, sehingga strategi agresif yang direkomendasikan yaitu: digitalisasi pencatatan, peningkatan kapasitas SDM, diversifikasi produk olahan kompos dan pakan ternak, serta penguatan kerja sama dengan akademisi, dan industri. Temuan ini menegaskan pentingnya penguatan tata kelola dan inovasi teknologi untuk mendukung keberlanjutan TPS3R dalam kerangka ekonomi sirkuler.

Kata kunci: Sampah, TPS3R, Randuboto, SWOT, Keberlanjutan

Pendahuluan

Dalam tiga tahun terakhir, timbulan sampah di Kabupaten Gresik menunjukkan peningkatan. Pada tahun 2022, Gresik menghasilkan 142.835,43 ton sampah dan 144.238,33 ton pada tahun 2023, kemudian meningkat menjadi 146.814,53 ton pada tahun 2024 (SIPSN, 2025). Kenaikan timbulan sampah tersebut berbanding lurus dengan laju pertumbuhan penduduk di Gresik. Pada tahun 2024, penduduk Gresik bertumbuh sebesar 1,77% (Disdukcapil Gresik, 2024). Peningkatan volume timbulan sampah di provinsi Jawa Timur dipengaruhi oleh Produk Domestik Regional Bruto (PDRB), luas wilayah, dan kepadatan penduduk (Ilmi & Syaifuddin, 2025). Pada penelitian lain menunjukkan adanya korelasi yang kuat antara dampak pengangguran, populasi dan kemiskinan pada timbulan sampah nasional (Bariyah, Muftahurrohman, & Faria, 2025). Komposisi sampah Gresik didominasi oleh sampah organik sisa makanan sebesar 55,3%; diikuti dalam jumlah yang lebih kecil oleh sampah plastik sebesar 11,58%, kayu/ranting sebesar 10,29%, kain sebesar 4,84%, dan kertas/karton sebesar 4,47%.

Data pengelolaan sampah menunjukkan kinerja yang relatif baik, yaitu 77,21% sampah berhasil dikelola. Namun kondisi di lapangan, Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Ngipik yang merupakan satu-satunya TPA di Kabupaten Gresik kelebihan kapasitas (Masfardian, 2025). Salah satu strategi yang terus ditingkatkan oleh Kabupaten Gresik dalam menangani sampah adalah peningkatan fungsi Tempat Pengelolaan Sampah *Reduce Reuse Recycle* (TPS3R). TPS3R adalah fasilitas pengelolaan dan pengolahan sampah skala kawasan di mana tidak hanya melakukan pengumpulan tetapi juga pemilahan dan pengolahan sampah untuk

menghasilkan produk yang bernilai ekonomi, dan edukasi kepada masyarakat untuk dapat mengurangi sampah dari rumah. Tujuan TPS3R adalah untuk mengurangi dan memperbaiki karakteristik sampah yang akan diolah di TPA (Sasongko, 2022). Dengan berkurangnya sampah yang dikirim menuju TPA akan mengurangi beban TPA dalam melakukan pengolahan sampah.

Pengelolaan sampah TPS3R merupakan sistem pengelolaan sampah berbasis masyarakat yang bertujuan untuk meningkatkan kesadaran dan tanggung jawab akan sampah yang dihasilkan (A'fia & Purnama, 2024). TPS3R menerapkan prinsip ekonomi sirkuler melalui kegiatan penggunaan kembali dan daur ulang. Ekonomi sirkuler adalah pendekatan dengan memaksimalkan siklus hidup suatu produk, material dan sumber daya hingga tidak mungkin digunakan kembali (Otiyanti, Tilottama, Meilani, & Fani, 2023). Dalam model ekonomi sirkuler, pengelolaan sampah tidak hanya berfokus pada pengolahan sampah, tetapi juga pada aspek manajemen, keuangan, pemasaran, operasional, dan sumber daya manusia (Puspita, Sitio, & Fitriyani, 2023). Prinsip ekonomi sirkuler pada pengelolaan limbah sejalan dengan tujuan pembangunan berkelanjutan (Fandira, Solistiyowati, & Sibuea, 2023). Pengelolaan sampah melalui TPS3R secara langsung berkontribusi pada implementasi peta jalan SDG 12 melalui kegiatan ekonomi sirkuler pada pengelolaan dan pengolahan sampah.

Pada tahun 2023 terdapat 18 TPS3R aktif yang tersebar di beberapa kecamatan. Namun hingga saat ini belum ada TPS3R yang mampu mengolah lebih dari 50% sampah yang masuk. Beberapa faktor penyebab rendahnya performa TPS3R, yaitu operasional, pemeliharaan, manajemen, dan partisipasi masyarakat. TPS3R Randuboto merupakan salah satu TPS3R yang

cukup aktif di Gresik. TPS3R Randuboto didirikan pada tahun 2024 dan saat ini dikelola oleh Kelompok Pengelola dan Pemelihara (KPP) TPS3R Randuboto. TPS3R Randuboto terletak di Desa Randuboto, Kecamatan Sidayu, Kabupaten Gresik. Jumlah total penduduk Desa Randuboto pada tahun 2025 adalah 3.699 penduduk dengan komposisi 1.853 laki-laki dan 1.846 perempuan (Desa Randuboto, 2025). Mata pencaharian utama penduduk adalah petani, nelayan, dan pedagang kecil. Jenis sampah yang dihasilkan desa Randuboto selain sampah rumah tangga yaitu produk sampingan pertanian (jerami, sekam, dan sisa tumbuhan), produk sampingan perikanan laut (limbah ikan dan cangkang kerang).

Secara administratif, TPS3R tersebut telah memiliki legalitas formal yang lengkap, meliputi Akta Notaris, Surat Keputusan (SK) Pendirian yang disahkan oleh Kepala Desa serta diketahui oleh SKPD (Satuan Kerja Perangkat Daerah), serta dilengkapi dengan Anggaran Dasar dan Anggaran Rumah Tangga (AD/ART). Pengelolaan TPS3R Randuboto mengandalkan iuran masyarakat sebagai sumber dana operasional. TPS3R Randuboto belum banyak melakukan kerjasama lintas sektor seperti sektor industri, swasta, dan akademisi. Hal tersebut menjadi tantangan untuk keberlanjutan TPS3R Randuboto. Kunci keberhasilan TPS3R adalah sinergi antara partisipasi aktif masyarakat melalui pengurangan dari sumber, kolaborasi dengan mitra untuk pendanaan dan teknologi, pemerintah daerah dalam penyusunan regulasi, penguatan SDM, serta operasional dan pemeliharaan (Damiti, Lihawa, & Baderan, 2024).

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji TPS3R Randuboto guna merumuskan strategi pengelolaan TPS3R Randuboto. Analisis SWOT digunakan sebagai alat dalam penyusunan strategi keberlanjutan TPS3R Randuboto. Analisis SWOT merupakan teknik untuk merumuskan strategi suatu organisasi secara sistematis berdasarkan pada data dengan cara memaksimalkan kekuatan (S), memanfaatkan peluang (O), meminimalkan kelemahan (W) dan menghindari ancaman (T) (Rangkuti, 2006). Keuntungan dalam menggunakan metode SWOT yaitu pengembangan strategi lebih efektif dan efisien berdasarkan kondisi internal dan eksternal (Haque, Yasir, Suradji, & Istianingsih, 2024).

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan tujuan mengevaluasi kinerja TPS3R Randuboto saat ini. Pengumpulan data terkait penelitian ini meliputi:

1. FGD dengan *stakeholder* TPS3R: Pengelola, Kepala Desa, Dinas Lingkungan Hidup, dan Bappeda.
2. Studi lapangan di TPS3R Randuboto dan wawancara dengan *stakeholder* terkait untuk melihat kondisi TPS3R dan menggali informasi terkait operasional. Selain itu juga dilakukan studi dokumen sebagai data sekunder.

Analisis keberlanjutan program TPS3R menggunakan pendekatan SWOT untuk menilai berbagai faktor yang berpengaruh terhadap kelangsungan program, baik yang berasal dari kondisi internal maupun lingkungan

eksternal. Untuk melakukan Analisis SWOT dibutuhkan data mengenai kekuatan, kelemahan, peluang, dan ancaman berdasarkan temuan di lapangan terkait pelaksanaan operasional TPS3R, dan hasil diskusi dan wawancara dengan *stakeholder* terkait. Pendekatan ini memungkinkan penyusunan strategi yang lebih tepat dalam memperkuat keberlanjutan TPS3R Randuboto.

Kajian SWOT terhadap TPS3R Randuboto mengacu pada standar indikator dan parameter evaluasi TPS3R (Direktorat Jenderal Cipta Karya, 2017) yang meliputi:

1. Produk pengaturan yang mendukung seperti peraturan daerah dan rencana pengembangan TPS3R.
2. Teknis dan teknologi meliputi: pencatatan sampah, kondisi sarana dan prasarana, jenis pengelolaan sampah, kondisi peralatan, dan volume residu yang diangkut menuju TPA.
3. Kelembagaan pengelolaan TPS3R termasuk lembaga pengelola, struktur organisasi, SDM, administrasi pengelolaan, fasilitas kelembagaan, legalitas lembaga.
4. Keuangan: kondisi keuangan, pengelolaan keuangan, dan bantuan keuangan dari pemerintah.
5. Partisipasi masyarakat dalam pemilahan sampah, iuran, dampak ekonomi dan pengembangan pelanggan.

Dalam penyusunan strategi keberlanjutan TPS3R, digunakan pendekatan kuantitatif untuk memperoleh hasil analisis yang objektif dan terukur. Faktor internal meliputi kekuatan (S) dan kelemahan (W) yang disebut sebagai *Internal Strategic Factor Analysis Summary* (IFAS). Faktor eksternal terdiri dari peluang (O) dan ancaman (T) yang dirangkum dalam *External Strategic Factor Analysis Summary* (EFAS). Setiap indikator dalam IFAS dan EFAS diberi bobot sesuai tingkat signifikansinya (0,0–1,0) dengan total bobot IFAS dan EFAS masing-masing sebesar 1. Kemudian setiap indikator dievaluasi menggunakan skala 1–4 untuk menunjukkan tingkat pengaruhnya terhadap keberlanjutan program, di mana nilai 1 menunjukkan pengaruh yang sangat rendah atau tidak signifikan, sedangkan nilai 4 menunjukkan pengaruh yang sangat tinggi atau signifikan.

Pada masing-masing indikator nilai bobot dikalikan dengan nilai evaluasi. Selanjutnya, nilai indikator pada masing-masing faktor SWOT dijumlahkan. Nilai kumulatif untuk faktor S dan faktor W kemudian digunakan untuk menentukan *Strength Position* melalui perhitungan S dikurangi W, sedangkan nilai total faktor O dan faktor T digunakan untuk menghitung *Competitive Position* dengan rumus O dikurangi T. Kedua hasil tersebut selanjutnya menjadi dasar pemetaan posisi TPS3R dalam diagram SWOT, yang terdiri dari empat kuadran strategi, yaitu Kuadran I (Agresif), Kuadran II (Diversifikasi), Kuadran III (*Turnaround*), dan Kuadran IV (Defensif).

Hasil Kerja

Kajian Lapangan dan FGD

TPS3R Randuboto berstatus aktif dan melayani pengumpulan serta pengolahan sampah yang mencakup 16 Rukun Tetangga (RT), dengan jadwal

pengangkutan sampah dilakukan setiap tiga hari sekali. Kapasitas rata-rata sampah yang masuk ke TPS3R Randuboto mencapai sekitar 100 kg. Berdasarkan hasil observasi lapangan, sekitar 50% dari total timbunan sampah tersebut berhasil dikelola melalui proses pemilahan dan pengolahan. Dengan demikian, hampir separuh dari sampah masuk yang menjadi residu dan selanjutnya dibakar atau diangkut ke TPA. Pencatatan terkait jumlah sampah masuk dan keluar, serta komposisi sampah yang diterima TPS3R belum dilakukan secara konsisten. Hal tersebut menyulitkan dalam perencanaan pengembangan TPS3R ke depan. Jenis sampah yang dikumpulkan oleh masyarakat ke TPS3R Randuboto sangat beragam. Sampah organik mencakup sisa makanan, kotoran hewan, serbuk gergaji, dan cangkang kerang dalam jumlah besar. Sementara itu, sampah anorganik meliputi berbagai jenis botol plastik, kardus, gelas plastik, botol kaca, plastik campuran, kantong plastik, sepatu, dan kertas/karton.

Hanya sebagian kecil sampah organik yang diolah di TPS3R karena masyarakat sudah melakukan pemilahan dari rumah. Setiap rumah tangga diwajibkan memiliki biopori sebagai sarana pengolahan sampah organik di lahan masing-masing. Bagi warga yang tidak memiliki lahan untuk biopori, TPS3R menyediakan fasilitas biopori untuk umum yang berukuran cukup besar dengan diameter sekitar 1,5 meter. Penerapan sanksi juga diberlakukan bagi masyarakat yang tidak melakukan pemilahan, di mana sampah mereka tidak akan diangkut oleh petugas ke TPS3R. Tingkat partisipasi masyarakat dalam kegiatan pemilahan sampah tergolong cukup baik, meskipun belum mencapai 100%. Hal tersebut masih menjadi tantangan bagi TPS3R untuk meningkatkan keterlibatan aktif warga dalam pengurangan, pemilahan dan pengolahan sampah dari sumber.

Sampah organik seperti sisa makanan, daun, ranting, serbuk gergaji, kotoran hewan, dan sekam diolah menjadi kompos. Kompos yang telah siap digunakan dijual dengan harga sekitar Rp8.000 per kilogram. Namun, berdasarkan informasi saat wawancara tidak ada data penjualan kompos tersebut karena pada umumnya diberikan secara gratis kepada warga yang membutuhkan. TPS3R juga melakukan inovasi berupa budidaya tanaman air *azolla* sebagai bahan pakan ternak unggas yang ramah lingkungan dan tidak menimbulkan bau tak sedap. Permasalahan yang saat ini dihadapi oleh TPS3R adalah tingginya produksi limbah cangkang kerang, mencapai 25 kg per hari. Pengelola mengalami kesulitan untuk mengolah limbah tersebut karena belum adanya teknologi yang mereka miliki dan keterbatasan dana. Ke depan, pengelola TPS3R berencana mengembangkan produk pelet pakan ternak unggas sebagai bentuk diversifikasi hasil olahan sekaligus strategi untuk meningkatkan nilai ekonomi dan keberlanjutan operasional TPS3R.

Pengelolaan sampah anorganik (rongsokan) dilakukan dengan melakukan pemilahan sesuai dengan jenis sampah yang bisa dibeli oleh pengepul. Pemilahan sampah anorganik meliputi botol PET transparan, botol PET berwarna, kardus, gelas plastik berwarna dan cetak, gelas plastik bersih, kertas/buku, plastik campuran,

sepatu bekas, kemasan mie instan dan minyak, dan kantong plastik. Adapun jenis residu yang belum dapat diolah adalah popok dengan volume timbunan sekitar 25 kg/hari.

Pengelolaan TPS dilakukan oleh sepuluh orang pekerja dengan total waktu kerja enam jam per hari, yaitu empat jam pada pagi hari dengan upah Rp30.000 dan dua jam pada sore hari dengan upah Rp20.000. Sumber pendanaan operasional berasal dari iuran masyarakat serta dukungan dana desa yang berkisar antara Rp40–50 juta per tahun, ditambah pendapatan dari hasil penjualan rongsokan. Secara kelembagaan, TPS ini dikelola oleh Kelompok Swadaya Masyarakat (KSM) dengan struktur organisasi yang lengkap serta tenaga kerja yang memadai dan kompeten.

TPS3R Randuboto telah memiliki landasan kelembagaan yang kuat dengan legalitas yang lengkap, inovasi dalam pengolahan produk, serta cakupan pelayanan yang cukup luas. Meskipun demikian, masih terdapat sejumlah tantangan dalam operasionalnya, antara lain rendahnya proporsi sampah yang berhasil dikelola, sistem pencatatan yang belum berjalan optimal, serta volume residu yang relatif tinggi dan masih berakhir pada pembakaran atau pembuangan ke TPA. Di sisi lain, terdapat peluang besar untuk pengembangan lebih lanjut melalui peningkatan kapasitas pengolahan, penguatan edukasi pemilahan sampah kepada masyarakat, serta diversifikasi produk olahan guna memperluas sumber pendapatan dan mendukung keberlanjutan operasional TPS3R.

Analisis SWOT

Analisis SWOT diterapkan pada TPS3R Randuboto untuk memperoleh pemahaman mendalam mengenai kondisi aktual di lapangan serta menyusun penilaian yang obyektif sebagai dasar dalam perumusan strategi dan solusi atas permasalahan yang ada. Analisis IFAS pada Tabel 1 menunjukkan kekuatan dan kelemahan TPS3R Randuboto. Nilai kekuatan yang dimiliki adalah 1.84, nilai tersebut menunjukkan komitmen perangkat desa, pengelola TPS3R dan masyarakat dalam pengelolaan dan pengolahan sampah rumah tangga. Kelemahan yang dimiliki TPS3R Randuboto secara umum pada masalah administrasi, konsistensi Masyarakat, dan pendanaan operasional.

Analisis EFAS pada Tabel 2 menunjukkan peluang dan ancaman yang dihadapi. Peluang untuk kerjasama dengan akademisi dalam pengembangan teknologi dan dengan industri untuk bantuan pendanaan berupa CSR sangat besar. Ancaman terbesar yang dihadapi oleh TPS3R adalah ketergantungan pada pendanaan dari desa dan penurunan motivasi dan partisipasi Masyarakat. Nilai masing-masing peluang dan ancaman adalah 1.94 dan 1.41. Hasil perhitungan Posisi kekuatan (S-W) adalah 1.21 sedangkan posisi kompetitif (O-T) adalah 0.53. Hal tersebut menempatkan TPS3R Randuboto pada kuadran I (strategi agresif). TPS3R Randuboto memiliki kekuatan internal yang cukup besar dan peluang eksternal yang terbuka lebar.

Tabel 1. Analisis IFAS di TPS3R Randuboto

No	Faktor-Faktor Strategi Internal	Bobot	Rating	Bobot x rating
Kekuatan (Strength)				
1	Memiliki legalitas dan kelembagaan lengkap	0.05	3	0.15
2	Cakupan wilayah pelayanan luas (16 RT)	0.04	3	0.12
3	Pengangkutan sampah rutin setiap tiga hari sekali	0.05	4	0.2
4	Pengelolaan sampah residu sebagai energi	0.04	4	0.16
5	Jumlah tenaga kerja pengelolaan dan pengolahan sampah mencukupi	0.07	3	0.21
6	Inovasi peternakan unggas	0.05	4	0.2
7	Dukungan pemerintah desa baik secara administrasi maupun keuangan	0.05	4	0.2
8	Warga memilah sampah dari rumah sehingga sampah yang masuk TPS3R sudah terpilah	0.1	3	0.3
9	Komitmen warga dalam membayar iuran sampah baik	0.1	3	0.3
Total		0.55		1.84
Kelemahan (Weakness)				
1	Pencatatan sampah masuk dan keluar buruk (tidak konsisten)	0.05	1	0.05
2	Persentase pengelolaan dan pengolahan sampah rendah (<50%)	0.1	1	0.1
3	Ketergantungan pada pengepul sampah anorganik tinggi	0.05	3	0.15
4	Residu sampah popok yang tinggi dan sulit untuk diolah	0.04	3	0.12
	Ketergantungan pada kepatuhan masyarakat dalam memilah sampah	0.07	1	0.07
5	Tidak ada pencatatan keuangan dan pertumbuhan partisipasi masyarakat	0.07	1	0.07
6	Ketergantungan pada dana anggaran desa yang besar untuk pengelolaan TPS3R	0.07	1	0.07
Total		0.45		0.63

Tabel 2. Analisis EFAS di TPS3R Randuboto

No	Faktor-Faktor Strategi eksternal	Bobot	Rating	Bobot x rating
Peluang (Opportunity)				
1	Potensi kemitraan dengan UMKM, akademisi, dan komunitas untuk pemasaran produk olahan dan pemanfaatan teknologi	0.1	4	0.4

2	Pemanfaatan limbah cangkang kerang sebagai bahan baku pelet pakan ternak unggas	0.08	3	0.24
3	Peningkatan kapasitas pengolahan sampah	0.04	4	0.16
4	Peluang pendanaan dari program CSR	0.07	4	0.28
5	Menjadi pusat edukasi pengolahan sampah terpadu	0.07	3	0.21
6	Peningkatan kesadaran masyarakat akan pentingnya kesehatan lingkungan hidup di kawasan	0.05	3	0.15
7	Penurunan sampah residu yang dikirim ke TPA	0.05	2	0.1
8	Dukungan kebijakan pemerintah dari tingkat pusat hingga desa dalam pengelolaan TPS3R	0.1	4	0.4
Total		0.56		1.94
Ancaman (Threat)				
1	Timbulan sampah plastik terus meningkat	0.03	2	0.06
2	Harga jual rongsokan atau sampah anorganik fluktuatif	0.03	2	0.06
3	Sampah popok cukup banyak dan sulit untuk diolah	0.03	3	0.09
4	Penurunan motivasi warga dalam melakukan pemilahan dari rumah	0.05	2	0.1
	Ketergantungan pada dana bantuan desa	0.1	4	0.4
5	Penurunan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sampah	0.1	3	0.3
6	Perubahan pemimpin pada kebijakan yang ada	0.1	4	0.4
Total		0.44		1.41

Strategi Pengelolaan

Analisis matriks SWOT merekomendasikan TPS3R Randuboto untuk melakukan strategi agresif dengan memanfaatkan kekuatan internal organisasi untuk menangkap peluang eksternal. Beberapa strategi yang bisa diterapkan di TPS3R Randuboto untuk meningkatkan kinerja diantaranya:

1. Peningkatan kerjasama dengan akademisi untuk pemanfaatan teknologi yang tepat dalam mengolah berbagai jenis sampah, seperti teknologi pemanfaatan limbah cangkang kerang, digitalisasi pencatatan operasional dan keuangan, *branding* produk (kompos dan pakan ternak), serta teknologi pengolahan sampah residu.
2. Peningkatan kerjasama dengan perusahaan untuk akses pendanaan CSR baik berupa bantuan dana

maupun pengadaan peralatan dan teknologi pengolahan sampah.

3. Peningkatan kerjasama dengan UMKM untuk pemasaran produk olahan sampah seperti kompos dan pakan ternak.
4. Peningkatan kompetensi tenaga kerja dalam pengelolaan sampah organik dan anorganik untuk meningkatkan kapasitas pengelolaan sampah dan pengurangan residu.
5. Peningkatan kompetensi tenaga kerja dalam pencatatan sampah masuk dan keluar TPS3R untuk mendapatkan data akurat terkait pengelolaan sampah. Selain itu, juga diperlukan pencatatan keuangan yang baik dan transparan.
6. Peningkatan edukasi kepada masyarakat untuk selalu melakukan pemilahan sampah dari rumah dan mengolah sampah organik secara mandiri.
7. Pemberian penghargaan (*reward*) kepada masyarakat yang aktif dan konsisten dalam melakukan pemilahan sampah untuk meningkatkan motivasi.

Secara umum, TPS3R Randuboto memiliki kekuatan internal yang cukup tinggi. Namun demikian, masih terdapat sejumlah kelemahan, antara lain belum adanya sistem pencatatan yang teratur terkait volume sampah masuk dan keluar, produksi kompos, pengelolaan sampah terpilah (rongsokan), penjualan hasil olahan, serta penggunaan iuran masyarakat dan dana desa. Lemahnya administrasi pencatatan operasional tersebut berdampak pada kesulitan dalam melakukan perencanaan pengembangan dan menjaga keberlanjutan operasional TPS3R. Peningkatan administrasi pengelolaan dapat dilakukan melalui kerja sama dengan pihak akademisi dalam pembuatan sistem pencatatan yang disesuaikan dengan kebutuhan para pemangku kepentingan, seperti pekerja, pemerintah desa, dan Dinas Lingkungan Hidup (DLH). Digitalisasi sistem pencatatan menjadi salah satu opsi yang relevan untuk memudahkan proses pencatatan, pelaporan, dan penyimpanan data. Sistem ini juga perlu didokumentasikan dalam bentuk Standar Operasional Prosedur (SOP) yang selanjutnya disosialisasikan kepada seluruh pekerja.

Selain kerja sama dalam pengembangan sistem digitalisasi pencatatan operasional, bentuk kolaborasi lain yang dapat dilakukan bersama akademisi adalah penelitian mengenai pengelolaan limbah cangkang kerang, yang hingga saat ini masih menjadi salah satu permasalahan utama di TPS3R Randuboto. Salah satu teknologi yang berpotensi diterapkan untuk mengurangi limbah tersebut adalah pengolahan cangkang kerang menjadi bahan campuran pakan ternak. Tepung cangkang kerang tidak hanya mengandung kalsium, tetapi juga mengandung unsur penting lain seperti protein dan fosfor yang berperan dalam proses pertumbuhan, perkembangan, serta reproduksi hewan ternak. Kandungan protein dalam tepung kerang berkisar antara 2–3%, sedangkan kadar kalsiumnya mencapai 30–40% (Mahary, 2017). Penambahan tepung cangkang kerang jenis simping pada komposisi tertentu dapat meningkatkan kualitas telur ayam Lohman (kuning telur dan berat kerabang telur) (Supartini, Santoso, Bahrin, & Nurul, 2022). Pada

penelitian lain menunjukkan potensi tepung cangkang kerang hijau sebagai campuran (50%) pada benih ikan lele Sangkuriang mampu meningkatkan laju pertumbuhan (Haq, et al., 2023). Produksi pakan ternak berbasis limbah cangkang kerang tersebut perlu dikaji lebih lanjut dari segi kualitas, kandungan nutrisi, dan kelayakan teknis, agar dapat memberikan nilai tambah ekonomi sekaligus berkontribusi terhadap keberlanjutan operasional TPS3R Randuboto.

Kesimpulan

Analisis SWOT terhadap TPS3R Randuboto menunjukkan bahwa TPS3R tersebut telah memiliki dasar kelembagaan yang solid, aspek legal formal yang lengkap, dan dukungan pemerintah desa serta masyarakat. Namun demikian, terdapat beberapa kelemahan yang perlu segera diperbaiki, antara lain belum adanya sistem pencatatan operasional dan keuangan yang teratur, ketergantungan pada dana desa, serta pengelolaan residu dan limbah cangkang kerang yang belum optimal. Peluang kerja sama dengan akademisi dan industri untuk mengatasi kelemahan-kelemahan tersebut perlu untuk segera direalisasikan guna mendukung keberlanjutan TPS3R Randuboto. Secara umum, keberhasilan TPS3R Randuboto akan sangat bergantung pada peningkatan kapasitas sumber daya manusia, sistem administrasi, serta kemampuan mengembangkan inovasi produk yang bernilai ekonomi tinggi seperti kompos dan pakan ternak berbasis limbah organik cangkang kerang.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih ditujukan kepada Universitas Internasional Semen Indonesia (UISI), Pemerintah Kab. Gresik, BAPPEDA Gresik, PII Cabang Kab. Gresik, dan pemerintah Desa Randuboto atas segala dukungan moral dan material pada penelitian ini.

Referensi

- A'fia, K., & Purnama, P. H. (2024). Preparation of sustainability instruments for community-based solid waste management programs: A case study of TPS3R in Sleman Regency, Yogyakarta. *Applied Research in Science and Technology*, 4(2), 77–89.
- Bariyah, T., Muftahurrohman, B., & Faria, N. (2025). Analysis of contributing factors and prediction of urban waste generation using PSO-ANN. *SISFOKOM (Sistem Informasi dan Komputer)*, 510–516.
- Damiti, R. A., Lihawa, F., & Baderan, D. W. (2024). Peranan pemerintah daerah dalam keberlanjutan TPS3R di Provinsi Gorontalo. *Journal of Creative Student Research*, 225–237.
- Desa Randuboto. (2025, November 5). *Data wilayah Desa Randuboto*.
<https://desaranduboto.gresikkab.go.id/data-wilayah>
- Direktorat Jenderal Cipta Karya. (2017). *Petunjuk teknis TPS3R*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.



- Dinas Kependudukan dan Pencatatan Sipil Kabupaten Gresik. (2024). *Data kependudukan Kabupaten Gresik semester II 2024*. Gresik: Disdukcapil.
- Fandira, W., Solistiyowati, M., & Sibuea, T. (2023). Circular economy: Strategi utama dukung sustainable development goals (SDGs) guna mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan. *Prosiding Seminar Nasional Ekonomi dan Perpajakan*, 3(1).
- Haq, H., Sutarjo, E. P., Nugraha, E. H., Pratama, A. R., Novianti, T., & Ekawati, N. (2023). Pemanfaatan ekstrak cangkang kerang hijau (*Perna viridis* Linnaeus) sebagai pakan alternatif benih ikan lele sangkuriang (*Clarias gariepinus*). *Jurnal Tropika Bahari*, 21–30.
- Haque, M. G., Yasir, M., Suradji, R., & Istianingsih. (2024). Benefit of SWOT analysis in marketing strategy for sustainable business management. *Return: Study of Management, Economic and Business*, 3(4), 190–195.
- Ilmi, M. B., & Syaifuddin, A. (2025). Analisis faktor-faktor yang mempengaruhi jumlah timbulan sampah di Provinsi Jawa Timur menggunakan metode multiple linear regression. *Submit: Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi dan Sains*, 22–28.
- Mahary, A. (2017). Pemanfaatan tepung cangkang kerang darah (*Anadara granosa*) sebagai sumber kalsium pada pakan ikan lele (*Clarias batrachus*). *Acta Aquatica*, 63–67.
- Masfardian, R. (2025, April 17). DLH Gresik berencana bangun landfill mining atasi tumpukan sampah di TPA Ngipik. *Radar Gresik*.
<https://radargresik.jawapos.com/politik-pemerintahan/835892688/dlh-gresik-berencana-bangun-landfill-mining-atasi-tumpukan-sampah-di-tpa-ngipik>
- Otivriyanti, G., Tilottama, R. D., Meilani, S. S., & Fani, A. M. (2023). Kajian strategi pengurangan sampah dan potensi penerapan ekonomi sirkuler pada pengelolaan sampah di Kabupaten Toba Sumatera Utara. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 24(2), 220–227.
- Puspita, A. P., Sitio, R. P., & Fitriyani, R. (2023). Perancangan sistem manajemen berbasis ekonomi sirkuler pada kegiatan usaha pengelolaan sampah terintegrasi. *Dedikasi*, 2(2).
- Rangkuti, F. (2006). *Analisis SWOT: Teknik membedah kasus bisnis*. Jakarta: PT Ikrar Mandiriabadi.
- Sasongko, S. H. (2022). *DLHKP Kabupaten Kebumen*.
https://dlhkp.kebumenkab.go.id/index.php/web/view_file/154
- SIPSN. (2025, October 27). *Sistem informasi pengelolaan sampah nasional*.
<https://sipsn.kemenvh.go.id/sipsn/public/data/komposisi>
- Supartini, N., Santoso, E. P., Bahrin, S., & Nurul, M. (2022). Pengaruh jenis dan level tepung cangkang kerang simping dan kerang hijau dalam pakan terhadap performa produksi telur ayam Lohman. *Jurnal Buana Sains*, 57–64.



Pemanfaatan Gas CO₂ Sebagai Bahan Baku Dalam Produksi PCC (*Precipitated Calcium Carbonate*): Solusi Industri terhadap Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca

Pri Wahyu¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ pri_wahyu90@gmail.com

Pendahuluan

Pemanasan global dan perubahan iklim telah menjadi isu lingkungan paling mendesak dalam dua dekade terakhir. Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca, terutama karbon dioksida (CO₂), di atmosfer sebagian besar disebabkan oleh aktivitas antropogenik seperti pembakaran bahan bakar fosil, proses industri, dan deforestasi (IPCC, 2021). Akumulasi CO₂ di atmosfer memberikan dampak luas, mulai dari kenaikan suhu global, pencairan es di kawasan kutub, peningkatan frekuensi bencana hidrometeorologi, hingga terganggunya sistem ekologi dan kesehatan manusia secara global (NASA, 2023).

Dalam menghadapi tantangan tersebut, sektor industri dituntut untuk melakukan transformasi menuju praktik operasi yang lebih berkelanjutan dan rendah karbon. Salah satu sektor yang memiliki potensi besar dalam mendukung mitigasi emisi CO₂ adalah industri kimia, khususnya pabrik penghasil *Precipitated Calcium Carbonate* (PCC). PCC merupakan bentuk kalsium karbonat sintetis yang diproduksi melalui reaksi antara larutan kalsium hidroksida (Ca(OH)₂) dengan gas CO₂, menghasilkan endapan CaCO₃ yang digunakan secara luas pada berbagai industri seperti kertas, plastik, cat, makanan, dan farmasi (Chen et al, 2020).

Selain berfungsi sebagai produk bernilai ekonomi tinggi, proses produksi PCC juga menjadi salah satu contoh nyata penerapan *teknologi Carbon Capture and Utilization* (CCU) (Mac Dowell et al, 2017). Proses ini memanfaatkan CO₂ industri sebagai bahan baku dalam reaksi karbonasi, sehingga memberikan kontribusi langsung pada pengurangan emisi sekaligus menghasilkan produk bernilai tambah (Sanna, Dri, & Maroto-Valer, 2014). Dengan demikian, PCC Plant memiliki peran strategis dalam mendukung transisi menuju industri yang lebih berkelanjutan.

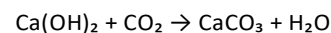
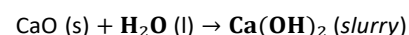
Lebih jauh dari itu, proses produksi PCC memiliki keterkaitan erat dengan prinsip *sustainability*. Konsep

Pemanasan global akibat peningkatan emisi karbon dioksida (CO₂) telah menjadi tantangan utama bagi dunia industri. Upaya mitigasi diperlukan agar kegiatan produksi tidak hanya berorientasi pada keuntungan, tetapi juga keberlanjutan lingkungan. Salah satu pendekatan yang mulai dikembangkan adalah pemanfaatan CO₂ sebagai bahan baku dalam produksi *Precipitated Calcium Carbonate* (PCC). Proses ini mengubah gas buang CO₂ menjadi kalsium karbonat sintetis bernilai tinggi melalui reaksi kimia dengan kalsium hidroksida [Ca(OH)₂]. Artikel ini membahas prinsip dasar proses karbonasi, sumber dan mekanisme pemanfaatan CO₂, serta kontribusinya terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca. Selain itu, dibahas pula peran insinyur dalam merancang sistem yang aman, efisien, dan berkelanjutan. Hasil analisis menunjukkan bahwa setiap ton PCC dapat menyerap sekitar 0,44 ton CO₂, menjadikan teknologi ini sebagai contoh nyata penerapan *green engineering* dan ekonomi sirkular di industri kimia.

Kata kunci: CO₂, PCC, Karbonasi, *Green Engineering*, Emisi Gas Rumah Kaca

pembangunan berkelanjutan menekankan keseimbangan antara aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial. Dari sisi lingkungan (*environmental sustainability*), pemanfaatan CO₂ sebagai bahan baku mendukung upaya dekarbonisasi industri melalui penurunan emisi langsung ke atmosfer. Dari sisi ekonomi (*economic sustainability*), penerapan teknologi CCU memberikan peluang penciptaan nilai tambah, efisiensi pemanfaatan sumber daya, dan pengembangan produk bernilai tinggi. Sementara itu, dari sisi sosial (*social sustainability*), penerapan proses yang lebih bersih mendukung peningkatan keselamatan kerja, menjaga kesehatan pekerja, dan membangun citra industri yang lebih bertanggung jawab terhadap lingkungan. Dengan demikian, PCC Plant tidak hanya berperan dalam proses produksi, tetapi juga menjadi bagian integral dalam agenda pembangunan industri yang berkelanjutan.

Reaksi kimia utama dalam produksi PCC adalah sebagai berikut:



Proses produksi *Precipitated Calcium Carbonate* (PCC) memanfaatkan karbon dioksida (CO₂) sebagai bahan baku utama, bukan sebagai limbah, sehingga secara langsung membantu mengurangi konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Pendekatan ini menempatkan produksi PCC sebagai salah satu contoh penerapan teknologi *Carbon Capture and Utilization* (CCU), yaitu strategi yang tidak hanya menangkap CO₂ dari sumber emisi industri tetapi juga memanfaatkannya kembali untuk menghasilkan produk bernilai tambah (Zimmermann & Schomäcker, 2017).

Secara strategis, integrasi pemanfaatan CO₂ dalam proses produksi PCC memberikan beberapa manfaat lingkungan dan ekonomi yang signifikan:

- Dengan memanfaatkan CO₂ dari proses pembakaran batu kapur atau sumber emisi lainnya, industri PCC

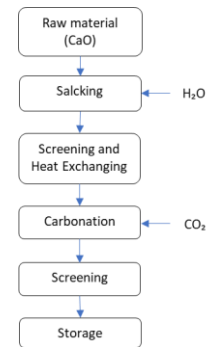
- dapat berkontribusi pada penurunan emisi bersih secara langsung. Hal ini sejalan dengan praktik mitigasi berbasis teknologi dalam sektor industri berbasis mineral (IEA, 2020).
- Efisiensi Proses dan Ekonomi Sirkular: Pemanfaatan CO₂ sebagai bahan baku memperkuat prinsip ekonomi sirkular, di mana aliran limbah karbon diolah kembali menjadi produk yang memiliki nilai ekonomi. Konsep ini semakin diadopsi sebagai kerangka industri berkelanjutan (Geissdoerfer et al, 2017).
 - Dukungan terhadap Target *Net Zero*: Implementasi teknologi CCU di industri PCC mendukung komitmen nasional dan global dalam mencapai target emisi nol bersih (*net zero*) pada pertengahan abad ini. CCU diidentifikasi sebagai salah satu solusi transisi yang relevan dalam sektor industri berat yang sulit diturunkan emisinya (IPCC, 2022).
 - Potensi Integrasi dengan Teknologi Hijau: Produksi PCC dapat ditingkatkan efisiensinya melalui integrasi dengan energi terbarukan, sistem otomatisasi proses, serta pemantauan emisi berbasis digital, yang memungkinkan peningkatan akurasi dan pengendalian proses (Tan et al, 2021).

Dengan demikian, industri PCC tidak hanya berperan sebagai produsen bahan kimia, tetapi juga sebagai agen perubahan dalam transisi menuju masa depan yang lebih hijau dan berkelanjutan. Artikel ini akan mengulas lebih lanjut bagaimana proses produksi PCC dapat dioptimalkan sebagai bagian dari strategi mitigasi emisi CO₂, serta tantangan dan peluang yang menyertainya dalam konteks industri modern. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih jelas tentang peran PCC sebagai solusi berbasis teknologi dalam mendukung transisi menuju ekonomi rendah karbon.

Metode

Metode yang digunakan dalam kegiatan ini meliputi pengamatan langsung terhadap proses produksi PCC di PT Esensindo Cipta Cemerlang (ECC–Riaupaper), pengumpulan data operasional, serta analisis efisiensi pemanfaatan gas CO₂ dari unit kiln menuju karbonator. Fokus utama kajian ini adalah menilai bagaimana gas CO₂ dimanfaatkan dalam proses pembentukan endapan CaCO₃ (PCC) serta seberapa efektif pemanfaatannya terhadap hasil dan stabilitas proses produksi.

Data yang dianalisis mencakup tekanan dan laju alir CO₂, konsentrasi gas, volume serta pH *slurry*, dan karakteristik produk akhir. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil aktual terhadap standar operasi perusahaan dan acuan teknis industri.



Gambar 1. Proses Flow Pembuatan Filler PCC

Hasil Kerja

1. Kondisi Aktual Proses di PCC Plant

Pengamatan dilakukan pada dua tahap utama yaitu hidrasi di slaker dan karbonasi di karbonator. Secara umum, proses hidrasi menunjukkan performa yang stabil pada suhu puncak 90°C dan konsentrasi *slurry* 19,5% solids. Namun demikian, kemurnian CaO yang berada pada kisaran 89–90% menyebabkan jumlah Ca(OH)₂ aktif sedikit berada di bawah target, sehingga mempengaruhi kebutuhan CO₂ pada tahap berikutnya. Pada proses karbonasi, PCC yang dihasilkan memiliki *brightness* tinggi (95–96%), namun efektivitas pemanfaatan CO₂ masih rendah akibat konsentrasi CO₂ yang hanya 15,5% dan ketidakefektifan kontak gas *slurry*. Kondisi ini berkontribusi pada variasi ukuran partikel PCC dan efisiensi karbonasi yang belum optimal.

Kemurnian CaO yang berada pada kisaran 89–90% menunjukkan bahwa material bahan baku masih memenuhi spesifikasi minimum operasi, meskipun berada pada batas bawah standar. Kondisi ini berpotensi menurunkan *yield* pembentukan Ca(OH)₂ karena fraksi inert yang lebih tinggi tidak berkontribusi terhadap reaksi hidrasi. Konsekuensinya, kebutuhan konsumsi CaO per satuan produk akan meningkat untuk mencapai jumlah Ca(OH)₂ yang sama. Oleh karena itu, kontrol terhadap kemurnian CaO menjadi penting untuk menjaga efisiensi penggunaan bahan baku serta stabilitas proses di tahap *slaking* maupun karbonasi. Nilai *reactivity* (30s) 20–30 °C tergolong reaktivitas tinggi dan ideal untuk PCC. Dampaknya adalah proses hidrasi berlangsung cepat, efisiensi penggunaan CaO meningkat, serta stabilitas operasional slaker lebih mudah dicapai.

Tabel 1. Kondisi Operasi Slaker

Parameter	Nilai Aktual	Keterangan
Kemurnian CaO	89–90%	Mendekati batas minimal spesifikasi
Suhu air <i>make-up</i>	55°C	Sesuai standar hidrasi
Suhu puncak hidrasi	±90°C	Reaksi eksotermis berjalan baik
% Solids <i>slurry</i>	19,5%	Stabil dan homogen
<i>Lime reactivity</i>	30 detik (20–30°C)	Reaktivitas tinggi

2. Analisis Efektivitas Pemanfaatan CO₂ di Carbonator

Parameter operasi pada carbonator menunjukkan kondisi proses yang umumnya mendukung pembentukan CaCO₃ berkualitas baik, namun terdapat indikasi ketidakefisienan pemanfaatan CO₂ yang perlu perhatian. Analisis detail tiap parameter adalah sebagai berikut. Meski laju gas total masuk relatif tinggi, perhitungan menunjukkan ketersediaan CO₂ murni per hari sekitar 174.6 ton/day (pada fraksi CO₂ 16,5% dan densitas 1,977 kg/Nm³). Nilai ini termasuk besar dalam ukuran pabrik PCC, namun tidak otomatis menjamin efisiensi karbonasi. Keterangan “tinggi, namun tidak efisien terserap” konsisten dengan kemungkinan adanya gas *bypass*, *bubble blow-through*, atau transfer massa yang belum optimal. Oleh karena itu, meskipun suplai CO₂ substansial, aspek kontak gas-cair (*bubble size*, *sparger design*, agitasi) dan *residence time* lebih menentukan seberapa banyak CO₂ yang benar-benar bereaksi.

Perhitungan Masa CO₂ yang tersedia
= 22,300 x 0,165 x 1.977 = 7.274 kg/h = 174.6 ton/hari

Konsentrasi CO₂ 16,5% (relatif rendah), fraksi CO₂ sebesar 16,5% tergolong rendah sehingga tekanan parsial CO₂ di fase gas menjadi kecil. Tekanan parsial ini sangat menentukan *driving force* perpindahan massa dari gas ke cair. Semakin rendah tekanan parsial CO₂, semakin kecil gaya pendorong CO₂ untuk larut ke dalam *slurry*. Akibatnya, laju absorpsi CO₂ per unit volume gas menjadi lebih rendah, karena setiap liter gas mengandung jumlah CO₂ yang lebih sedikit. Untuk mencapai tingkat konversi atau derajat karbonasi yang sama, sistem harus:

- Menginjeksikan gas dalam jumlah lebih besar, atau
- Meningkatkan efektivitas kontak gas-cair (misalnya melalui agitasi lebih kuat, ukuran *bubble* diperkecil, atau waktu tinggal ditingkatkan).

Dengan kata lain, konsentrasi CO₂ yang rendah membuat proses karbonasi menjadi kurang efisien, karena sistem membutuhkan upaya tambahan agar jumlah CO₂ yang terlarut tetap memenuhi kebutuhan reaksi.

Penurunan pH dari 12 ke rentang 7,8–8,0 menunjukkan reaksi karbonasi berjalan hingga mendekati titik ekuivalen Ca(OH)₂ → CaCO₃ di zona-zona reaktor yang bereaksi. pH akhir dalam kisaran ini umumnya dianggap indikatif bahwa sebagian besar Ca(OH)₂ telah dikonversi pada area reaktor yang terpapar gas. Namun pH rata-rata tidak selalu mencerminkan homogenitas reaksi masih mungkin terdapat zona *under-reacted* akibat distribusi gas atau heterogenitas *slurry*.

Konsistensi solids pada 19,5% merupakan kondisi operasional yang baik untuk menjaga rheologi *slurry* sehingga transfer massa dan distribusi partikel relatif stabil. Nilai ini mendukung pembentukan PCC dengan kontrol ukuran partikel yang memadai, selama sistem pengadukan dan *sparging* mampu mendistribusikan gas merata. *Brightness* tinggi menunjukkan bahwa kristalisasi dan komposisi kimia produk sudah memenuhi kriteria optik. Ini menandakan proses *nucleation/growth* cukup terkontrol (*nucleation* dominan yang menghasilkan butir halus dan putih). Namun, *brightness* yang baik tidak bertentangan dengan rendahnya efisiensi CO₂, hal itu menunjukkan

kualitas produk bukan masalah utama; masalahnya adalah kuantitas CO₂ yang bereaksi dan/atau konsistensi ukuran partikel.

Tabel 2. Kondisi Operasi Karbonator

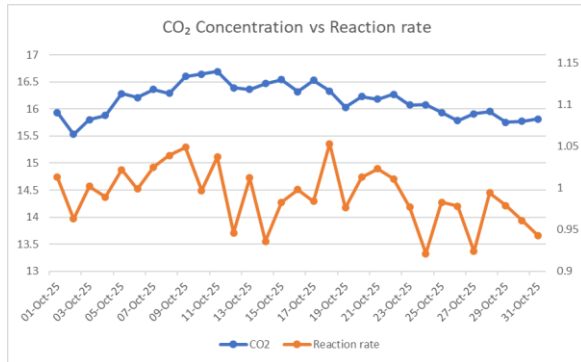
Parameter	Nilai Aktual	Keterangan
Laju CO ₂	22,358 Nm ³ /h	Tinggi, namun tidak efisien terserap
Konsentrasi CO ₂	16,5%	Rendah, menurunkan driving force reaksi
pH awal	12,0	Normal untuk <i>slurry</i> Ca(OH) ₂
pH akhir	7,8–8,0	Titik akhir karbonasi
% solids <i>slurry</i> akhir	19,5%	Konsisten
<i>Brightness</i> PCC	95–96%	Kualitas visual sangat baik

3. Analisis Hubungan Konsentrasi CO₂ terhadap Reaction Rate pada Proses Karbonasi CaCO₃

Selama bulan Oktober 2025, konsentrasi CO₂ pada proses karbonasi menunjukkan fluktuasi pada rentang 15,5–16,6%, sedangkan *reaction rate* berada pada kisaran 0,93–1,07. Secara umum, kedua parameter ini tidak selalu bergerak searah, namun terdapat beberapa pola yang dapat diamati dari data harian. Pada awal hingga pertengahan bulan, khususnya pada tanggal 5–12 Oktober, konsentrasi CO₂ mengalami peningkatan yang cukup konsisten. Kenaikan ini diikuti oleh peningkatan *reaction rate*, yang menunjukkan bahwa pada periode tersebut perubahan CO₂ memberikan pengaruh positif terhadap laju reaksi. Hal ini mengindikasikan bahwa ketika konsentrasi CO₂ meningkat, proses karbonasi mendapat dorongan yang lebih kuat sehingga *reaction rate* ikut membaik dan proses karbonasi berjalan lebih cepat. Semakin cepat proses karbonasi maka jumlah produksi harian akan meningkat.

Memasuki pertengahan bulan, pola berbeda terlihat. Meskipun konsentrasi CO₂ relatif stabil pada kisaran 16,2–16,5%, *reaction rate* justru mengalami fluktuasi yang cukup besar. Pada periode ini, karakter pergerakan *reaction rate* tidak mengikuti stabilitas CO₂, yang menunjukkan bahwa variabel proses lain memiliki pengaruh yang lebih dominan. Faktor seperti aliran gas, performa *mixing*, temperatur, dan komposisi *slurry* kemungkinan besar berperan dalam menciptakan variasi *reaction rate* tersebut. Pada akhir bulan, konsentrasi CO₂ mulai menurun secara bertahap menuju kisaran 15,8% dan penurunan ini diikuti oleh penurunan *reaction rate*. Pola ini kembali menunjukkan kecenderungan hubungan positif, di mana ketika CO₂ turun, *reaction rate* ikut menurun.

Secara keseluruhan, hubungan antara konsentrasi CO₂ dan *reaction rate* bersifat positif tetapi tidak terjadi secara konsisten sepanjang bulan. Ada kondisi tertentu di mana perubahan CO₂ berpengaruh langsung terhadap laju reaksi, namun ada pula periode di mana *reaction rate* lebih dipengaruhi oleh parameter operasi lainnya. Narasi ini menggambarkan pola umum yang kemudian didukung oleh data yang ditampilkan oleh gambar berikut:



Gambar 2. Hubungan Konsentrasi Gas CO₂ dengan Laju Reaksi

4. Efisiensi Penggunaan dan Pemanfaatan Gas CO₂

Efisiensi penggunaan CO₂ (*CO₂ utilization efficiency*) didefinisikan sebagai bagian (fraksi atau persen) dari CO₂ yang masuk ke sistem yang benar-benar bereaksi membentuk CaCO₃. Tujuan pengukuran adalah menilai seberapa efektif gas yang *disupply* digunakan untuk reaksi karbonasi (nilai ekonomi dan lingkungan), sekaligus mendeteksi kebocoran proses/ *bypass gas* atau kebutuhan penyesuaian operasi. Secara matematis:

$$\eta_{CO_2} = \frac{\text{CO}_2 \text{ yang bereaksi (mass)}}{\text{CO}_2 \text{ yang masuk (mass)}} \times 100\%$$

Berdasarkan stoikiometri reaksi $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$, setiap 1 ton CaCO₃ yang terbentuk memerlukan sekitar 0,44 ton CO₂. Dengan ketersediaan CO₂ harian sebesar 174,6 ton, maka kapasitas produksi teoritis maksimum adalah:

$$\text{Produksi teoretis} = 174.6 / 0,44 = 396 \text{ ton CaCO}_3/\text{hari}$$

Pada kondisi aktual pengamatan, produksi PCC yang dicapai adalah 384 ton per hari. Dengan demikian, efisiensi pemanfaatan CO₂ dapat dihitung sebagai berikut:

$$\eta = 384 / 396 \times 100\% = 96,97\%$$

Nilai efisiensi ini tergolong tinggi untuk proses karbonasi PCC industri, mengingat efisiensi tipikal penggunaan CO₂ pada pabrik PCC umumnya berada pada kisaran 90–97%, tergantung desain reaktor, kualitas distribusi gas-cair, dan kondisi operasional. Dengan demikian, tingkat efisiensi 96,97% menunjukkan bahwa proses penyerapan CO₂ dan konversi Ca(OH)₂ berjalan sangat efektif.

5. Jumlah CO₂ yang Terserap Berdasarkan Perhitungan Efisiensi

Dalam konteks operasional pabrik PCC, pemantauan kuantitatif terhadap volume produksi dan jumlah CO₂ yang terserap menjadi indikator penting untuk menilai efektivitas proses CCU yang diterapkan. Data produksi bulanan yang dikumpulkan selama periode Januari hingga Oktober menunjukkan bahwa pabrik secara konsisten menyerap CO₂ dalam jumlah signifikan, dengan rasio penyerapan yang stabil dan mendekati

nilai teoritis. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem produksi telah dioptimalkan tidak hanya untuk output produk, tetapi juga untuk kontribusi terhadap pengurangan emisi karbon.

Lebih jauh, pemanfaatan CO₂ dari sumber internal pabrik, seperti hasil pembakaran bahan bakar fosil pada kiln menjadikan proses ini sebagai bentuk *in-situ carbon recycling*, yang mengurangi kebutuhan pelepasan CO₂ ke atmosfer dan memperkuat integrasi antara efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan. Dengan kata lain, produksi PCC tidak hanya menghasilkan produk bernilai ekonomi tinggi, tetapi juga berfungsi sebagai mekanisme penyerapan karbon yang terukur dan dapat dilaporkan dalam kerangka audit lingkungan, pelaporan keberlanjutan, maupun strategi menuju netralitas karbon (*net zero*).

Berikut ini adalah data yang menjelaskan jumlah produksi PCC selama satu tahun dan nilai teoritis CO₂ yang terserap dan dimanfaatkan oleh proses produksi PCC.

Tabel 3. Pemanfaatan Gas CO₂ Periode Januari–Oktober 2025

	Produksi (ton)	CO ₂ terserap (ton)
Jan	11964	5419.69
Feb	11024	4993.87
Mar	12487	5656.61
Apr	13562	6143.59
May	13733	6221.05
Jun	12233	5541.55
Jul	13386	6063.86
Aug	12577	5697.38
Sep	10238	4637.81
Oct	12604	5709.61

Kesimpulan

Secara keseluruhan, proses pemanfaatan CO₂ di PCC Plant telah berjalan dengan baik, ditunjukkan oleh efisiensi penyerapan yang mencapai 96,97%. Kinerja ini menegaskan bahwa PCC merupakan salah satu bentuk penerapan teknologi *Carbon Capture and Utilization* (CCU) yang sudah efektif di lingkungan industri. Selama periode pengumpulan data Januari–Oktober 2025, PCC Plant berhasil menyerap total 56,085 ton CO₂, suatu capaian yang menunjukkan kontribusi signifikan terhadap pengurangan emisi.

Dalam kaitannya dengan laju reaksi, konsentrasi CO₂ menunjukkan hubungan yang positif terhadap peningkatan *reaction rate*, meskipun tidak selalu bersifat linear. Hal ini menandakan bahwa CO₂ memiliki peran penting dalam mendorong proses karbonasi, namun variabel operasi lain tetap memberikan pengaruh yang substansial terhadap hasil akhir proses.

Ucapan Terimakasih

Dalam penyelesaian artikel ini penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:



1. Dr. Ir. Lusya P. S. Hartanti, S.T., M.Eng., CIOMP., IPM., ASEAN Eng. selaku dosen pembimbing
2. Janso Hasudungan Silaban ST, MM selaku atasan
3. Semua pihak yang sudah yang sudah berpartisipasi dalam penulisan artikel ini.

Referensi

- Chen, T., Chang, J., & Wu, C. (2020). Carbonation reactions and the production of precipitated calcium carbonate: Industrial practices and environmental implications. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120–134.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy: A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
- International Energy Agency. (2020). *Energy technology perspectives 2020: Special report on carbon capture utilisation and storage*. IEA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. IPCC.
- Mac Dowell, N., Fennell, P. S., Shah, N., & Maitland, G. C. (2017). The role of CO₂ capture and utilization in mitigating climate change. *Nature Climate Change*, 7(4), 243–249.
- National Aeronautics and Space Administration. (2023). *Climate change: How do we know?*
- Sanna, A., Dri, M., & Maroto-Valer, M. (2014). Carbon capture and utilization (CCU) in the mineral industry: CO₂ mineralization for sustainable production. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 1–8.
- Tan, Y., Li, H., & Wang, J. (2021). Digitalization and decarbonization in process industries: Opportunities and challenges. *Journal of Industrial Ecology*, 25(6), 1415–1429.
- Zimmermann, A. W., & Schomäcker, R. (2017). Assessing economic and environmental aspects of carbon utilization pathways: A comparative evaluation framework. *ChemSusChem*, 10(1), 56–70.

Analisis Penambahan 1 Unit Vacuum Pump Cadangan untuk Mendukung Overhaul Bergiliran pada Paper Machine 2

Andi Friandi¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ andrew_sby@ukwms.ac.id

Pendahuluan

Sistem *vacuum pump* pada *paper machine* memiliki peranan penting dalam proses *dewatering*, stabilitas lembaran kertas, serta efisiensi energi. Dalam banyak *paper mill*, sistem ini terdiri dari beberapa unit *liquid ring vacuum pump* yang bekerja secara paralel untuk menghasilkan tingkat vakum yang sesuai dengan kebutuhan *forming*, *press*, dan *pickup section*. Namun, tantangan umum yang sering dihadapi adalah bagaimana melakukan kegiatan *overhaul* atau perawatan besar terhadap *vacuum pump* tanpa menghentikan operasi produksi. Kondisi ini menjadi semakin kompleks ketika seluruh unit pompa digunakan secara bersamaan tanpa adanya unit cadangan.

Metode

Metode yang digunakan adalah analisis keandalan sistem (*system reliability analysis*) berbasis probabilitas. Pendekatan ini umum digunakan untuk sistem paralel di industri proses.

Rumus dasar:

$$A = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

Hasil Kerja

Keandalan Sistem

Ketersediaan tiap unit *vacuum pump* dapat dihitung dengan rumus:

$$A = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

Dengan nilai MTBF = 2.000 jam dan MTTR = 200 jam, maka:

$$A = 2000 / (2000 + 200) = 0,9091$$

Tanpa Cadangan (5 Unit)

Probabilitas seluruh 5 unit berfungsi:

$$P = A^5 = 0,9091^5 = 0,6209$$

Artikel ini membahas analisis penambahan satu unit cadangan *vacuum pump* pada sistem *vacuum* di industri kertas. Tujuan utama dari studi ini adalah menjaga keberlangsungan operasi saat kegiatan *overhaul* dilakukan secara bergiliran terhadap lima unit *vacuum pump* yang ada. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan keandalan sistem berbasis probabilitas dengan mempertimbangkan parameter MTBF dan MTTR. Hasil menunjukkan peningkatan ketersediaan sistem dari 62% menjadi 90%, serta memungkinkan proses perawatan dilakukan tanpa menghentikan operasi produksi.

Kata kunci: *Vacuum Pump*, *Overhaul*, Keandalan Sistem, MTBF, MTTR

Artinya, hanya sekitar 62% kemungkinan sistem memiliki kapasitas penuh setiap saat.

Dengan 1 Unit Cadangan (6 Unit)

Probabilitas minimal 5 unit berfungsi:

$$P = \binom{6}{5} A^5 (1 - A) + A^6$$
$$P = 6(0,9091)^5 (0,0909) + (0,9091)^6 = 0,9032$$

Artinya, ketersediaan sistem meningkat menjadi sekitar 90%.

Dampak Operasional

Dengan penambahan satu unit cadangan:

- *Overhaul* bergiliran dapat dilakukan tanpa menghentikan produksi.
- *Downtime* sistem *vacuum* menurun drastis.
- Keandalan operasional meningkat $\pm 45\%$ (dari 62% ke 90%).
- Efisiensi energi dan stabilitas *sheet formation* lebih terjaga.
- Jadwal perawatan dapat direncanakan tanpa tekanan waktu.

Analisis Ekonomi

Komponen	Tanpa Cadangan	Dengan Cadangan
<i>Downtime</i> / tahun	5–8 hari	<1 hari
Kehilangan produksi	±Rp 500–800 juta/tahun	±Rp 50–100 juta/tahun
Biaya investasi 1 unit	±Rp 700–900 juta	—
<i>Payback period</i>	—	±1–1,5 tahun

Kesimpulan

Penambahan satu unit cadangan *vacuum pump* terbukti memberikan manfaat strategis dalam hal:

- Meningkatkan keandalan sistem *vacuum* dari 62% menjadi 90%.
- Memungkinkan pelaksanaan *overhaul* bergiliran tanpa menghentikan operasi.
- Mengurangi kerugian akibat *downtime* dan meningkatkan stabilitas proses produksi.



Dengan demikian, investasi penambahan satu unit cadangan *vacuum pump* layak dipertimbangkan sebagai bagian dari strategi *maintenance reliability* pada *paper mill*.

Ucapan Terimakasih

Terimakasih yang sebesar-besarnya kami haturkan kepada :

1. Dosen Pembimbing Ibu Ir. Lusya Permata Sari Hartanti, S.T., M.Eng., CIOMP., IPM., ASEAN Eng.
2. Kepala Prodi UKWMS Bapak Dr. Ir. Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng.
3. Rekan sejawat yang sama-sama berjuang menyelesaikan program keinsinyuran ini.
4. Management PT. Riau Andalan Pulp & Paper Pangkalan Kerinci Mill
5. Anggota keluarga besar saya dan Mas Heri yang meminjamkan saya laptopnya.

Referensi

- Elshoubary, E., & Radwan, T. (2024). Analyzing the reliability of a pumping system through the application of copula analysis. *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*, 2024, Article ID 9559221, 15 pages. <https://doi.org/10.1155/2024/9559221>
- Friederich, J., & Lazarova-Molnar, S. (2024). Reliability assessment of manufacturing systems: A comprehensive overview, challenges and opportunities. *Journal of Manufacturing Systems*, 72, 38–58. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.01.003>
- Goyal, N., Ram, M., Kumar, A., Bisht, S., & Klockhov, Y. (2021). Reliability measures and profit exploration of windmill water-pumping systems incorporating warranty and two types of repair. *Mathematics*, 9(8), 822. <https://doi.org/10.3390/math9080822>
- Hartini, E., Adrial, H., & Pujiarta, S. (2019). Reliability analysis of primary and purification pumps in RSG-GAS using Monte Carlo simulation approach. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega*, 21(1), 15–22. <https://doi.org/10.17146/tdm.2019.21.1.5311>
- Hitomi, K. (1979). Reliability analysis of parallel manufacturing systems with multiple machines. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 101(3), 250–256.
- Kumar, M. (2012). Save energy with efficient vacuum pumps and system design. *IPPTA Journal*, 18(3), 103–106.
- Lai, Z., Li, Q., Zhao, A., & Zhou, W. (2020). Improving reliability of pumps in parallel pump systems using particle swarm optimization approach. *IEEE Access*, 8, 1–11. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2980396>
- Milal, A. N., & Puspitasari, E. (2025). Perencanaan perawatan pompa sentrifugal di PT X menggunakan metode reliability centered maintenance (RCM) dan reliability centered spares (RCS). *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, Elektro dan Komputer*, 5(2), 457–471. <https://doi.org/10.51903/juritek.v5i2.5033>
- Oshurbekov, S., Kazakbaev, V., Prakht, V., & Dmitrievskii, V. (2021). Improving reliability and energy efficiency of three parallel pumps by selecting trade-off operating points. *Mathematics*, 9(11), 1297. <https://doi.org/10.3390/math9111297>
- Peraturan Menteri Perindustrian Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2025 tentang Standar Industri Hijau untuk Industri Pulp, Industri Kertas Budaya, dan Industri Kertas Tisu.
- Peraturan Menteri Perindustrian Republik Indonesia Nomor 49 Tahun 2020 tentang Standar Industri Hijau untuk Industri Kertas dan Papan Kertas Bergelombang.
- Pitaloka, D., & Koeshardono, F. (2020). Reliability and life data analysis on the components of pump. In *Proceedings of the International Seminar of Science and Applied Technology (ISSAT 2020)* (Advances in Engineering Research, Vol. 198, pp. 178–183). Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/aer.k.201221.031>
- PPI Pumps. (2009). *How liquid ring vacuum equipments supports paper industry*. Retrieved from <https://www.ppipumps.com/how-liquid-ring-vacuum-equipments-supports-paper-industry.html>
- Qazizada, M. E., & Pivarčiová, E. (2018). Reliability of parallel and serial centrifugal pumps for dewatering in mining process. *Acta Montanistica Slovaca*, 13(2), 142–150.
- Rizwan, S. M., Al Nabhani, H., Al Rahbi, Y., & Alagiriswamy, S. (2022). Reliability analysis of a three-unit pumping system. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70(6), 24–31. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V70I6P203>
- Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia (SKKNI) Industri Bubur Kertas. (2021). Keputusan Menteri Perindustrian Republik Indonesia Nomor 48 Tahun 2021.
- Technical Information Paper TIP 0420-12. (2012). *Guidelines for evaluation of liquid ring vacuum pump performance*.



Pemanfaatan Limbah Keramik Sebagai Pengganti Sebagian Agregat Halus Terhadap Karakteristik Campuran Aspal Beton (AC-WC)

Oloan Sitohang¹, Adriana Anteng Anggorowati², Rolan Bertoani Purba³

^{1,2} Program Studi Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

^{1,3} Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katolik Santo Thomas Medan

✉ obed_sito@yahoo.com

Pendahuluan

Seiring dengan peningkatan kebutuhan akan material yang ramah lingkungan, pendekatan untuk menggunakan limbah konstruksi sebagai bahan alternatif untuk pekerjaan jalan semakin berkembang. Limbah keramik, yang dihasilkan dari pemotongan dan pemasangan keramik di bangunan, adalah salah satu limbah yang sangat banyak dan sering tidak dimanfaatkan kembali. Meskipun sifat fisiknya yang keras, limbah ini biasanya berakhir sebagai sampah konstruksi. Namun, mereka dapat digunakan sebagai pengganti agregat halus dalam campuran perkerasan lentur.

Aspal beton lapis aus (AC-WC) adalah bagian penting dari konstruksi jalan yang dimaksudkan untuk menahan beban langsung dari lalu lintas. Komposisi material penyusun, terutama agregat halus, yang berfungsi untuk mengisi rongga dan memperkuat struktur campuran, sangat memengaruhi kualitas AC-WC. Akibatnya, penggunaan limbah keramik sebagai pengganti agregat halus harus dievaluasi melalui pengujian teknis yang terukur. Uji Marshall adalah cara yang umum digunakan untuk mengukur kinerja campuran aspal. Ini mengukur stabilitas, kelelahan (*flow*), dan karakteristik volumetrik campuran. Pendekatan ini diharapkan memberi solusi inovatif untuk pengelolaan limbah konstruksi sekaligus mendukung penerapan *green pavement technology*.

Metode

Analisis dalam studi kasus ini menggunakan pendekatan deskriptif-komparatif untuk mengevaluasi pengaruh substitusi limbah keramik terhadap karakteristik campuran aspal beton AC-WC. Data hasil pengujian Marshall, yang meliputi stabilitas, *flow*, VIM, VFB, VMA, dan *Marshall Quotient* (MQ), dikumpulkan untuk setiap variasi kadar limbah keramik dan lama perendaman, kemudian diolah menjadi nilai rata-rata

Penelitian ini bertujuan menilai kelayakan pemanfaatan limbah keramik sebagai pengganti sebagian agregat halus pada campuran aspal beton AC-WC. Variasi kadar limbah keramik 0%, 10%, 20%, 25%, 30%, 40%, dan 50% diuji terhadap parameter marshall, yaitu stabilitas, *flow*, dan *Marshall Quotient* (MQ). Hasil menunjukkan bahwa peningkatan kadar limbah keramik menurunkan stabilitas dan MQ, namun meningkatkan *flow*. Campuran dengan kadar 25% memberikan hasil optimum dengan stabilitas ≥ 800 kg dan MQ ≥ 250 kg/mm, masih memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Penggunaan limbah keramik menunjukkan potensi material alternatif berkelanjutan bagi konstruksi jalan di Indonesia secara singkat, metode.

Kata kunci: Limbah Keramik, Agregat Halus, Aspal Beton, Stabilitas Marshall, Keberlanjutan Material

dari tiga pengulangan uji untuk meningkatkan reliabilitas hasil. Selanjutnya, nilai rata-rata setiap parameter dibandingkan dengan batasan yang ditetapkan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk menilai kelayakan teknis campuran. Analisis tren dilakukan dengan mengevaluasi hubungan antara kadar limbah keramik dan lama perendaman terhadap parameter Marshall secara grafis dan deskriptif, sehingga dapat terlihat pola perubahan sifat campuran dan titik optimum penggantian limbah keramik yang masih memenuhi kriteria teknis.

Hasil analisis kemudian diinterpretasikan untuk menentukan rentang kadar limbah keramik yang layak digunakan sebagai pengganti agregat halus, sekaligus memberikan rekomendasi penerapan di lapangan dengan mempertimbangkan prinsip *engineering feasibility* dan keberlanjutan. Untuk mendukung pemahaman, seluruh hasil pengujian dan hubungan antarvariabel divisualisasikan dalam bentuk tabel dan grafik, sehingga analisis menjadi lebih jelas, sistematis, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Hasil Kerja

Karakteristik Material dan Kadar Aspal Optimum

Hasil awal pemeriksaan menunjukkan bahwa agregat dan aspal penetrasi 60/70 memenuhi persyaratan standar. Karakteristik fisik limbah keramik memungkinkannya digunakan sebagai pengganti agregat halus. Kadar aspal yang ideal menghasilkan nilai KAO sebesar 6,5%, yang kemudian digunakan untuk variasi campuran yang lengkap.

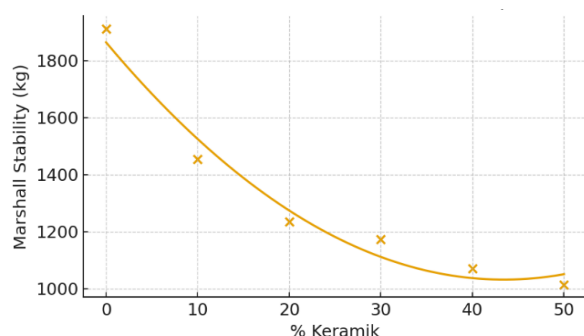
Pengaruh Kadar Limbah Keramik terhadap Stabilitas

Tabel 1. Hasil Uji Marshall Campuran AC–WC dengan Substitusi Limbah Keramik

Kadar Limbah Keramik (%)	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)
0	1030	2,4	429
10	980	2,6	377
20	910	2,8	325
25	850	3,1	274
30	740	3,3	224
40	660	3,7	178
50	580	3,9	149

Sumber: Hasil pengujian, 2025, Oloan Sitohang dkk

Berdasarkan Tabel 1, untuk lama perendaman 12 jam direpresentasikan dam bentuk Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Hubungan *Marshal Stability* dengan %Keramik untuk Perendaman 12 Jam

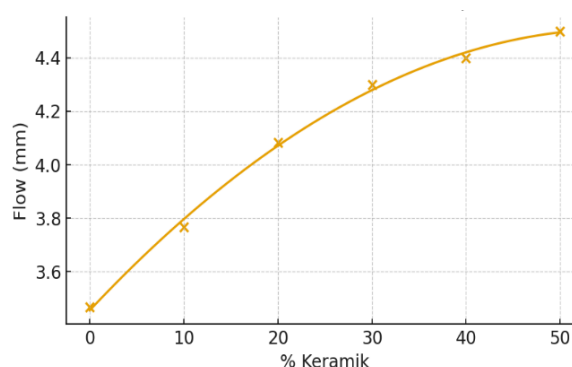
Hasil pengujian menunjukkan pola penurunan stabilitas seiring dengan peningkatan substitusi limbah keramik. Stabilitas tetap dalam rentang 10–20 persen. Bentuk keramik yang bersudut meningkatkan stabilitas di rentang tersebut, meningkatkan *interlocking* antarputir agregat. Karena butir keramik yang lebih rapuh, hal ini masih mampu mengimbangi dampak peningkatan rongga (VIM). Namun, stabilitas mulai menurun secara signifikan ketika substitusi mencapai lebih dari 30%. Penurunan ini dikaitkan dengan peningkatan rongga campuran (VIM), peningkatan VMA, dan penurunan VFB, yang menunjukkan penurunan rongga yang terisi aspal. Pada kondisi ini, film aspal yang seharusnya melapisi agregat tidak dapat mempertahankan kekuatan campuran, sehingga kapasitas campuran untuk menahan bebatuan berkurang.

Setelah lebih dari enam jam, dampak substitusi menjadi lebih jelas. Dengan menyerap air lebih banyak daripada agregat alam, keramik meningkatkan infiltrasi air ke dalam campuran. Penetrasi air ini menyebabkan *stripping*, yaitu terlepasnya lapisan aspal dari permukaan agregat. Ini melemahkan ikatan adhesi dan menurunkan stabilitas agregat. Saat substitusi tinggi (40–50%), stabilitas bahkan turun mendekati batas minimum Bina Marga, sehingga tidak layak digunakan. Untuk memahami pola penurunan ini secara kuantitatif, data hasil uji Marshall digunakan untuk memodelkan regresi kuadratik (Tabel 1). Model prediksi stabilitas untuk substitusi limbah keramik digambarkan sebagai berikut:

$$Y = 0,20x^2 - 19,57x + 1030$$

Dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,989$, variasi stabilitas 98,9% dapat dijelaskan oleh perubahan kadar limbah keramik. Nilai R^2 yang tinggi menunjukkan bahwa pola peningkatan-penurunan stabilitas bersifat sistematis, tidak acak, dan sangat dipengaruhi oleh komposisi substitusi. Selain itu, model ini menunjukkan bahwa stabilitas mencapai puncaknya pada substitusi rendah dan kemudian turun drastis setelah mencapai titik kritisnya. Oleh karena itu, substitusi limbah keramik tidak dapat digunakan dalam persentase tinggi. Untuk menjaga stabilitas struktural campuran AC–WC, batas campuran ideal adalah 10–20 persen. Ini terutama berlaku untuk kondisi perendaman jangka sedang hingga panjang.

Pengaruh Kadar Limbah terhadap Flow

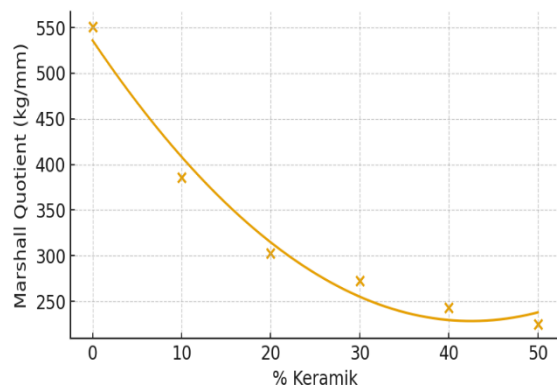


Gambar 2. Hubungan *Flow* dengan %Keramik untuk Perendaman 12 Jam

Hasil pengujian menunjukkan bahwa aliran mengalami pola yang meningkat secara bertahap pada substitusi rendah (0–10%) dan lebih cepat pada substitusi tinggi ($\geq 30\%$), yang menunjukkan bahwa hubungan aliran terhadap persentase substitusi limbah keramik tidak linear. Pada substitusi rendah, *interlocking* antarbutir agregat tetap dominan, sehingga deformabilitas campuran relatif kecil; namun, pada substitusi tinggi, rongga campuran (VIM) meningkat secara signifikan dan kemampuan keramik untuk menghasilkan aliran. Data hasil uji Marshall digunakan untuk regresi kuadratik untuk menunjukkan hubungan ini secara kuantitatif (Tabel 1). Model prediksi aliran untuk substitusi limbah keramik digambarkan sebagai berikut:

$$Y = 0,002X^2 + 0,05X + 2,4$$

Koefisien determinasi $R^2 = 0.981$, yang menunjukkan bahwa 98,1% variasi aliran dapat dijelaskan oleh perubahan kadar limbah keramik. Nilai R^2 yang tinggi menunjukkan bahwa pola peningkatan aliran sangat sistematis dan dipengaruhi secara signifikan oleh komposisi substitusi. Meskipun aliran meningkat secara moderat pada substitusi rendah, model ini menunjukkan bahwa aliran dapat mencapai batas maksimum yang ditetapkan oleh standar Bina Marga ketika aliran meningkat pada substitusi tinggi. Oleh karena itu, untuk menjaga deformabilitas campuran tetap terkendali, rentang substitusi ideal adalah 10–20 persen.

Pengaruh Kadar Limbah terhadap Marshall Quotient

Gambar 3. Hubungan Marshall Quotient dengan %Keramik untuk Perendaman 12 Jam

Hasil pengujian *Marshall Quotient* (MQ) menunjukkan pola penurunan seiring peningkatan substitusi limbah keramik, terutama pada substitusi lebih dari 30%. MQ merupakan indikator kekakuan campuran, yang mengukur kemampuan campuran untuk menahan deformasi di bawah beban. Penurunan MQ menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih plastis dan kurang mampu menahan beban, terutama dalam kondisi perendaman jangka panjang.

Pada substitusi rendah (antara 10 dan 20 persen), MQ tetap berada di zona ideal karena bentuk angular keramik meningkatkan *interlocking*, sementara pengaruh peningkatan rongga (VIM) belum dominan. Namun, pada substitusi tinggi (lebih dari 30 persen), rongga campuran meningkat (VIM meningkat), VMA meningkat, dan VFB menurun, sehingga film aspal tidak cukup untuk melapisi agregat. Akibatnya, kekakuan campuran berkurang dan MQ menurun.

Data hasil uji Marshall digunakan untuk regresi kuadratik untuk menunjukkan hubungan ini secara kuantitatif (Tabel 1). Model prediksi MQ untuk substitusi limbah keramik digambarkan sebagai berikut:

$$Y = -0,15X^2 + 2,1X + 429$$

Dengan koefisien determinasi $R^2 = 0.987$, variasi MQ 98,7% dapat disebabkan oleh perubahan kadar limbah keramik. Pola kuadratik ini menunjukkan bahwa pada substitusi rendah, MQ relatif stabil, tetapi kemudian turun drastis pada substitusi tinggi. Berdasarkan model ini, rentang substitusi ideal tetap disarankan antara 10 dan 20 persen untuk menjaga kekakuan campuran AC-WC sesuai dengan standar Bina Marga, khususnya untuk kondisi perendaman sedang hingga panjang.

Pengaruh Substitusi Keramik terhadap VIM, VMA, dan VFB

Parameter volumetrik penting yang memengaruhi perilaku mekanis campuran termasuk stabilitas, aliran, dan *Marshall Quotient* (MQ) terdiri dari *void in mix* (VIM), *void in mineral aggregation* (VMA), dan *void filled with bitumen* (VFB). Ketika limbah keramik diganti dengan agregat halus, proporsi rongga, kepadatan, dan kemampuan campuran untuk mengikat aspal berubah, yang berdampak langsung pada kinerja Marshall.

1. Pengaruh Terhadap VIM (Void in Mix)

Permukaan keramik yang tajam dan bersudut meningkatkan *interlocking*, mengurangi ruang antarbutir, sehingga VIM lebih rendah pada substitusi keramik rendah (10–20%). Pada kondisi ini, stabilitas dan nilai MQ yang lebih tinggi berkorelasi dengan rendahnya VIM, terutama pada perendaman 30 menit hingga 3 jam. Namun, VIM cenderung meningkat kembali pada substitusi keramik tinggi (40–50%), terutama selama perendaman 6–12 jam. Nilai MQ turun pada substitusi tinggi karena keramik memiliki porositas lebih besar dibanding pasir alam, sehingga menyerap sebagian aspal di dalam campuran. Kekurangan aspal meningkatkan rongga, menurunkan stabilitas, dan meningkatkan aliran.

2. Pengaruh Terhadap VMA (Void in Mineral Aggregate)

Kadar VMA meningkat seiring dengan peningkatan kadar keramik. Pada substitusi antara 0 dan 20%, peningkatan VMA masih berada di batas ideal untuk memberikan ruang yang cukup bagi aspal untuk mengisi rongga, sehingga campuran menjadi lebih stabil. Pada perendaman pendek, VMA yang ideal menghasilkan nilai stabilitas yang tinggi dan aliran yang moderat. Sebaliknya, pada substitusi lebih dari 30%, VMA meningkat terlalu tinggi, terutama karena bentuk butir keramik yang pipih dan sudut tajam. Pada perendaman selama enam hingga dua belas jam, VMA berlebih menyebabkan aspal tidak dapat mengisi seluruh rongga, membuat campuran lebih rapuh dan kehilangan ketahanan terhadap deformasi. Kondisi ini mengurangi stabilitas dan meningkatkan aliran secara substansial.

3. Pengaruh Terhadap VFB (Void Filled with Bitumen)

Persentase rongga agregat yang terisi aspal ditunjukkan oleh VFB jika substitusi rendah; ini meningkatkan kekuatan ikat antarbutir dan mendukung stabilitas dengan mempertahankan aliran dalam batas aman. Namun, pada substitusi sedang hingga tinggi (lebih dari 30%), terutama setelah perendaman lebih dari enam jam, terjadi penurunan VFB karena aspal menyerap ke pori-pori keramik. Akibatnya, semakin sedikit rongga agregat yang terisi aspal, yang menghasilkan campuran yang lebih padat, yang menghasilkan peningkatan nilai aliran dan penurunan stabilitas. Ditunjukkan oleh penurunan MQ yang signifikan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seiring dengan peningkatan persentase substitusi limbah keramik, VIM (*Void in Mix*), VMA (*Void in Mineral Aggregate*), dan VFB (*Void Filled with Binder*) meningkat. Pola ini memberikan penjelasan tentang mekanisme MQ dan penurunan stabilitas yang terjadi pada substitusi tinggi.

- Karena butir keramik yang bersudut dan relatif rapuh menciptakan rongga udara yang lebih besar di antara agregat, deformabilitas campuran meningkat, sehingga VIM meningkat.

$$Y = 0,05x^2 + 0,2x + 2,4, R^2 = 0,982$$

- Karena penambahan keramik mengurangi kepadatan maksimum campuran, VMA meningkat. Ini terjadi karena agregat mineral tidak mengisi ruang yang tersisa.

$$Y = 0,06x^2 + 0,25x + 14,0, R^2 = 0,982$$

- Karena volume rongga yang meningkat, VFB menurun. Ini terjadi karena lapisan aspal menipis dan adhesi antarbutir menurun.

$$Y = -0,04x^2 - 0,3x + 70,0, R^2 = 0,985$$

Koefisien determinasi yang tinggi menunjukkan bahwa perubahan VIM, VMA, dan VFB secara sistematis dan secara signifikan dipengaruhi oleh kadar substitusi keramik. Sebagaimana ditunjukkan oleh model ini:

1. Pada substitusi tinggi, peningkatan rongga udara (VIM) dan agregat (VMA) sejalan dengan peningkatan aliran dan penurunan MQ.
2. Penurunan VFB menyebabkan kapasitas campuran menahan beban berkurang, terutama pada substitusi setidaknya 30%.
3. Untuk memastikan stabilitas, MQ, dan aliran tetap dalam batas ideal Bina Marga, rentang substitusi ideal untuk menjaga keseimbangan VIM, VMA, dan VFB adalah 10–20 persen.

Rekomendasi untuk mengoptimalkan performa struktural AC–WC dengan penggunaan limbah keramik secara terbatas diperkuat oleh model regresi terintegrasi ini.

Kelayakan Pemanfaatan Limbah Keramik

Menurut analisis keseluruhan, limbah keramik layak digunakan sebagai pengganti sebagian agregat halus pada campuran AC–WC hingga batas substitusi tertentu, yaitu sekitar 10–20 persen, terutama dalam lingkungan yang tidak mengalami perendaman air yang berkepanjangan. Di atas batas tersebut, campuran masih memenuhi spesifikasi Bina Marga untuk stabilitas, aliran, MQ, dan karakteristik volumetrik lainnya. Namun, dengan kadar substitusi tinggi (sekurang-kurangnya 40%), terutama selama perendaman lebih dari enam jam, stabilitas, aliran, dan MQ menurun. Akibatnya, campuran aspal ini tidak lagi memenuhi persyaratan campuran aspal berkualitas. Oleh karena itu, penggunaan limbah keramik memerlukan batas substitusi yang diukur dan mempertimbangkan lingkungan lapangan, terutama kemungkinan paparan air.

Jika digunakan pada batas substitusi yang aman dan sesuai dengan karakteristik perkerasan yang direncanakan, limbah keramik dapat menjadi material alternatif yang berharga. Dengan demikian, pemanfaatan limbah keramik pada kadar yang tepat memberikan manfaat tambahan, seperti mengurangi jumlah limbah yang dihasilkan dari konstruksi, mengurangi penggunaan agregat alam, dan mendukung pendekatan konstruksi berkelanjutan.

Durasi perendaman memiliki kontribusi yang sangat kuat terhadap performa campuran aspal beton yang mengandung limbah keramik. Pada durasi 0,5–3 jam, seluruh parameter: Stabilitas, *Flow*, dan *Marshall Quotient* (MQ), masih berada dalam rentang spesifikasi

untuk kadar keramik $\leq 30\%$, menunjukkan bahwa kekakuan struktural dan deformabilitas campuran masih terkendali. Namun, setelah perendaman 6 jam, mulai terlihat penurunan Stabilitas yang signifikan disertai peningkatan *flow*, sehingga MQ menurun, terutama pada kadar keramik $\geq 30\%$. Pada durasi 9–12 jam, penurunan stabilitas dan MQ semakin drastis sementara *flow* terus meningkat, menandakan turunnyanya kemampuan campuran menahan deformasi plastis dan meningkatnya risiko *rutting*. Fenomena ini terkait dengan terjadinya *loss of adhesion* antara binder dan agregat serta intrusi air pada pori campuran, yang menurunkan *interlocking* dan adhesi di zona kontak binder–agregat. Dengan demikian, umur layan campuran sangat dipengaruhi oleh kondisi genangan air berkepanjangan, dan pemanfaatan limbah keramik harus mempertimbangkan durasi paparan air untuk menjaga keseimbangan antara daya dukung (stabilitas) dan deformabilitas (*flow*) sehingga MQ tetap optimal.

Kesimpulan

Limbah keramik dapat dimanfaatkan sebagai pengganti sebagian agregat halus pada campuran AC–WC dengan substitusi optimum 10–20%. Pada kadar tersebut, stabilitas, *flow*, MQ, serta parameter volumetrik masih memenuhi persyaratan. Namun substitusi $\geq 40\%$ tidak dianjurkan, terutama pada kondisi lingkungan basah karena menyebabkan tingginya VIM, penurunan VFB, dan melemahnya struktur campuran. Substitusi keramik dengan pengendalian perendaman terbukti menjadi pendekatan berkelanjutan untuk mengurangi limbah konstruksi.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ir. Dra. Adriana Anteng Anggorowati, M.Si., IPU., ASEAN Eng., atas bimbingan, arahan, dan dukungan yang berharga selama proses penelitian ini sehingga dapat diselesaikan dengan baik. Penulis juga menyampaikan penghargaan kepada Kepala Laboratorium Jalan Raya, Program Studi Teknik Sipil Universitas Katolik Santo Thomas, beserta seluruh staf laboratorium, atas fasilitas, bantuan teknis, dan dukungan yang diberikan dalam pelaksanaan pengujian dan eksperimen penelitian ini.

Referensi

- Al-Kheetan, M. J., Rahman, M. M., & Chamberlain, D. (2023). Sustainable use of anti-stripping-treated waste ceramic in Superpave asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 421, 138–149.
- Badan Standardisasi Nasional. (1991). *Metode uji stabilitas dan pelelehan campuran beraspal panas dengan menggunakan alat Marshall (SNI 2489:1991)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *Bahan aspal, metode pengujian penetrasi (SNI 2456:2011)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.



- Baker, B., et al. (2023). Effect of waste ceramic powder on the properties of asphalt binder and asphalt concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 392, 124–133.
- Bina Marga. (2018). *Spesifikasi umum Bina Marga 2018 untuk pekerjaan konstruksi jalan dan jembatan*. Jakarta: Kementerian PUPR, Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Dina, A. (2021). *Analisa kelayakan limbah keramik sebagai pengganti agregat halus untuk campuran aspal beton*.
- Hasan, M. M., Rahman, M., & Siddique, R. (2020). Utilization of waste ceramic tile as fine aggregate in bituminous mixture. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(7), 843–851.
- Kara, Ç., & Karacasu, M. (2017). Investigation of ceramic tile waste usage in hot mix asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(9), 112–120.
- Khairuddin, Y., & Suryana, A. (2020). Pengaruh pemanfaatan limbah keramik sebagai pengganti agregat halus pada campuran AC-WC terhadap karakteristik Marshall. *Jurnal Teknik Sipil*, 27(3), 163–171.
- Muttaqin, Z. (2023). Pengaruh pencampuran limbah keramik sebagai agregat halus dan filler pada campuran aspal. *Jurnal Infrastruktur*, 9(1), 35–42.
- Oloan, S., Asmirus, L., Edison, H. M., & Sarjo, P. (2023). Model value of residual strength of concrete asphalt pavement consequences of soaking of rainwater and seawater by continuous and periodic methods. *Indonesian Journal of Construction Engineering and Sustainable Development (CESD)*, 6(1), 8–16. <https://doi.org/10.25105/cesd.v6i1.17152>
- Oloan, S., Edison, H. M., & Andar, S. (2024). *Air penyebab menurunnya nilai kekuatan konstruksi perkerasan jalan raya*. Yogyakarta: Deepublish.
- Özkılıç, Y. O., et al. (2024). Influence of ceramic waste powder on mechanical performance of cementitious structural elements. *Materials Today Communications*, 38, 105–113.
- Prakoso, D. A., & Putra, A. R. (2022). Kinerja campuran AC-WC dengan substitusi material limbah keramik terhadap ketahanan perendaman. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*, 8(2), 101–108.
- Ray, S. (2021). Use of waste ceramic as aggregate in concrete production: A review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4225–4232.
- Schafer, J. L., & Kang, J. (2008). Average causal effects from nonrandomized studies: A practical guide and simulated example. *Psychological Methods*, 13(4), 379–413.
- Skenderian, J., Siegel, J. T., Crano, W. D., Alvaro, E. E., & Lac, A. (2008). Expectancy change and adolescents' intentions to use marijuana. *Psychology of Addictive Behaviors*, 22(4), 563–569.
- Widianty, D., et al. (2025). Pemanfaatan limbah keramik sebagai pengganti agregat halus pada campuran Laston AC-BC. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*, 12(1), 75–84.
- Yusuf. (1998). *Pengertian tentang keramik*. Diakses dari <https://id.wikipedia.org/wiki/Keramik>



Studi Kasus Pelaksanaan Survei, Investigasi, dan Desain (SID) Daerah Irigasi (D.I) Satar Lenda Sub D.I. Wae Laru Kabupaten Manggarai

Danny Ramon Riwu¹ Adriana Anteng Anggorowati²

^{1,2} Program Studi Profesi Insinyur, Fakultas Teknik,
Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ dannyriwu1@gmail.com

Survei, Investigasi, dan Desain (SID) merupakan tahap fundamental dalam penyusunan perencanaan teknis jaringan irigasi untuk memastikan ketersediaan data yang akurat, komprehensif, dan sesuai kondisi lapangan. Sistem irigasi yang telah dibangun lebih dari dua dekade belum berfungsi optimal karena sebagian besar masih berupa *free intake* dan banyaknya saluran yang masih berupa tanah, berpotensi kehilangan air, dan tergantung pada curah hujan sebagai sumber utama air pertanian. Tujuan penulisan ini adalah menganalisis permasalahan teknis yang dihadapi dalam proses SID, mengevaluasi kesesuaian pelaksanaan kegiatan dengan standar perencanaan irigasi, serta memberikan rekomendasi perbaikan berbasis keinsinyuran. Metode yang digunakan meliputi observasi lapangan, survei teknis, analisis dokumen, wawancara, investigasi geologi, hidrologi, sosial ekonomi, serta pemetaan topografi, merincikan standar teknis, referensi hukum yang digunakan, serta analisis deskriptif-komparatif berdasarkan standar KP 2013, SNI hidrologi, dan pedoman teknis Kementerian PUPR. Penulisan Studi Kasus ini meliputi pengumpulan data, pemetaan, analisis lingkungan, data dikumpulkan melalui pengukuran langsung dan studi sekunder, kemudian dianalisis untuk menentukan kapasitas saluran, debit andalan, serta kebutuhan air irigasi. Hasil studi menunjukkan bahwa perlunya rehabilitasi menyeluruh terhadap bangunan utama dan jaringan pendukung untuk mengurangi kehilangan air dan meningkatkan efisiensi distribusi. Kesimpulannya, pelaksanaan Desain SID D.I. Satar Lenda Sub D.I. Wae Laru menjamin ketahanan pangan, meningkatkan kesejahteraan petani, dan mendukung pembangunan berkelanjutan di Kabupaten Manggarai melalui sistem irigasi yang efisien dan berdaya guna tinggi. Rekomendasi utama meliputi pemutakhiran data, penguatan analisis hidrologi, investigasi geoteknik lanjutan, serta peningkatan partisipasi masyarakat untuk mendukung desain irigasi yang efektif dan berkelanjutan.

Kata kunci: Survei Investigasi Desain, Irigasi, Hidrologi, Geoteknik, Topografi

Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur sumber daya air merupakan salah satu komponen strategis dalam mendukung ketahanan pangan dan keberlanjutan sistem produksi pertanian di Indonesia. Pada wilayah-wilayah yang memiliki variasi curah hujan tinggi dan pola musim yang tidak menentu seperti Nusa Tenggara Timur, sistem irigasi berperan penting dalam menjaga stabilitas suplai air bagi lahan pertanian masyarakat. Kondisi ini menuntut adanya perencanaan teknis yang akurat, terutama melalui kegiatan Survei, Investigasi, dan Desain (SID), untuk memastikan bahwa infrastruktur irigasi yang dibangun mampu menjawab tantangan hidrologi setempat. Hal ini sejalan dengan pandangan bahwa kelayakan dan keberlanjutan irigasi sangat dipengaruhi oleh ketepatan analisis awal dan kualitas perencanaannya (Rahman, 2020).

Daerah Irigasi (D.I.) Satar Lenda Sub D.I. Wae Laru di Kabupaten Manggarai merupakan salah satu kawasan pertanian yang membutuhkan peningkatan akurasi data

teknis terkait debit air, kondisi jaringan, dan karakteristik lahan. Perubahan tata guna lahan, pertumbuhan penduduk, serta degradasi fisik infrastruktur eksisting menimbulkan kebutuhan mendesak untuk melakukan pembaruan data melalui kegiatan SID. Studi terdahulu menyatakan bahwa pembaruan data irigasi sangat krusial untuk meminimalkan risiko ketidaksesuaian desain dan kegagalan fungsi jaringan irigasi (Prasetyo & Nugraha, 2021). Berdasarkan hal tersebut, penyusunan SID pada wilayah ini perlu dilakukan agar desain teknis yang dihasilkan valid, adaptif, dan dapat dijadikan dasar pembangunan yang lebih efektif.

Selain aspek teknis, pelaksanaan SID juga harus memperhatikan dinamika sosial ekonomi masyarakat di sekitar wilayah layanan irigasi. Perubahan perilaku pertanian, pola tanam, serta tingkat penerimaan masyarakat terhadap proyek berpengaruh terhadap keberhasilan implementasi infrastruktur. Literatur terkini menegaskan bahwa integrasi data sosial-

ekonomi dalam proses desain irigasi berkontribusi pada peningkatan efektivitas pemanfaatan air dan keberlanjutan operasi jaringan (Lestari & Hanafiah, 2022). Oleh sebab itu, kegiatan SID di D.I. Satar Lenda Sub D.I. Wae Laru tidak hanya menitikberatkan pada aspek fisik, tetapi juga pada kajian sosial ekonomi pertanian. Secara hidrologis, karakteristik iklim NTT yang memiliki musim kering panjang dan curah hujan tinggi pada periode singkat memperbesar urgensi analisis hidrologi yang komprehensif. Ketersediaan air yang sangat berfluktuasi membutuhkan perhitungan debit andalan, evapotranspirasi, serta kebutuhan air irigasi yang lebih presisi.

Studi hidrologi terbaru menunjukkan bahwa wilayah dengan pola hujan ekstrem memerlukan desain jaringan irigasi berbasis data jangka panjang untuk mengurangi ketidakpastian suplai air (Mulyadi et al, 2023). Hal ini mendukung perlunya pelaksanaan SID sebagai langkah awal untuk memastikan desain jaringan dapat berfungsi optimal sepanjang tahun. Dengan mempertimbangkan aspek teknis, hidrologi, sosial ekonomi, dan dinamika perubahan lingkungan, pelaksanaan Survei, Investigasi, dan Desain (SID) Daerah Irigasi Satar Lenda Sub D.I. Wae Laru merupakan langkah strategis yang diperlukan untuk meningkatkan efektivitas pemanfaatan sumber daya air dan mendukung produktivitas pertanian masyarakat. Kegiatan ini juga sejalan dengan standar perencanaan irigasi serta prinsip keinsinyuran yang menuntut analisis komprehensif dan pengambilan keputusan berbasis data.

Oleh karena itu, studi kasus ini disusun sebagai bentuk kajian profesional terhadap proses perencanaan teknis irigasi yang menjadi bagian dari kompetensi seorang insinyur dalam mengelola sumber daya air secara efektif dan berkelanjutan. Kegiatan survei Investigasi, dan Desain (SID) Daerah Irigasi (D.I) ini sejalan dengan SDG's nomor-2 berfokus pada penghapusan kelaparan, pencapaian ketahanan pangan, dan peningkatan pertanian berkelanjutan. Pelaksanaan SID pada D.I. Satar Lenda Sub D.I. Wae Laru mendukung tujuan ini melalui perencanaan sistem irigasi yang mampu menjamin ketersediaan air untuk lahan pertanian sepanjang tahun.

Dengan adanya data yang akurat mengenai kebutuhan air tanaman, luas area irigasi potensial, dan kondisi jaringan, desain irigasi yang dihasilkan dapat meningkatkan produktivitas pertanian. Ketersediaan air yang stabil memungkinkan petani meningkatkan intensitas tanam, mengurangi risiko gagal panen, dan diversifikasi tanaman. Hal ini secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan produksi pangan lokal, yang pada gilirannya mendukung ketahanan pangan di tingkat daerah. Pelaksanaan SID pada D.I. Satar Lenda Sub D.I. Wae Laru juga ada kaitannya dengan SDG's nomor-6, yang bertujuan untuk menjamin ketersediaan dan pengelolaan air bersih yang berkelanjutan. Kegiatan survei dan investigasi dalam SID mencakup analisis sumber air, debit sungai, kualitas air, serta potensi pencemaran. Hal ini penting untuk memastikan bahwa perencanaan jaringan irigasi tidak hanya memenuhi kebutuhan pertanian, tetapi juga menjaga keberlanjutan sumber daya air. Desain irigasi

yang baik mempertimbangkan efisiensi penggunaan air, meminimalkan kebocoran, dan mengatur distribusi air secara adil di antara pengguna.

Dengan demikian, SID membantu mewujudkan pengelolaan air yang lebih baik, berkelanjutan, dan ramah lingkungan, sesuai dengan target SDG's nomor 6. Pelaksanaan Survei, Investigasi, dan Desain (SID) pada Daerah Irigasi Satar Lenda Sub D.I. Wae Laru Kabupaten Manggarai bukan sekadar kegiatan teknis perencanaan infrastruktur, tetapi juga merupakan bagian dari upaya global dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan (*United Nations*, 2015).

Metode

Analisis data dalam studi kasus ini dilakukan menggunakan pendekatan analisis deskriptif-komparatif, yaitu dengan membandingkan hasil pelaksanaan SID di lapangan dengan standar perencanaan irigasi, pedoman teknis Kementerian PUPR, serta teori keinsinyuran yang telah dibahas dalam tinjauan pustaka. Analisis deskriptif digunakan untuk menggambarkan kondisi eksisting dan tahapan pelaksanaan SID, sementara analisis komparatif digunakan untuk menilai kesesuaian hasil kerja dengan standar dan prinsip desain yang berlaku.

Hasil Kerja

1. Analisis Permasalahan

Pertama, keterbatasan data topografi menyebabkan ketidakpastian dalam penentuan elevasi saluran, kemiringan dasar, dan lokasi bangunan pelengkap. Topografi daerah yang berbukit dengan variasi kemiringan yang signifikan memerlukan pengukuran yang rinci dan akurat. Ketidaktepatan data elevasi dapat menimbulkan risiko distribusi air yang tidak merata atau terjadinya aliran balik (*backwater*) pada titik-titik tertentu.

Kedua, analisis hidrologi menghadapi tantangan akibat variabilitas curah hujan yang tinggi dan keterbatasan data debit harian historis. Kondisi iklim NTT yang memiliki musim kering panjang mengharuskan perhitungan kebutuhan air dan ketersediaan air dilakukan dengan model estimasi yang tepat. Jika metode hidrologi yang digunakan tidak mempertimbangkan variabilitas iklim, desain kapasitas saluran dan bangunan utama berpotensi tidak mencukupi kebutuhan irigasi pada musim tertentu.

Ketiga, kondisi geologi dan mekanika tanah belum sepenuhnya teridentifikasi pada beberapa lokasi rencana bangunan, sehingga risiko kestabilan lereng, daya dukung tanah, dan permeabilitas harus dianalisis lebih dalam. Risiko geoteknik seperti longsor atau penurunan tanah pada bangunan irigasi dapat terjadi apabila desain tidak mempertimbangkan kondisi tanah secara akurat.

Keempat, aspek sosial ekonomi menunjukkan adanya perubahan pola tanam dan kebutuhan air masyarakat yang harus diintegrasikan ke dalam desain teknis. Ketidaksesuaian antara desain dan kebutuhan pengguna dapat menyebabkan jaringan tidak dimanfaatkan secara maksimal. Analisis permasalahan ini memperlihatkan bahwa kegagalan memadukan data

teknis dan sosial dapat mengurangi efektivitas jaringan irigasi.

2. Kondisi Bendung

Secara administratif D.I. Wae Laru terletak di desa Satar Laju, Kec. Satar Mese Barat, Kab. Manggarai. Untuk mencapai desa ini dapat dicapai dari Ruteng (Ibukota Kab. Manggarai) menuju ke Satar Lenda menggunakan kendaraan roda 4 atau angkutan umum pedesaan, dengan jarak tempuh sekitar 76 km atau waktu tempuh $\pm 3,00$ jam. Di desa Satar Lenda ini terdapat tempat/tujuan pariwisata kampung adat Wae Rebo. D.I. Wae Laru memanfaatkan sumber air sungai Wae Laru. Kondisi bendung dan jaringan irigasi D.I. Wae Laru adalah sebagai berikut: Bendung Wae Laru mempunyai bentang 12,00 m, lebar pilar 1,00 m dan lebar pembilas 0,60 m, serta lebar intake/bangunan pengambilan 1,00 m. Kondisi bendung D.I. Wae Laru dapat diuraikan sebagai berikut:

- Tubuh bendung Kondisi Baik,
 - Kolam Kondisi Baik,
 - Pintu pembilas, tidak ada
 - Untuk intakenya tidak dilengkapi pintu air, sehingga airnya tidak dapat diatur,
 - Tidak ada kantong lumpur.
- Di sungai Wae Laru ditemui banyak bongkahan batu.

3. Kondisi Jaringan Irigasi

Kondisi jaringan irigasi D.I. Wae Laru dapat diuraikan sebagai berikut:

- Saluran primer masih dalam keadaan baik.
- Adanya pengambilan ilegal dengan melobangai saluran sekunder.
- Pada bangunan bagi dan bangunan sadap belum dilengkapi pintu air.
- Sebagian besar dinding saluran mengalami kerusakan sehingga terjadi banyak kebocoran.
- Sebagian saluran sekunder D.I. Wae Laru yang tidak terawat dan adanya sedimentasi.
- Sebagian salurannya masih berupa tanah dan belum dilinings.
- Sebagian saluran sekunder D.I. Wae Laru yang mengalami gerusan pada dasar saluran.

Tidak adanya pemeliharaan/pembersihan pada saluran.

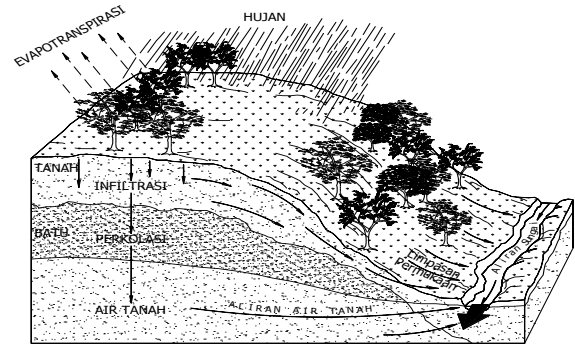
Pengukuran Debit

Metode pengambilan debit pada D.I Wae Laru dengan mengunakan pelampung. Hasil pengukuran debit pada bendung 461,331 Liter/Detik dan hasil pengukuran debit pada saluran primer 86,248 Liter/Detik. Pengambilan air baku yang paling mudah dilakukan adalah di sungai karena langsung mendapatkan debit. Debit sungai berasal dari aliran limpasan hujan (*direct run off*) dan aliran air tanah (mata air). Air permukaan adalah air yang mengalir secara berkesinambungan atau dengan terputus-putus dalam alur sungai atau saluran dari sumbernya yang tertentu, dimana semua ini merupakan bagian dari sistem sungai yang menyeluruh.

Tabel 1. Luas Daerah Irigasi SatarLenda

No.	Nama Daerah Irigasi	Lokasi Desa	Luas Areal (Ha)			Ket.
			Baku	Fungsional	Potensial	
1.	D.I. Wae Aweng	Satar Lenda	500	311		
2.	D.I. Wae NTijo	Satar Lenda	100	100		
3.	D.I. Wae Laja	Cekalaju	800			
4.	D.I. Wae Lale	Satar Ruwuk	125			
5.	D.I. Wae Laru	Satar Laju	228	68	160	*)
Kawasan D.I. Satar Lenda		Kec. Satar Mese Barat	1.753			

Sumber: Dinas PU dan Penataan Ruang Provinsi NTT dan Hasil Peningjauan Lapangan, 2025
Catatan: *) Belum ada savah, baru dibuka lahan sekitar 160 Ha,



Gambar 1. Ilustrasi Aliran Permukaan



Gambar 2. Kondisi Tubuh Bendung dan Kolam Olak

Tabel 2. Koordinat Bendung & Bangunan Pengambilan

No.	Nama Daerah Irigasi	Lokasi Desa	Koordinat Geografis	Jenis Bangunan Pengambilan
1.	D.I. Wae Laru	Satar Laju	08°48'31,20"LS dan 120°19'9,31" BT	Bendung
	Kawasan D.I. Satar Lenda	Kec. Satar Mese Barat		

Sumber: Hasil Peninjauan Lapangan, 2025



Gambar 3. Pintu Pembilas & Intake Tidak Ada



Gambar 4. Dinding Sekunder Baik, Lantai Tergerus, Dilubangi Akibatnya Bocor 2 Sisi



Gambar 5. Pintu Air Pintu Pembagi Tidak Ada



Gambar 6. Pengukuran Debit di Sungai



Gambar 7. Pengukuran Debit Saluran Primer

Kesimpulan

Analisis yang dilakukan terhadap pelaksanaan Survei, Investigasi, dan Desain (SID) Daerah Irigasi (D.I.) Satar Lenda Sub D.I. Wae Laru, dapat disimpulkan bahwa kegiatan SID memiliki peran penting sebagai proses dasar dalam menghasilkan dokumen perencanaan irigasi yang akurat, terukur, dan sesuai kebutuhan lapangan. Analisis menunjukkan bahwa permasalahan utama yang memengaruhi kualitas perencanaan meliputi keterbatasan data topografi, ketidakpastian hidrologi, kurang lengkapnya informasi geologi dan mekanika tanah, serta adanya dinamika sosial-ekonomi masyarakat yang memengaruhi pola tanam dan kebutuhan air irigasi. Hasil studi ini

menunjukkan bahwa ketelitian dalam pengukuran topografi sangat berpengaruh terhadap akurasi desain saluran dan bangunan pelengkap, mengingat variasi kemiringan lahan di wilayah studi.

Analisis hidrologi memerlukan pendekatan yang lebih komprehensif karena wilayah Nusa Tenggara Timur memiliki pola curah hujan ekstrem dan musim kering yang panjang. Kajian geologi dan mekanika tanah terbukti menjadi dasar penting untuk menentukan kelayakan lokasi bangunan air dan menghindari risiko ketidakstabilan struktur. Selain itu, integrasi analisis sosial ekonomi berperan penting untuk memastikan desain sesuai dengan pola penggunaan air oleh masyarakat. Secara keseluruhan, kegiatan SID pada D.I. Satar Lenda Sub D.I. Wae Laru telah memberikan gambaran menyeluruh mengenai kebutuhan perbaikan pada aspek teknis dan non-teknis jaringan irigasi. Temuan-temuan dalam studi ini menunjukkan bahwa keberhasilan perencanaan sangat dipengaruhi oleh kualitas data, ketepatan metode analisis, serta kesesuaian desain dengan standar KP 2013, SNI, dan pedoman teknis irigasi. Dengan demikian, studi ini berhasil menjawab seluruh tujuan yang telah ditetapkan pada Bab 1, yaitu menganalisis masalah teknis, mengevaluasi pelaksanaan SID, dan memberikan rekomendasi berbasis keinsinyuran untuk peningkatan kualitas perencanaan.

Ucapan Terimakasih

Terima kasih Penulis sampaikan kepada :

1. Tuhan Yesus Kristus sumber hidup dan kekuatan saya, Tuhan Yesus baik, kasih setia-Nya untuk selama-lamanya.
2. Ketua Program studi Bapak Dr. Ir. Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng, yang selalu mengingatkan kami semua progres kemajuan studi kasus ini dan terus mendorong kami dalam menyelesaikan laporan ini.
3. Rekan rekan Mahasiswa Program Studi Profesi Insinyur Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya yang saling memberikan dukungan dan semangat dalam menyelesaikan laporan studi kasus ini hingga selesai.
4. Orang Tua, Saudara tetangga, kenalan handai tauland, sahabat, teman kantor dan gereja yang terus memberi semangat dan doa.
5. Kekasihku dr. Arna Jonary Heo, terima kasih engkau inspirasi dalam mencapai cita-cita dan cintaku
6. Semua Pihak yang telah membantu secara langsung maupun tidak langsung baik secara fisik dan doa, terima kasih untuk semua andil dalam karya saya ini.

Referensi

- Agustino, R. (2023). *Analisis debit andalan di wilayah dengan variabilitas curah hujan tinggi*.
- Habibi, A., & Maulana, H. (2019). *Kajian mekanika tanah untuk perencanaan bangunan irigasi*.
- Hakim, R., & Prabowo, S. (2019). *Analisis ketelitian survei topografi terhadap desain jaringan irigasi di Indonesia*.
- Lestari, M., & Hanafiah, A. (2022). *Pengaruh kondisi sosial ekonomi terhadap kinerja irigasi*.



- Liman, K., & Suryanto, B. (2024). *Akurasi pemetaan topografi dan dampaknya terhadap perencanaan jaringan irigasi*.
- Luturmas, Y., & Saleky, M. (2023). *Perencanaan irigasi di daerah iklim kering: Studi wilayah Maluku*.
- Mahendra, T., & Yusuf, M. (2021). *Evaluasi fungsi jaringan irigasi berdasarkan standar perencanaan*.
- Nugroho, D., & Fahmi, A. (2022). *Integrasi aspek sosial ekonomi dalam perencanaan irigasi modern*.
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 07/PRT/M/2021 tentang Pedoman Pelaksanaan Penyelenggaraan Prasarana dan Sarana Sumber Daya Air. (2021).
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 12/PRT/M/2015 tentang Eksploitasi dan Pemeliharaan Jaringan Irigasi. (2015).
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 9/PRT/M/2020 tentang Pedoman Teknis Irigasi. (2020).
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 20 Tahun 2006 tentang Irigasi. (2006).
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 42 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sumber Daya Air. (2008).
- Prasetyo, D., & Nugraha, R. (2021). *Pembaruan data teknis irigasi sebagai dasar efektivitas desain*.
- Putri, E., & Laksono, H. (2023). *Kesesuaian desain irigasi dengan dinamika pola tanam petani*.
- Santoso, F., & Rinaldi, K. (2020). *Pengaruh karakteristik geologi terhadap umur infrastruktur irigasi*.
- Setiawan, R., Aditama, P., & Wulan, T. (2022). *Analisis hidrologi pada perencanaan irigasi berbasis data jangka panjang*.
- Sutrisno, A. (2020). *Peran sistem irigasi dalam efisiensi distribusi air pertanian*.
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2020 tentang Cipta Kerja. (2020).
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air. (2019).
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 23 Tahun 2014 tentang Pemerintahan Daerah sebagaimana telah diubah dengan Undang-Undang Nomor 9 Tahun 2015. (2014).
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 25 Tahun 2004 tentang Sistem Perencanaan Pembangunan Nasional. (2004).
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. New York: United Nations.
- Wijaya, R., & Hardono, S. (2021). *Pemanfaatan total station dalam pemetaan topografi untuk perencanaan irigasi*.



Implementasi Monitoring Kadar Ozon untuk Meningkatkan Kualitas Air Minum Dalam Kemasan Berbasis *Internet Of Things*

Antoko Dwi Prasetyo¹ Adriana Anteng Anggorowati²

^{1,2} Program Studi Profesi Insinyur, Fakultas Teknik,
Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya 60112,
Indonesia

¹ PT Tirta Fresindo Jaya (Mayora Group)

✉ antoko.dp@gmail.com

Kebutuhan akan air minum dalam kemasan (AMDK) terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan kesadaran masyarakat terhadap kesehatan. Salah satu tahap penting dalam proses produksinya adalah ozonisasi yang berfungsi menjamin kualitas mikrobiologis air. Namun, pemantauan kadar ozon di industri masih banyak dilakukan secara manual sehingga tidak memberikan informasi secara real time dan berpotensi terlambat mendeteksi kondisi di luar spesifikasi. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan kadar ozon berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan memanfaatkan PHI Analyzer sebagai alat ukur utama. Keluaran analyzer dihubungkan ke Raspberry Pi 3B+ melalui *optocoupler* untuk menjaga isolasi listrik. Raspberry Pi diprogram menggunakan Python dan diintegrasikan dengan layanan Telegram bot agar dapat mengirimkan notifikasi otomatis ketika kadar ozon berada di luar ambang batas. Sistem ini tetap mempertahankan alarm lokal melalui *buzzer* bawaan analyzer sehingga keamanan ganda tetap terjaga. Hasil uji coba menunjukkan bahwa sistem bekerja sesuai dengan rancangan. Pada kondisi normal, *buzzer* tidak aktif dan tidak ada notifikasi yang dikirim, sedangkan ketika kadar ozon melebihi batas, *buzzer* menyala dan pesan peringatan segera diterima operator melalui Telegram. Implementasi ini terbukti praktis, aman, dan efektif untuk mendukung pengendalian mutu di industri AMDK, sekaligus mempercepat respons operator terhadap kondisi *out of specification*.

Kata kunci: Ozonisasi, Air Minum Dalam Kemasan, *Internet of Things*, PHI Analyzer, Raspberry P

Pendahuluan

Permintaan terhadap air minum dalam kemasan (AMDK) di Indonesia mengalami pertumbuhan yang signifikan dalam satu dekade terakhir. Peningkatan jumlah penduduk, urbanisasi, serta kesadaran masyarakat terhadap kesehatan dan higienitas menjadi faktor pendorong utama [1]. AMDK dipandang sebagai solusi praktis yang memenuhi aspek keamanan dan kemudahan distribusi, sehingga industri dituntut menjaga kualitas produknya secara konsisten. Oleh karena itu, aspek pengendalian mutu dan keamanan pangan pada AMDK tidak hanya menjadi kebutuhan konsumen, tetapi juga syarat penting bagi keberlangsungan industri dalam menghadapi persaingan global [2].

Salah satu metode yang banyak diterapkan dalam industri AMDK adalah ozonisasi. Ozon dikenal sebagai oksidator kuat yang mampu menginaktivasi mikroorganisme patogen dan meningkatkan kualitas organoleptik air [3]. Dalam penerapannya, efektivitas ozon sangat ditentukan oleh konsentrasi yang digunakan. Konsentrasi terlalu rendah dapat mengurangi efektivitas disinfeksi, sementara konsentrasi yang terlalu tinggi berisiko membentuk senyawa samping seperti bromat yang bersifat karsinogenik [4]. Regulasi nasional melalui SNI 3553:2015 menekankan pentingnya pengendalian kadar ozon agar berada dalam rentang yang aman, yaitu residu ozon saat pengisian botol sekitar 0,1–0,4 ppm. Dengan demikian, pemantauan ozon yang presisi menjadi faktor kritis dalam memastikan mutu dan keamanan AMDK [5].

Metode pengukuran kadar ozon pada industri AMDK masih banyak dilakukan secara manual dan periodik. Metode tersebut membutuhkan waktu dan tidak memberikan informasi secara *real time*, sehingga berpotensi terlambat dalam mendeteksi kondisi *out of specification* [6]. Perkembangan teknologi sensor dan *Internet of Things* (IoT) menghadirkan solusi baru melalui pemantauan otomatis dan berkesinambungan. Sensor ozon terlarut berbasis elektrokimia dapat diintegrasikan dengan mikrokontroler untuk memperoleh data secara langsung, yang kemudian dikirim melalui jaringan IoT menuju platform pemantauan. Sistem ini dapat ditambah dengan fitur notifikasi berbasis Telegram, sehingga operator dapat segera mengambil tindakan ketika kadar ozon berada di luar ambang yang ditentukan [7].

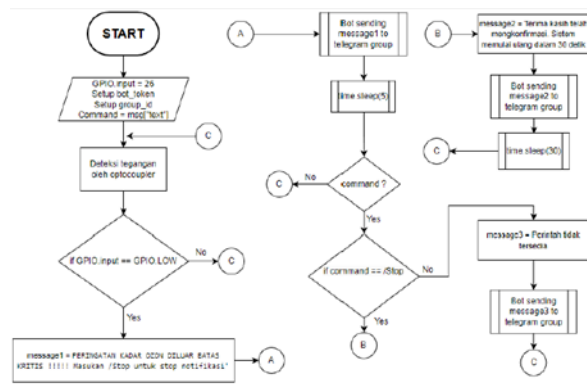
Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan memanfaatkan PHI Analyzer sebagai instrumen utama dalam mengukur kadar ozon terlarut pada proses produksi AMDK. PHI Analyzer mampu mendeteksi konsentrasi ozon secara berkelanjutan dan memberikan peringatan lokal melalui alarm *buzzer* apabila nilai pengukuran berada di luar spesifikasi [8]. Penelitian ini menambahkan pemantauan jarak jauh pada sistem PHI Analyzer yang sudah ada pada area ozon. PHI Analyzer berfungsi sebagai pengukur utama dan akan memicu *buzzer* saat kondisi ozon *out of specification*. Tugas tambahan penelitian adalah menangkap keluaran PHI Analyzer, lalu

meneruskan data ke *gateway* berbasis Raspberry 3B+. Notifikasi IoT hanya melengkapi sistem operasi agar operator dapat mengambil tindakan lebih cepat. Perangkat yang digunakan meliputi: (1) Raspberry Pi 3 Model B+, (2) *optocoupler*, (3) kabel *rainbow male female*, (4) kabel listrik, (5) 2x1.5MM 5 meter. Pembuatan *script* menggunakan bahasa pemrograman python, dan pembuatan bot pada Telegram menggunakan BotFather.

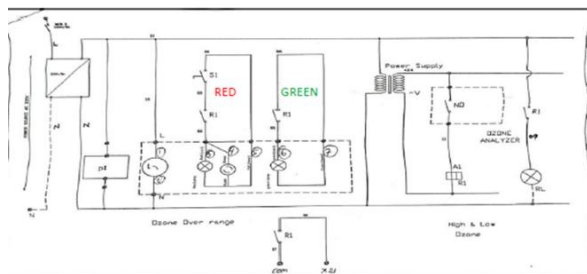
Hasil Kerja

Rangkaian sistem terdiri dari beberapa bagian utama. Phi Analyzer tetap menjadi alat ukur utama dan pengendali buzzer. *Optocoupler* dipasang untuk membaca sinyal keluaran dari analyzer tanpa menimbulkan risiko gangguan listrik. Sinyal tersebut diteruskan ke Raspberry Pi 3B+, yang bertugas memproses data dan menjalankan skrip Python untuk mengirim notifikasi lewat Telegram bot [9]. Untuk menggambarkan alurnya, sistem divisualisasikan dalam bentuk diagram dan *flowchart* sebagai berikut:



Gambar 1. Flowchart Proses Implementasi

Proses implementasi dilakukan dengan menghubungkan keluaran alarm dari Phi Analyzer ke *input optocoupler*. Dari sana, sinyal diteruskan ke Raspberry Pi 3B+. Dengan cara ini, Raspberry Pi 3B+ dapat mengetahui apakah *analyzer* sedang dalam kondisi normal atau *out of specification* [10].

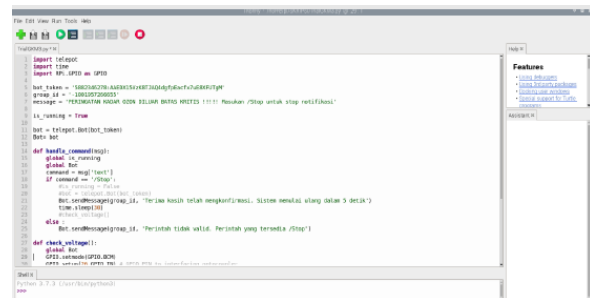


Gambar 2. Wiring Diagram dari Rangkaian Raspberry Pi 3B+ ke *Optocoupler*



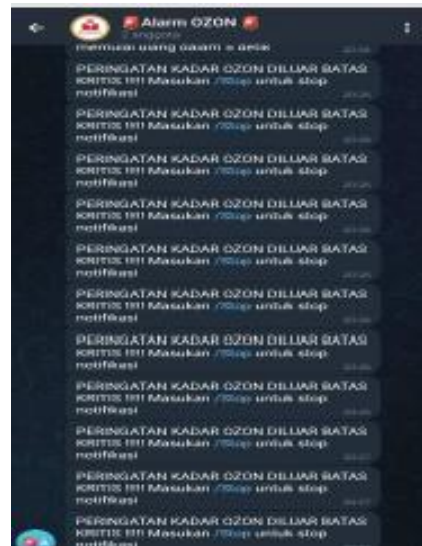
Gambar 3. Gambar Proses Implementasi Pemasangan Rangkaian Raspberry Pi 3B+ ke *Optocoupler* dan ke Phi Analyzer

Raspberry Pi 3B+ diprogram menggunakan Python. Program tersebut membaca sinyal, memeriksa apakah nilainya di luar rentang standar, lalu mengirim pesan ke Telegram [11]. Sistem juga tetap mengandalkan buzzer bawaan Phi Analyzer sebagai alarm lokal, sehingga keamanan ganda tetap terjaga.



Gambar 4. Script Python untuk Raspberry Pi 3B+

Pengujian dilakukan dengan dua skenario: (1) Saat kadar ozon masih sesuai standar maka *buzzer* tetap mati. Sistem IoT aktif membaca data, tetapi tidak mengirim notifikasi. Menunjukkan bahwa sistem tidak mudah memberikan alarm palsu. (2) Saat kadar ozon keluar dari batas yang ditentukan *buzzer* aktif sebagaimana mestinya. Raspberry Pi mendeteksi status ini melalui *optocoupler*. Notifikasi Telegram terkirim otomatis dan diterima operator dalam hitungan detik.



Gambar 5. Hasil *Trial* Saat Kadar Ozon Masih Sesuai

Dari percobaan yang dilakukan, sistem terbukti bekerja sesuai rancangan. Peringatan tetap diberikan secara lokal melalui *buzzer*, tetapi kini ada tambahan notifikasi digital yang bisa diterima operator meskipun berada di luar area produksi. Keuntungan ini membuat respons terhadap kondisi *out of specification* bisa lebih cepat. Penggunaan *optocoupler* terbukti penting karena mencegah adanya hubungan langsung antara perangkat kontrol (*Phi Analyzer*) dan Raspberry Pi. Dengan demikian, keamanan listrik tetap terjaga. Raspberry Pi juga terbukti cukup andal untuk menjalankan peran sebagai *gateway* IoT, menghubungkan data proses ke jaringan dan layanan Telegram.

Keterkaitan Proses Ozonisasi AMDK dengan SDG's

Penelitian ini membahas implementasi sistem monitoring kadar ozon berbasis *Internet of Things* (IoT) pada proses produksi AMDK. Sistem ini memanfaatkan sensor ozon, mikrokontroler, serta koneksi internet untuk mengirim dan menampilkan data secara *real-time* melalui platform digital. Dengan adanya sistem ini, kualitas air dapat dipantau secara terus-menerus sehingga proses desinfeksi lebih terkontrol, efisien, dan konsisten. Hasil implementasi menunjukkan bahwa *monitoring* kadar ozon berbasis IoT mampu meningkatkan kualitas air minum dalam kemasan, mengurangi risiko kontaminasi mikrobiologis, serta meningkatkan efisiensi operasional. Teknologi ini berkontribusi terhadap pencapaian SDG 6 (*Clean Water and Sanitation*), SDG 9 (*Industry, Innovation and Infrastructure*), SDG 12 (*Responsible Consumption and Production*), serta SDG 3 (*Good Health and Well-being*) [12].

Pemerintah Indonesia bersama Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) resmi meluncurkan Indonesia–United Nations Sustainable Development Cooperation Framework (UNSDCF) 2026–2030 dalam Forum Bappenas–PBB 2025 di Jakarta [13]. SDG 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur) didalam prakteknya bertujuan membangun infrastruktur yang tangguh, mempromosikan industrialisasi yang inklusif dan berkelanjutan, serta mendorong inovasi melalui peningkatan investasi dalam riset, teknologi, dan konektivitas internet.

Sustainable Development Goals (SDG's) atau Tujuan Pembangunan Berkelanjutan adalah program yang awal mulanya diinisiasi oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) pada tahun 2015. Tujuan dari program ini adalah untuk mengatasi tantangan global, yaitu guna mendorong perubahan berdasarkan prinsip hak asasi manusia serta memastikan kesetaraan dalam pembangunan sosial, ekonomi, dan lingkungan. Di dalam Program SDG's terdapat 17 (tujuh belas) *goals* atau tujuan yang meliputi berbagai aspek Pembangunan. Penggunaan teknologi IoT dalam proses produksi AMDK merupakan bentuk inovasi industri. Ini sejalan dengan target 9.4 dan 9.5, yaitu meningkatkan kualitas infrastruktur industri dan mendorong inovasi teknologi yang ramah lingkungan dan efisien.

Implementasi IoT menjadikan industri AMDK lebih modern, adaptif, dan berbasis data. Air minum yang aman dan layak merupakan kebutuhan dasar manusia dan menjadi salah satu fokus utama dalam agenda pembangunan global yang dikenal dengan *Sustainable Development Goals* (SDG's). Pada SDG's nomor 6,

dijelaskan bahwa dunia berkomitmen untuk menjamin ketersediaan dan pengelolaan air bersih yang berkelanjutan bagi semua. Salah satu bentuk penyediaan air minum yang banyak dikonsumsi masyarakat saat ini adalah Air Minum Dalam Kemasan (AMDK). Untuk menjamin kualitas AMDK, berbagai metode desinfeksi digunakan, salah satunya adalah ozonisasi. Ozon (O₃) dikenal sebagai oksidator kuat yang efektif membunuh mikroorganisme patogen tanpa meninggalkan residu berbahaya. Namun, kadar ozon yang tidak terkontrol dapat mengurangi efektivitas desinfeksi atau bahkan menurunkan kualitas air [14].

Oleh sebab itu, diperlukan sistem *monitoring* kadar ozon secara *real-time* agar proses ozonisasi berjalan optimal. Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan proses *monitoring* dilakukan secara otomatis dan terhubung dengan internet sehingga data dapat dipantau secara langsung dan berkelanjutan [15]. Implementasi *monitoring* kadar ozon berbasis IoT bukan hanya meningkatkan kualitas AMDK, tetapi juga berkontribusi terhadap pencapaian beberapa target SDG's. Di samping terkait dengan SDG's nomor 9 dan 6, peningkatan kualitas air minum dalam kemasan juga terkait dengan SDG's nomor 3, dan 12. SDG's nomor 3, *Good Health and Well-being*, air minum yang bebas dari mikroorganisme berbahaya sangat berpengaruh pada kesehatan masyarakat.

Dengan adanya kontrol kadar ozon yang optimal, risiko kontaminasi biologis dapat ditekan secara signifikan. Ini mendukung target 3.9, yaitu mengurangi penyakit akibat polusi air dan bahan berbahaya. Sedangkan SDG's nomor 12, *Responsible Consumption and Production*, *monitoring* kualitas air secara otomatis membantu menciptakan pola produksi yang lebih bertanggung jawab. Produksi air minum yang memenuhi standar kualitas berkontribusi pada target 12.4, yaitu pengelolaan bahan kimia dan limbah secara ramah lingkungan. Selain itu, konsumen juga mendapatkan produk yang lebih aman dan berkualitas tinggi.

Implementasi *monitoring* kadar ozon untuk meningkatkan kualitas air minum dalam kemasan berbasis *Internet of Things* (IoT) merupakan inovasi yang berperan penting dalam mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDG's). Teknologi ini berkontribusi langsung pada peningkatan akses air bersih (SDG 6), mendorong inovasi industri (SDG 9), menciptakan produksi yang bertanggung jawab (SDG 12), serta meningkatkan kesehatan masyarakat (SDG 3). Dengan demikian, penerapan teknologi *monitoring* kadar ozon berbasis IoT tidak hanya bernilai teknis dan ekonomis, tetapi juga memiliki nilai sosial dan lingkungan yang tinggi dalam rangka membangun masa depan yang berkelanjutan.

Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa sistem pemantauan kadar ozon berbasis *Internet of Things* (IoT) dapat berjalan dengan baik ketika diintegrasikan dengan *Phi Analyzer*. Integrasi ini tidak mengurangi fungsi utama analyzer, tetapi justru menambah kemampuan pemantauan jarak jauh yang sebelumnya belum tersedia. Sistem mampu mengenali kondisi normal maupun saat kadar ozon berada di luar batas

yang ditentukan, sementara alarm lokal tetap berfungsi sebagaimana mestinya.

Dari hasil uji coba, terlihat bahwa sistem mampu mengirimkan peringatan secara cepat melalui aplikasi Telegram, sehingga operator bisa segera mengetahui kondisi di lapangan meskipun tidak berada di area produksi. Penggunaan *optocoupler* juga terbukti penting karena dapat menjaga isolasi listrik, sehingga perangkat *analyzer* dan Raspberry Pi tetap aman digunakan secara bersamaan. Dengan capaian tersebut, sistem ini layak dipertimbangkan untuk diterapkan dalam industri air minum dalam kemasan (AMDK). Selain praktis dan aman, keberadaannya juga membantu mempercepat respons terhadap kondisi darurat. Ke depan, pengembangan dapat diarahkan pada pencatatan data historis dan tampilan *dashboard* visual agar proses pemantauan menjadi lebih komprehensif.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya disampaikan kepada:

1. PT Tirta Fresindo Jaya sebagai perusahaan tempat penulis bekerja;
2. Bapak Hery Soesanto selaku Corp.HR &GA yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk berkuliah di Prodi Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya;
3. Bapak Hariyadikanta selaku *Manufacturing Division Head* yang telah memberikan support dalam penelitian dan penyelesaian tugas ini;
4. Ibu Dra. Ir. Adriana Anteng Anggorowati, M.Si., IPU., ASEAN Eng, selaku dosen pembimbing yang dengan sabar membimbing penulis selama proses perkuliahan sampai akhir;
5. Orang tua, istri, anak penulis yang selalu mendampingi dan memberikan dukungan penulis dalam kondisi apapun selama proses perkuliahan ini;
6. Serta seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan prosiding seminar ini, mulai dari para Bpk/Ibu Dosen pemateri yang telah memberikan materi yang berkualitas, *reviewer* yang telah memberikan masukan yang berharga, hingga materi artikel ini dapat tersusun dengan baik dan dapat selesai tepat pada waktunya.

Referensi

- [1] von Gunten, U. (2018). Oxidation processes in water treatment: Are we on track? *Environmental Science & Technology*, 52(9), 5062–5075.
- [2] Badan Standardisasi Nasional. (2015). *SNI 3553:2015 air minum dalam kemasan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- [3] Masango, M. G., Pyo, S., & Lee, S. (2021). Ozonation for water treatment: Recent developments and challenges. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105317.
- [4] World Health Organization. (2017). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.). Geneva: World Health Organization.
- [5] Hasbullah, H., Widodo, S., & Prasetyo, D. (2020). Application of ozone in bottled drinking water treatment. *Indonesian Journal of Environmental Technology*, 11(2), 45–53.
- [6] Guo, Y., Zhang, L., & Chen, H. (2020). Advances in monitoring and control of ozone in drinking water treatment. *Water Research*, 170, 115343.
- [7] Rahman, F., Nugroho, A., & Fitria, D. (2021). Smart water monitoring system using IoT and Telegram bot notification. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(7), 567–574.
- [8] Raspberry Pi Foundation. (2018). *Raspberry Pi 3 Model B+ documentation*.
- [9] Putra, A., Hermawan, B., & Santoso, A. (2021). IoT-based monitoring system for industrial water treatment process. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 21(2), 1123–1131.
- [10] Rahman, A., Nugroho, S., & Santoso, D. (2021). Implementation of IoT-based water quality monitoring using MQTT. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- [11] Chen, L., Wang, J., & Zhang, Y. (2023). Industry 4.0 and digital twin technologies for smart manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 68, 143–157.
- [12] Sekretariat Nasional SDGs. (2025, September 4). Indonesia-PBB sepakati kerangka kerja sama baru untuk SDGs 2030. <https://sdgs.bappenas.go.id/indonesia-pbb-sepakati-kerangka-kerja-sama-baru-untuk-sdgs-2030/>
- [13] United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. New York: United Nations.
- [14] Rahayu, D., & Pratama, R. (2021). Pengaruh dosis ozon terhadap kualitas mikrobiologi air minum dalam kemasan. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 13(1), 25–32.
- [15] Siregar, M. I., & Nugroho, A. (2020). Pemanfaatan teknologi IoT dalam monitoring kualitas air secara real-time. *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, 8(2), 101–107.

Analisis Ekspansi Kernel Crushing Plant Kapasitas 600 Ton per Hari pada Perusahaan Ivo Mas Tunggal Site Lubuk Gaung Provinsi Riau – Indonesia

Okky Alexander Nababan¹, Rasional Sitepu²

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya
Mandala Surabaya

✉ okkyalex36@gmail.com

✉ rasional@ukwms.ac.id

KCP (*Kernel Crushing Plant*) merupakan hasil dari proses pemilihan biji kelapa sawit CPKO itu sendiri yang dapat menghasilkan beberapa bahan baru seperti minyak goreng, tepung, margarin dan lain – lain. Pada penelitian ini KCP memiliki 2 tahapan stasiun pressing yang berbeda fungsi disebut *First Pressing* dan *Second Pressing*. Tujuan kali ini penelitian diangkat dengan judul *Analisis Ekspansi Crushing Plant Kapasitas 600 Ton per Hari pada Perusahaan Ivo Mas Tunggal Site Lubuk Gaung Provinsi Riau – Indonesia*. Perusahaan ini melakukan ekspansi dikarenakan hasil dari KCP eksisting yang tidak dapat memenuhi permintaan pasar yang ada, sehingga perusahaan melakukan ekspansi KCP. Pada proses pengepresan kernel tersebut dapat mencapai 80% dari hasil buah. Ekspansi KCP ini dapat dikontrol dan dipantau melalui sistem *programming logic control* (PLC) yang dapat memantau seluruh mesin dengan baik. Ekspansi ini diharapkan mampu untuk memenuhi permintaan pasar yang begitu banyak, sehingga dapat meningkatkan perekonomian baik lokal maupun perusahaan itu sendiri.

Kata kunci: *Kernel Crushing Plant*, CPKO, Ekspansi, *Programming Logic Control*, Perekonomian Masyarakat

Pendahuluan

Indonesia merupakan negara agraris yang memiliki sektor pertanian yang begitu luas, khususnya pada perkebunan kelapa sawit. Peningkatan produksi kelapa sawit di Indonesia sangat signifikan mulai dari 42,9 juta Ton pada tahun 2018 menjadi 47,1 juta Ton pada tahun 2020 (Paramita & Ekawati, 2022). Kelapa sawit juga menjadi salah satu komoditas yang sangat penting yang memiliki banyak keturunan yaitu dapat menjadi minyak goreng, bahan baku margarin dan lainnya (Amalia et al, 2019).

KCP (*Kernel Crushing Plant*) yang merupakan pabrik kelapa sawit yang mengelola hasil buah sawit. Yang merupakan hasil akhir adalah PKO (*Palm Kernel Oil*) dan PKE (*Palm Kernel Extration*). Pada artikel kali ini penulis membuat studi proyek “Ekspansi KCP 600 Ton per Hari” dimana KCP ini memiliki 2 stasiun sistem untuk mengepres hasil PKO itu sendiri, yaitu stasiun *First Press* dan *Second Press* yang memiliki dua stasiun berbeda. Maka dari itu, perusahaan Ivo Mas Tunggal site Lubuk Gaung Provinsi Riau – Indonesia melakukan ekspansi kapasitas yang dimana permintaan pasar yang begitu tinggi dan luas.

Metode

Untuk metode yang digunakan dalam penelitian ini terdapat dua metode yang digunakan yaitu :

1. Prosedur Pengumpulan Data

Pada penelitian ini menggunakan pendekatan yang disebut dengan *Triangulasi Data* yang meliputi

- Data sekunder (dokumen) dimana data yang digunakan adalah laporan *feasibility study* (FS), Rencana Anggaran Biaya (RAB), dan data operasional pra & pasca ekspansi.
- Data primer (wawancara & observasi) merupakan data yang dilakukan wawancara yang mendalam

serta melakukan observasi langsung tata letak KCP dan Dokumentasi visual.

2. Analisis Kuantitatif

Pada metode ini digunakan untuk mengukur keberhasilan dalam proyek itu sendiri. Pada metode ini terdiri dari 3 yaitu :

- Kinerja proyek (EVM) yang dimana sebagai menghitung *schedule performance index* (SPI) dan *cost performance index* (CPI) yang memiliki nilai standar kriteria kesuksesan $CPI \geq 1$ dan $SPI \geq 1$.
- Kelayakan ekonomi (*post-mortem*) yang menghitung *Return On Investment* (ROI) serta *payback period* aktual.
- Kinerja Operasional (KCP) untuk menghitung *Oil Extraction Rate* (OER) dan *Overall Equipment Effectiveness* (OEE).

Dari hasil stasiun yang disebut *crude oil* dan *press cake* yang terdiri dari fiber dan nut. Fiber yang harus dipisahkan dari nuts dengan proses pemecahan di *ripple mill* agar mendapatkan efisiensi pemecahan yang lebih tinggi (minimal 95%) dengan kernel pecah (broken kernel) yang menjadi rendah. (Ismail et al, 2015).

Nama Mesin dan Peralatan di Stasiun Kernel

1. Depericarper

Mesin yang berfungsi untuk memisahkan biji (*nut*) dengan serabut/ampas (*fiber*) sehingga biji yang dikeluarkan dari drum mesin tersebut benar – benar bersih dari serabut/ampas (*fiber*). Berikut gambar dari mesin depericarper.



Gambar 1. Depericarper Machine

2. Nuts Polishing Drum

Pada mesin ini batu-batu kecil yang ada pada kernel beserta *nuts* akan diaduk-aduk di dalam *nuts polishing* dan mesin akan berputar sehingga batu-batu kecil tersebut akan jatuh melalui lubang-lubang dengan diameter sekitar 7 cm.



Gambar 2. Nut Polishing

3. Destoner Coulumn

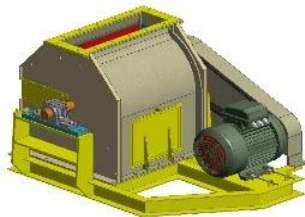
Pada mesin ini yang berfungsi untuk memisahkan antar batu-batu dengan *nuts*, dan batu-batu yang memiliki lebih berat yang akan jatuh ke bawah, sedangkan hanya *nut* yang masuk ke dalam *ripple mill*. Berikut gambar dari mesin *destoner coulumn*.



Gambar 3. Destoner Coulumn

4. Ripple Mill

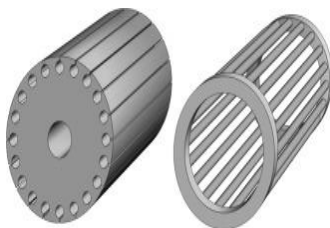
Mesin *ripple mill* sendiri memiliki beberapa bagian yang dapat menampung *nut hopper* terlebih dahulu. Berikut gambar mesin *ripple mill*.



Gambar 4. Ripple Mill

5. Rotor Bar

Mesin ini berfungsi untuk menggerakkan batang – batang besi yang berguna untuk memecahkan *nuts*. Berikut gambar dari rotor bar.



Gambar 5. Rotor Bar

6. Ripple Plate

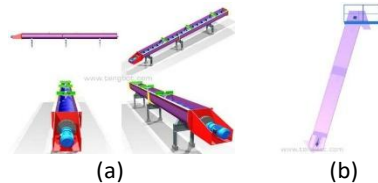
Di mesin *ripple plate* sendiri yang berfungsi diam dari plat yang bergerigi sebagai landasan *nut* agar proses pemecahan *nuts* itu sendiri bagus. Mesin *ripple plat* ini memecahkan *nuts* melalui rotor bar yang di atas *ripple plate* sehingga kernel akan lepas dari *shell*-nya. Berikut gambarnya.



Gambar 6. Ripple Plate

7. Cracked Mixture Conveyor and Elevator

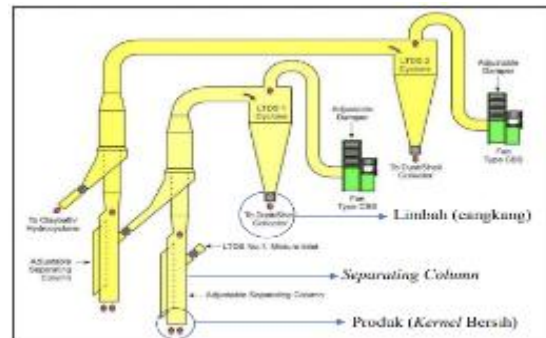
Pada mesin ini berfungsi untuk memindahkan dan menghantarkan biji setelah lepas atau pecah dari *ripple mill* dan bercampur dengan cangkang untuk diproses selanjutnya. Berikut gambar.



Gambar 7. (a) Cracked Mixture Conveyor
(b) Mixture Elevator

8. Light Tennera Distributing Saparator (LTDS)

Pada mesin ini berfungsi untuk memisahkan campuran antara kernel dan cangkang dengan menggunakan system yang berbeda dengan perbedaan berat antara kernel dan cangkang itu sendiri. Berikut gambar dari skema LTDS.



Gambar 8. Skema Light Tennera Distributing Separator (LTDS)

9. Sawit Pack

Mesin *sawit pack* yang berfungsi untuk menampung biji setelah dari LTDS, biasanya masih dapat sisa-sisa cangkang yang tidak ikut terhisap.

10. Claybath

Mesin ini berfungsi untuk memisahkan cangkang dan kernel dari *cracked mixture* (system LTDS) yang menggunakan campuran air, kalsium, karbonat dan tanah merah untuk proses pemisahan. Mesin ini memiliki perbedaan *specific gravity* antara cangkang dan kernel. Dimana campuran *specific gravity* (SP) 1,13 – 1,15 karena SG kernel < SG Kalsium karbonat, sedangkan pada cangkang SG > SG kalsium karbonat. Dimana yang memiliki SG lebih rendah dari SG CaCO₃.

11. Wet Kernel Conveyor dan Kernel Elevator

Yang berfungsi untuk menghantarkan kernel dalam *hopper* kernel elevator dan dari kernel elevator akan di angkut kedalam *silodrier*.

12. Silo Drier

Silo drier berguna untuk memanaskan kernel dengan kadar air (*moisture*) dapat mengurangi kernel. *Standard* yang digunakan *moisture* kernel itu sendiri memiliki 7% dari *temperature silo drier* yang mencapai 60°C sampai dengan 85°C. Berikut gambar *silo drier*.



Gambar 9. Silo Drier

13. Dry Kernel Conveyor dan Dry Kernel Elevator

Untuk menghantarkan kernel yang telah dipanaskan dari *silo drier* menuju bluk silo.

14. Bluk Silo

Kernel yang dimasukkan kedalam bluk silo ini yang telah dipanaskan dari *silo drier*. Kernel yang berada di bluk silo ini untuk menyimpan sementara dan akan dipasarkan. Berikut gambar bluk silo.

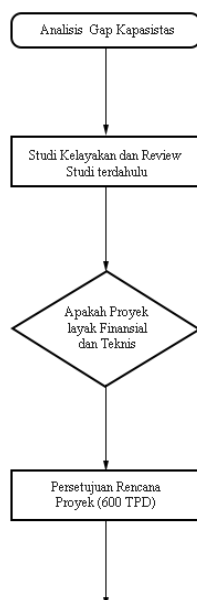


Gambar 10. Bluk Silo

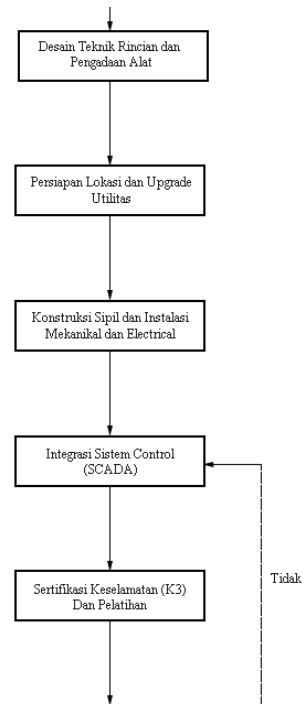
Flowchart KCP

Ini adalah *flowchart* untuk KCP yang terdiri dari inisiasi dan keputusan (*decision phase*), eksekusi dan implementasi (*execution phase*), serta *komisioning* dan penutupan (*closure phase*) (Uma Sekaran dan Roger Bougie, 2019).

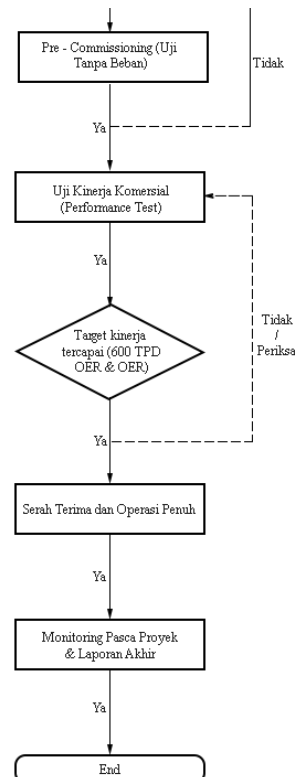
1. Inisiasi dan Keputusan (Decision Phase)



2. Eksekusi dan Implementasi (Execution Phase)



3. Komisioning dan Penutupan (Closure Phase)



Analisis dan Pembahasan Studi Kasus

1. Situasi Permasalahan

Pada situasi permasalahan ini jurang pemisah (*gap*) antara kondisi yang diharapkan (*target*) dan kondisi yang actual (*realisasi*) setelah proyek ekspansi selesai. Dalam situasi ini terdapat 3 isu yang menjadi utama yang saling berkaitan melibatkan proyek/manajemen operasional/

teknik dan finansial/ ekonomi. Berikut tabel masalah manajemen proyek.

Tabel 1. Masalah Manajemen Proyek

Indikator Kritis	Kondisi Diharapkan (Target FS)	Kondisi Aktual (Realisasi)	Gap/Masalah
Kinerja Biaya (CPI)	≥ 1.0 (Tepat Anggaran)	0,92 (Anggaran Terlampaui)	<i>Cost Overrun</i> (Pembengkakan Biaya) signifikan, dipicu oleh faktor eksternal (nilai tukar) dan kurangnya manajemen risiko yang memadai.
Kinerja Jadwal (SPI)	≥ 1.0 (Tepat Waktu)	0,85 (Terlambat 4 Bulan)	<i>Schedule Delay</i> (Keterlambatan) serius yang disebabkan oleh isu logistik (impor mesin) dan berdampak pada hilangnya potensi pendapatan (<i>opportunity cost</i>).

2. Analisis Ekspansi KCP 600TPD

Dalam analisis ekspansi KCP 600TPD memiliki beberapa analisis yang dapat meningkatkan proyek ekspansi berjalan dengan lancar yaitu :

1. Analisis Biaya (*Cost Performance*)

Pada kinerja biaya (*cost performance*) ini dapat dilihat dari nilai CPI yang mencapai *actual* 0,92 yang dapat mengindikasikan bahwa proyek mengalami pembengkakan biaya (*over budget*) yang mencapai sebesar 8%. Dimana pembengkakan utama disebabkan oleh fluktuasi nilai tukar rupiah terhadap mata uang asing saat pembelian peralatan import, serta penyesuaian harga kontrak subkontraktor local akibat keterlambatan. Berikut tabel yang dapat dilihat.

Tabel 2. Analisis Biaya Proyek

Metrik	Hasil Analisis	Pembahasan dan Implikasi
<i>Actual Cost</i> (AC)	Rp X Miliar	Total biaya aktual pada project dan termasuk <i>contingency</i> yang terpakai.
CPI (<i>Cost Performance Index</i>)	0,92	Analisis nilai dari $CPI < 1.0$ menunjukkan bahwa <i>project</i> mengalami pembengkakan biaya (<i>over</i>

budget) sebesar 8%.

2. Kinerja Jadwal (*Schedule Performance*)

Nilai SPI aktual yang ada mencapai 0,85 yang mengonfirmasikan bahwa proyek terlambat dari jadwal yang direncanakan.

- Durasi aktual : 24 Bulan (target awal 16 Bulan)
- Keterlambatan : Terjadi karena keterlambatan serius selama 8 bulan.

Keterlambatan ini disebabkan oleh isu logistik (impor mesin), faktor cuaca, dan manajemen *man power*. Keterlambatan ini berdampak langsung pada hilangnya potensi pendapatan (*opportunity cost*) yang menjadi kapasitas 600TPD. Inti dari masalah pada aspek manajemen adalah inefisiensi manajemen risiko dan pengadaan yang menyebabkan proyek terlambat dan melebihi anggaran yang telah ditentukan.

3. Analisis Kinerja Operasional Pasca – Ekspansi

Untuk analisis ini bernilai sangat berdampak nyata ekspansi terhadap efisiensi KCP. Analisis ini membuat kapasitas desain dengan target adalah 600 TPD. Throughput ini menjadi rata – rata yang akan dicapai pada 6 bulan pertama operasional yang mencapai target 585 TPD.

Kesimpulan

1. Dapat meningkatkan hasil produksi lebih banyak.
2. Peningkatan permintaan pasar yang begitu tinggi.
3. Mengontrol dan mengelola hasil produksi dengan baik.
4. Menjadi fundamental yang lebih stabil
5. Penerapan Kesehatan dan Keselamatan Kerja yang diterapkan dalam dunia proyek.
6. Meningkatkan perekonomian yang berada di sekitaran wilayah perusahaan.

Saran

1. Optimasi energi yang dilakukan studi lebih lanjut mengenai pemanfaatan limbah untuk energi termal boiler guna mengurangi biaya operasional itu sendiri.
2. Peningkatan mutu dimana untuk investasi yang berkelanjutan pada teknologi filtrasi untuk mencapai kualitas CPKO yang lebih tinggi (*Low FFA/Asam Lemak Bebas Rendah*) yang dapat membuka ekspor premium.
3. Pemeliharaan yang prediktif yang dapat menerapkan sistem pemeliharaan berbasis kondisi (CBM) untuk peralatan pengepresan baru guna menjaga keandalan operasional pada kapasitas penuh.
4. Menaati serta menjalankan *masterplan* yang telah dibuat untuk dapat menyelesaikan dengan baik.
5. Meningkatkan kinerja sumber daya manusia lebih optimal.

Ucapan Terimakasih

Dalam laporan studi kasus ini, penulis banyak menghadapi masalah dan kesulitan yang dialami, namun berkat bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak, baik berupa moral, informasi, maupun material. Oleh karena itu, sudah selayaknya penulis mengucapkan terimakasih kepada.

1. Bapak Dr. Ir. Ivan Gunawan S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng sebagai ketua program studi keinsinyuran Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya.



2. Bapak Ir. Rasional Sitepu, M.Eng., IPU., ASEAN Eng., Selaku Dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan dan saran dalam pembuatan dan penulisan laporan studi kasus ini.
 3. Bapak Dimas S.T. selaku *Site Manager* yang telah membantu banyak informasi tentang laporan studi kasus yang penulis angkat.
 4. Seluruh staf rekan kerja dan pegawai yang berada dalam proyek ekspansi KCP – Lubuk Gaung berlokasi Riau.
 5. Orang tua penulis yang tak pernah berhenti memberikan dukungan baik secara moral maupun material dalam penyusunan laporan studi kasus ini.
 6. Sahabat serta rekan–rekan kontraktor ataupun *client* sehingga penulis mendapatkan dukungan berupa informasi, dan dukungan moral yang disampaikan.
 7. Pasangan kekasih Veronica Agatha yang selalu memberikan dukungan dan waktu serta tukar pikiran dalam menyelesaikan laporan studi kasus ini.
 8. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan laporan studi kasus ini sampai akhir.
- Tengbot. *Model 3D ripple mill 8 ton*. Diakses dari <https://tengbot.com/model-3d-ripple-mill-8-ton.html>
- Tengbot. *Model 3D conveyor*. Diakses dari <https://tengbot.com/model-3d-cm-conveyo.html>
- Tengbot. *Kernel silo*. Diakses dari <https://tengbot.com/kernel-silo.html>
- Umar, H. (2005). *Studi kelayakan bisnis*. Gramedia Pustaka Utama.

Referensi

- Alexander Okky Nababan. (2025). *Laporan studi kasus ekspansi 600 TPH*. Dumai–Riau.
- Fleming, Q. W., & Koppelman, J. M. (2016). *Earned value project management* (Chapter 2).
- Kerzner, H. (1992). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling*. John Wiley & Sons.
- Laju. *Ripple mill*. Diakses dari https://www.laju.com/id/ripple_mills.php
- Made-in-China. (n.d.). *Japonica indica fragrant rice seeds destoner paddy seed stones separating machine*. Diakses dari <https://sanlimachine.en.made-in-china.com/product/snzYWqyHuRV/China-Japonica-Indica-Fragrant-Rice-Seeds-Destoner-Paddy-Seed-Stones-Separating-Machine.html>
- Mehrjou, M. R., Mariun, N., Marhaban, M. H., & Mison, N. (2011). *Rotor fault condition monitoring techniques for squirrel-cage induction machine—A review*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(8), 2827–2848. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.05.007>
- Meredith, J. R., Mantel Jr., S. J., & Shafer, S. M. (2011). *Project management: A managerial approach* (8th ed.).
- Musollian. (2020). *Kajian pengaruh kecepatan angin di light tenera dry separator terhadap kernel losses PKS Bumi Palma* (Tugas akhir, Institut Teknologi Sains Bandung).
- Prawirosentono, S. (2015). *Studi kelayakan proyek*. Bumi Aksara.
- Project Management Institute. (2017). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide)* (6th ed.).
- Putra Tunas Megah. *Nut polishing drum*. Diakses dari <https://putratunasmegah.web.indotrading.com/product/nut-polishing-drum-p684390.aspx>
- Sekaran, U., & Bougie, R. (2019). *Research methods for business: A skill-building approach* (8th ed.). Wiley.
- Sodimate Inc. *Bulk storage silos*. Diakses dari <https://sodimate-inc.com/bulk-storage-silos/>



Penentuan Dosis PAC dan Flokulan pada Proses Koagulasi–Flokulasi Limbah Cair Industri Karton Menggunakan Metode *Jar Test*

Stephanie Gracia Khangara¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ stephaniekg03@gmail.com

Pada proses produksi kotak karton gelombang di perusahaan manufaktur PT XYZ terdapat proses percetakan pada kotak karton gelombang menggunakan mesin *flexographic printing* yang memanfaatkan tinta berbasis air (*water-based ink*). Kegiatan pencucian unit pencetak menghasilkan limbah cair yang mengandung pigmen, dan partikel tinta yang menyebabkan warna dan kekeruhan tinggi. Di PT XYZ, hasil akhir pengolahan pada unit *waste water treatment plant* (WWTP) masih menunjukkan air olahan yang keruh dan tidak stabil, mengindikasikan proses koagulasi–flokulasi belum berjalan optimal. Penelitian ini bertujuan menentukan dosis baru koagulan *Polyaluminium Chloride* (PAC) dan flokulan dengan menggunakan metode *jar test* sebagai upaya peningkatan efektivitas pengolahan limbah cair di PT XYZ. Tiga rangkaian percobaan dilakukan menggunakan variasi dosis PAC 10–20% dari dua supplier berbeda serta flokulan 0,16–1%. Hasil menunjukkan bahwa kombinasi PAC 20% dari supplier B dengan flokulan 0,16% memberikan kejernihan terbaik, flok paling stabil, dan pH akhir 6,5. Implementasi dosis optimum pada skala penuh di WWTP menghasilkan peningkatan signifikan terhadap kualitas visual air olahan. Penelitian ini menegaskan pentingnya penentuan dosis berbasis karakteristik limbah aktual, serta perlunya verifikasi berkala untuk menjaga konsistensi operasional.

Kata kunci: *Jar Test*, Koagulasi–Flokulasi, PAC, Limbah Cair, *Flexographic*

Pendahuluan

Industri manufaktur adalah bidang usaha yang mengolah bahan mentah menjadi suatu produk yang bermanfaat (Amin & Rahmiati, 2018). Industri karton gelombang merupakan salah satu sektor manufaktur yang terus berkembang seiring meningkatnya kebutuhan kemasan untuk industri makanan, logistik, tekstil, dan *e-commerce*. Papan bergelombang ditemukan oleh Albert L. Jones pada tahun 1871 sebagai awal mula bentuk dari kertas karton gelombang (Fitas et al, 2023). Kotak karton bergelombang digunakan dalam banyak cabang berbagai industri, terutama untuk mengangkut barang atau produk dari satu tempat ke tempat lain (Garbowski et al, 2021).

Dalam proses produksinya, mesin *flexographic printing* (*flexo*) memegang peranan penting sebagai unit pencetak yang menggunakan tinta berbasis air untuk menghasilkan tulisan dan desain pada lembar karton. Meskipun dikenal lebih ramah lingkungan dibanding tinta berbasis pelarut organik, penggunaan tinta berbasis air tetap menghasilkan limbah cair dari proses pencucian *printing* unit. Limbah ini mengandung pigmen warna, binder, surfaktan, serta mikro-partikel tinta yang tidak mudah mengendap secara alami. Kandungan tersebut menyebabkan air limbah memiliki kekeruhan tinggi, intensitas warna kuat, dan potensi pencemaran apabila dibuang tanpa pengolahan.

Regulasi di Indonesia, khususnya Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014 mengenai baku mutu air limbah, mewajibkan industri untuk memastikan air limbah yang dibuang telah memenuhi

parameter kualitas tertentu. Pemenuhan baku mutu menjadi tantangan di industri karton karena fluktuasi kondisi limbah sangat dipengaruhi frekuensi pencucian mesin, jenis tinta, dan bahan kimia pembersih. Kondisi ini menuntut sistem WWTP yang stabil dan proses pengolahan yang mampu menangani variasi karakteristik limbah.

Berdasarkan hasil pengamatan awal di PT XYZ, air limbah yang telah melewati unit WWTP masih terlihat keruh dan mengandung partikel halus yang tidak terendapkan dengan baik. Hal ini menunjukkan bahwa proses koagulasi–flokulasi belum optimal, kemungkinan akibat dosis koagulan dan flokulan yang tidak sesuai, kualitas bahan kimia yang tidak konsisten, atau teknik pencampuran yang kurang sesuai. Koagulasi–flokulasi merupakan proses utama dalam pengolahan limbah yang bertujuan mengubah partikel koloid menjadi flok besar sehingga mudah dipisahkan melalui sedimentasi. Dalam konteks ini, pemilihan dosis optimum menjadi kunci keberhasilan proses.

Jar test merupakan suatu metode pengujian untuk mengetahui kemampuan suatu koagulan dan menentukan kondisi operasi (dosis) optimum pada proses penjernihan air dan air limbah (Coagulants et al, 2018). Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Coagulants et al (2018) dan Setyawan et al. (2025) menunjukkan bahwa *jar test* efektif dalam menurunkan kekeruhan dan warna serta meningkatkan efisiensi WWTP di berbagai industri. Pada penelitian oleh Setyawan et al (2025) menunjukkan penurunan BOD 71%, dan TSS 81% dengan dosis Optimum PAC 110mg/L (Setyawan et al, 2025).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi proses koagulasi–flokulasi di PT XYZ menggunakan metode *jar test* dengan variasi dosis PAC dan flokulan, membandingkan efektivitas bahan kimia dari beberapa *supplier*, serta menguji hasil terbaik pada skala penuh di WWTP PT XYZ. Proyek ini diharapkan dapat memberikan dasar teknis untuk meningkatkan performa pengolahan limbah cair secara berkelanjutan.

Metode

Metode penelitian mengacu sepenuhnya pada prosedur yang telah diterapkan dalam kegiatan *jar test* di PT XYZ. Tahapan metode meliputi identifikasi masalah, pengambilan sampel, pelaksanaan percobaan *jar test*, dan analisis hasil. Pada tahap identifikasi masalah, pengamatan awal dilakukan pada area *outlet* WWTP. Air olahan terlihat keruh, berwarna, dan terdapat partikel halus tidak terendapkan. Analisis visual menunjukkan terbentuknya flok yang kecil dan tidak stabil. Operator menyatakan bahwa proses pencampuran kimia belum sepenuhnya efektif, dan karakteristik limbah sering berubah mengikuti frekuensi pencucian mesin.

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental melalui uji *jar test* untuk menentukan kombinasi dosis koagulan dan flokulan yang paling efektif dalam meningkatkan kualitas air limbah pada WWTP. Sampel limbah diambil langsung dari saluran keluar air limbah pencucian mesin *flexo* dan dimasukkan ke dalam gelas reaksi berukuran 1 liter untuk diberi perlakuan berbeda. Bahan kimia yang diuji meliputi koagulan PAC dengan dua variasi konsentrasi, yaitu PAC 20% dan PAC 10% dari *supplier* A dan B, serta flokulan dengan beberapa variasi dosis mulai dari 1%, 0,8%, 0,5%, 0,18%, hingga 0,16%. Setiap kombinasi PAC–flokulan diaduk menggunakan alat *jar test* pada kecepatan cepat (*rapid mixing*) dan dilanjutkan pengadukan lambat (*slow mixing*) untuk memfasilitasi pembentukan flok. Setiap percobaan dilakukan dengan langkah berikut:

1. Masukkan 1 L sampel limbah ke gelas *jar test*.
2. Tambahkan PAC sesuai variasi.
3. Aduk cepat ± 5 menit untuk mendistribusikan koagulan.
4. Tambahkan flokulan sesuai dosis.
5. Aduk lambat ± 5 menit untuk pembentukan makroflok.
6. Diamkan hingga terbentuk endapan.

Setelah proses pengendapan, dilakukan pengamatan visual terhadap kondisi air, kejernihan, keberadaan kotoran mengambang, kestabilan endapan, serta karakteristik flok. Parameter pH juga diukur untuk memastikan kesesuaian dengan standar proses. Data kemudian dibandingkan antar percobaan, yaitu:

1. PAC 20% (*Supplier* A) dengan flokulan 1%, 0,8%, dan 0,5%;
2. PAC 10% (*Supplier* A) dengan flokulan 0,18%; dan
3. PAC 20% (*Supplier* B) dengan flokulan 0,16%.

Pengamatan dilakukan secara kualitatif (visual) dan kuantitatif (pH). Hasil terbaik ditentukan berdasarkan kejernihan, kestabilan endapan, warna, dan ketiadaan partikel mengambang. Hasil observasi digunakan untuk

menentukan dosis yang menghasilkan flok paling stabil, endapan paling mudah dipisahkan, dan kejernihan air terbaik sesuai kebutuhan operasional WWTP.

Hasil Kerja

Kondisi Awal Sistem WWTP PT XYZ

Sebelum pelaksanaan *jar test*, dilakukan observasi terhadap kondisi aktual sistem pengolahan limbah cair di PT XYZ. Limbah yang berasal dari proses pencucian mesin *flexo* memiliki karakteristik warna pekat, kekeruhan tinggi, partikel tinta halus, serta adanya surfaktan dan bahan pembersih yang membentuk larutan koloid. Kondisi ini menyebabkan partikel tersuspensi tidak mudah mengendap meskipun sudah melewati proses koagulasi–flokulasi pada unit WWTP.



Gambar 1. Hasil WWTP Awal

Pada titik *outlet* WWTP, air hasil olahan masih tampak keruh dan berwarna keabu-abuan seperti pada Gambar 1. Flok yang terbentuk terlihat kecil, ringan, dan mudah pecah, menandakan bahwa reaksi koagulasi tidak berjalan sempurna. Operator juga melaporkan bahwa kualitas air olahan sering berubah-ubah, terutama ketika frekuensi pencucian mesin meningkat atau jenis tinta yang digunakan berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memerlukan dosis kimia yang lebih adaptif terhadap variasi beban limbah. Secara keseluruhan, kondisi tersebut mengindikasikan bahwa proses pengolahan kimia perlu diperbaiki, khususnya pada tahap penentuan dosis koagulan dan flokulan yang digunakan.

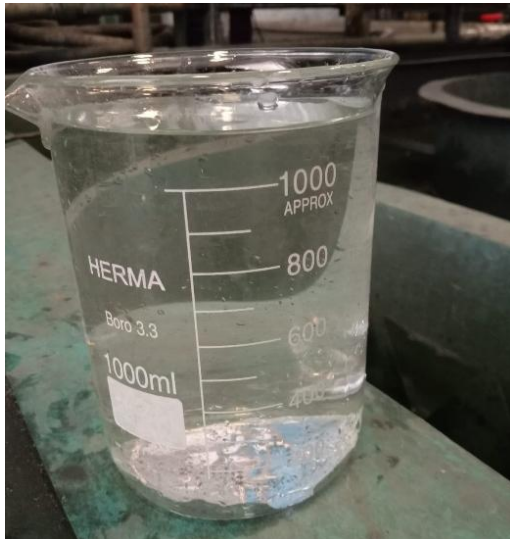
Hasil Percobaan *Jar Test*

Tiga percobaan *jar test* dilakukan menggunakan variasi dosis PAC dan flokulan dari dua *supplier* berbeda. Setiap percobaan menghasilkan karakteristik pengolahan yang berbeda, terutama pada kejernihan visual, warna, kestabilan flok, dan pH akhir dapat dilihat pada Tabel 1.

Melalui percobaan *jar test* yang telah dilakukan didapatkan bahwa percobaan ketiga merupakan dosis terbaik untuk diterapkan. Hasil uji laboratorium ini kemudian diterapkan pada skala besar di unit WWTP PT XYZ untuk mengetahui hasil dari perubahan dosis secara aktual. Penggunaan kombinasi dosis bahan kimia dengan PAC 20% dari *supplier* B dengan flokulan 0,16%, terbukti menghasilkan air olahan yang jauh lebih jernih dibanding kondisi sebelumnya. Perbandingan hasil pengolahan limbah WWTP secara skala besar dapat dilihat pada gambar 1 dan 2.

Tabel 10. Tabel Hasil Percobaan *Jar Test*

Percobaan	Perlakuan	Hasil Visual dan Observasi	pH
1 (PAC 20%)		Tidak ada kotoran mengambang pada air.	pH 5,5-5,8 (tidak standar)
	Flokulan 1%	Gagal, terlalu kental	
	Flokulan 0,8%	Gagal, terlalu kental	
	Flokulan 0,5%	Larutan keruh, flokulan tidak bisa menggumpal dengan baik.	
2 (PAC 10%)		Tidak ada kotoran mengambang.	pH 6,1-6,2
	Flokulan 0,18%	Kotoran menggumpal, flok padat dan berat, endapan stabil dan mudah dipisahkan	
3 (PAC 20%, supplier B)		Tidak ada kotoran mengambang, air lebih bening (tidak ada kotoran)	pH 6,5
	Flokulan 0,16%	Air lebih bening dari percobaan ke 2, gumpalan cenderung sama dan tidak mudah pecah.	



Gambar 2. Hasil WWTP Setelah Perbaikan

Analisis Teknis dan Manajerial

Analisis hasil *jar test* menunjukkan bahwa keberhasilan proses koagulasi-flokulasi tidak hanya ditentukan oleh besar kecilnya dosis, tetapi juga oleh kualitas bahan kimia yang digunakan dari *supplier* yang berbeda (A dan B). Percobaan pertama dan kedua yang menggunakan PAC dari *supplier* A memperlihatkan bahwa meskipun dosis koagulan cukup tinggi, kemampuan menetralkan muatan koloid dan membentuk flok kurang efektif. Hal ini terlihat dari terbentuknya flok ringan yang mudah terdispersi kembali saat proses pengadukan lambat. pH pada percobaan pertama dan kedua cenderung lebih asam dibandingkan percobaan ketiga yang berpotensi dapat mengganggu proses pengolahan selanjutnya. Dengan demikian, faktor kualitas koagulan, kandungan bahan aktif, ukuran partikel, serta stabilitas formulasi memainkan peranan penting dalam efektivitas proses pengolahan WWTP.

Sebaliknya, percobaan ketiga yang menggunakan PAC dari *supplier* B menghasilkan perubahan signifikan meskipun dosis flokulan lebih rendah. Hal ini menunjukkan adanya perbedaan karakteristik koagulan yang memengaruhi efisiensi reaksi kimia dalam air limbah. Secara teknis, PAC dengan kualitas lebih baik menghasilkan reaksi koagulasi yang lebih cepat, pembentukan mikroflok yang lebih homogen, dan penggabungan partikel yang lebih stabil hingga terbentuk makroflok yang padat. pH akhir 6,5 juga

menunjukkan bahwa koagulan tersebut bekerja dalam rentang pH optimal sehingga tidak menimbulkan perubahan ekstrem yang dapat mengganggu proses selanjutnya.

Dari sisi manajerial, penerapan hasil *jar test* skala laboratorium ke sistem aktual memberikan implikasi positif terhadap efisiensi operasional dan kepatuhan lingkungan. Tantangan implementasi di lapangan adalah menjaga konsistensi hasil ketika karakteristik limbah berubah, misalnya akibat perbedaan jenis tinta atau bahan pembersih ataupun perubahan kualitas bahan kimia yang diberikan oleh *supplier*, sehingga diperlukan perubahan dosis bahan kimia yang baru. Oleh karena itu, disarankan agar tim WWTP melakukan proses pemeriksaan hasil pengolahan WWTP untuk proses verifikasi secara berkala setiap kali ada perubahan bahan baku atau *supplier* kimia. Dengan penerapan yang disiplin dan pemantauan berkelanjutan, perusahaan dapat mempertahankan hasil pengolahan air limbah yang jernih, stabil, dan memenuhi baku mutu lingkungan serta standar keberlanjutan industri.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi dan percobaan yang dilakukan di unit pengolahan air limbah (WWTP) PT XYZ, dapat disimpulkan bahwa proses *jar test* berhasil menentukan kombinasi dosis optimum koagulan dan flokulan yang efektif dalam menurunkan kekeruhan serta memperbaiki warna limbah cair hasil pencucian mesin *flexo*. Dari serangkaian percobaan, kombinasi PAC 20% (*supplier* baru) dan flokulan 0,16% memberikan hasil terbaik dengan air olahan yang tampak jernih, flok yang padat serta tidak mudah pecah, dan pH akhir sebesar 6,5 yang mendekati kondisi netral.

Hasil analisis menunjukkan bahwa variasi dosis PAC dan flokulan memiliki pengaruh nyata terhadap tingkat kejernihan air limbah. Konsentrasi koagulan yang terlalu tinggi menyebabkan penurunan pH dan pembentukan flok yang tidak stabil, sedangkan penggunaan dosis yang tepat dapat menghasilkan flokulasi efektif yang mempercepat proses pengendapan partikel halus dan senyawa pewarna. Temuan ini menegaskan pentingnya penyesuaian dosis kimia berdasarkan karakteristik limbah dan kondisi proses aktual di lapangan.

Sebagai rekomendasi teknis, PT XYZ disarankan untuk menerapkan dosis PAC 20% dan flokulan 0,16% secara rutin pada sistem WWTP, disertai pengawasan pH dan visual kualitas air hasil olahan secara berkala. Selain itu, perlu dilakukan pelatihan bagi operator



terkait prosedur penyiapan bahan kimia, kontrol dosis, serta perawatan unit *mixing* agar proses koagulasi–flokulasi tetap stabil dan efisien. Implementasi hasil penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan kinerja sistem pengolahan limbah cair perusahaan, menghasilkan air olahan yang lebih jernih, dan mendukung kepatuhan terhadap standar lingkungan yang berlaku.

Ucapan Terimakasih

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat, berkat, dan karunia-Nya sehingga Prosiding Seminar Praktik Keinsinyuran dengan judul Penentuan Dosis PAC dan Flokulan pada Proses Koagulasi–Flokulasi Limbah Cair Industri Karton Menggunakan Metode *Jar Test* dapat diselesaikan dengan baik. Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT XYZ yang telah memberikan izin, fasilitas, dan dukungan selama pelaksanaan penelitian ini. Dalam penyusunan prosiding ini, penulis memperoleh bimbingan, dukungan, serta bantuan dari berbagai pihak. Dengan penuh hormat, penulis menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng. selaku Kepala Program Studi Program Studi Profesi Insinyur UKWMS, dan Dosen Pembimbing penulis.
2. Bapak Ir. Samuel Winata, S.T., IPM., ASEAN Eng. selaku Pembimbing Lapangan penulis.
3. Manajer Pabrik dan kepala produksi di PT XYZ.
4. Seluruh Bapak/Ibu Kepala Departemen, dan karyawan di PT XYZ.
5. Orang tua dan keluarga penulis.
6. Ivan selaku pasangan penulis.
7. Teman-teman penulis.

Penulis menyadari bahwa prosiding ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan guna penyempurnaan di masa mendatang.

Referensi

- Amin, G., & Rahmiati, F. (2018). Organizational commitment generasi X dan Y di industri manufaktur. *Jurnal Ilmu Komunikasi (J-IKA)*, 5(2), 139–146. <http://ejournal.bsi.ac.id/ejurnal/index.php/jika>
- Coagulants, C., Jar, U., & Method, T. (2018). Perbandingan koagulan hasil percobaan dengan koagulan komersial (comparison of experimental and commercial coagulants using jar test method). *Jurnal Teknik*, 14(1), 31–45. <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol14.No1.2018.387>
- Fitas, R., Schaffrath, H. J., & Schabel, S. (2023). A review of optimization for corrugated boards. *Sustainability*, 15(21). <https://doi.org/10.3390/su152115588>
- Garbowski, T., Gajewski, T., & Grabski, J. K. (2021). Estimation of the compressive strength of corrugated board boxes with shifted creases on the flaps. *Materials*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/en14041095>
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah.

Setyawan, T. K. A., Lolo, E. U., Sudaryantiningsih, C., & Widiyanto. (2025). Efektivitas variasi dosis koagulan PAC pada pengolahan limbah cair industri tahu untuk penurunan parameter BOD dan TSS (studi kasus: Industri tahu Dele Emas, Kampung Krajan, Kelurahan Mojosongo, Kota Surakarta). *Jurnal Teknik Lingkungan*, 1(1), 1–9.

Analisis Waktu dan Beban CPU SSH Server dengan Algoritma Kriptografi Berbeda (RSA, DSA, dan ECDSA)

Lotar Mateus Sinaga¹ Andrew Joewon²

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ lotarmateus88@gmail.com

✉ andrew_sby@ukwms.ac.id

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja algoritma kriptografi RSA, DSA, dan ECDSA pada SSH server, khususnya dalam hal waktu autentikasi dan penggunaan sumber daya CPU. Eksperimen dilakukan pada server berbasis Debian 10 dengan menginstal layanan OpenSSH. Pengujian melibatkan proses login SSH menggunakan kunci RSA berukuran 2048-bit, DSA 1024-bit, dan ECDSA 256-bit. Pengukuran waktu autentikasi dilakukan menggunakan perintah `time`, sedangkan pemantauan beban CPU dilakukan dengan perintah `pidstat`. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma ECDSA menghasilkan waktu autentikasi rata-rata tercepat, yaitu 0,72 detik, sedangkan RSA dan DSA masing-masing mencatat waktu 0,95 detik dan 1,23 detik. Selain itu, penggunaan CPU ECDSA tercatat lebih rendah dibandingkan algoritma lainnya. Kesimpulannya, ECDSA dinilai lebih efisien dalam penggunaan waktu autentikasi maupun konsumsi CPU, sehingga direkomendasikan untuk diimplementasikan pada sistem dengan keterbatasan sumber daya, seperti server berspesifikasi rendah atau perangkat IoT.

Kata kunci: SSH, RSA, DSA, ECDSA, Kriptografi, CPU, Debian

Pendahuluan

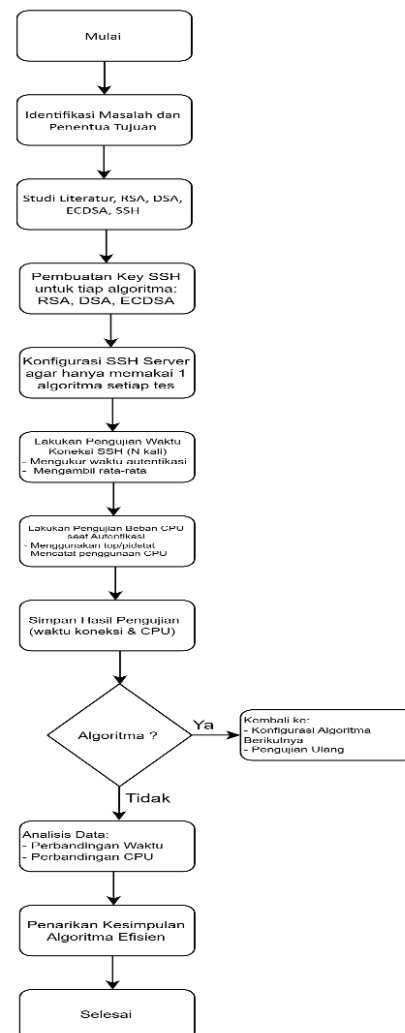
SSH (*Secure Shell*) merupakan protokol jaringan yang digunakan untuk komunikasi aman antara dua perangkat. Salah satu elemen penting dalam SSH adalah algoritma kriptografi untuk autentikasi pengguna. RSA, DSA, dan ECDSA merupakan algoritma yang umum digunakan. Pemilihan algoritma yang tepat dapat mempengaruhi performa sistem, terutama pada beban CPU dan waktu autentikasi. Penelitian ini berfokus pada analisis waktu autentikasi dan penggunaan CPU oleh SSH server saat menggunakan ketiga algoritma tersebut. Tujuannya adalah memberikan rekomendasi algoritma kriptografi yang optimal untuk digunakan pada SSH server, khususnya dalam lingkungan dengan keterbatasan sumber daya.

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas performa kriptografi secara umum, namun kajian spesifik terhadap implementasi SSH dengan RSA, DSA, dan ECDSA pada sistem Debian masih terbatas. Oleh karena itu, studi ini penting dilakukan sebagai bagian dari pengembangan sistem keamanan jaringan yang efisien.

Metode

1. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk membandingkan performa tiga algoritma kriptografi (RSA, DSA, dan ECDSA) pada layanan SSH Server. Eksperimen dilakukan dengan mensimulasikan koneksi SSH menggunakan masing-masing algoritma, lalu mengukur waktu proses dan beban CPU yang dihasilkan. Berikut ini adalah alur kerja untuk studi kasus ini.



Gambar 1. Flowchart Studi Kasus



2. Instalasi dan Konfigurasi SSH Server

- Sistem operasi : Debian 11
- *Update dan install* : openssh-server

```
root@debian:~# apt install openssh-server
Reading package lists... Done
Building dependency tree
Reading state information... Done
The following packages were automatically installed and are no longer required:
  libbrotli1:amd64 libbrotli1:arm64 libbrotli1:ppc64le libbrotli1:ppc64le
Use 'apt autoremove' to remove them.
The following additional packages will be installed:
  openssh-client openssh-sftp-server
Suggested packages:
  keychain libpam-ssh monkeysphere ssh-askpass molly-guard rssh
The following packages will be upgraded:
  openssh-client openssh-server openssh-sftp-server
3 upgraded, 0 newly installed, 0 to remove and 303 not upgraded.
Need to get 1,183 kB of archives.
After this operation, 13.3 kB of additional disk space will be used.
Do you want to continue? [Y/n] Y
```

Gambar 2. Proses Download SSH-Server-
Aktifkan

```
root@debian:~# systemctl enable ssh
Synchronizing state of ssh.service with SysV service script with /lib/systemd/systemd-
ysv-install.
Executing: /lib/systemd/systemd-ysv-install enable ssh
root@debian:~# systemctl start ssh
root@debian:~#
```

Gambar 3. Layanan SSH Cek Versi SSH

```
root@debian:~# ssh -v
usage: ssh [-46AaCfGgKkMNnqsTtVvXxy] [-B bind interface]
          [-b bind address] [-c cipher_spec] [-D [bind_address:]port]
          [-E log file] [-e escape char] [-F configfile] [-I pkcs11]
          [-i identity_file] [-J [user@]host[:port]] [-L address]
          [-l login name] [-m mac spec] [-O ctl cmd] [-o option] [-p port]
          [-Q query option] [-R address] [-S ctl path] [-W host:port]
          [-w local_tun[:remote_tun]] destination [command]
root@debian:~#
```

Gambar 4. Versi ssh

3. Pembuatan Kunci Kriptografi RSA (2048-bit): SSH-keygen -t rsa -b 2048

```
root@debian:~# ssh-keygen -t rsa -b 2048 -f ~/.ssh/id_rsa_test
Generating public/private rsa key pair.
Created directory '/root/.ssh'.
Enter passphrase (empty for no passphrase):
Enter same passphrase again:
Your identification has been saved in /root/.ssh/id_rsa_test.
Your public key has been saved in /root/.ssh/id_rsa_test.pub.
The key fingerprint is:
SHA256:VK3TcywKtAvr17hPitidTNe8u7VraCyBq5DF5dZUts root@debian
The key's randomart image is:
+---[RSA 2048]---+
|..+O..|
|+..O..|
|+O E..O|
|..+..+|
|..O+S..+|
|..O...O.O|
|..=O..+..|
|+..O++O..|
|O++B=====|
+---[SHA256]---+
root@debian:~#
```

Gambar 5. Kunci rsa- DSA (1024-bit): ssh-keygen -t dsa

```
root@debian:~# ssh-keygen -t dsa -b 1024 -f ~/.ssh/id_dsa_test
Generating public/private dsa key pair.
Enter passphrase (empty for no passphrase):
Enter same passphrase again:
Your identification has been saved in /root/.ssh/id_dsa_test.
Your public key has been saved in /root/.ssh/id_dsa_test.pub.
The key fingerprint is:
SHA256:kdP7zefr3KBA0q4fRq/XNw0dx+j7r1A/cGapIYyluk root@debian
The key's randomart image is:
+---[DSA 1024]---+
|O..|
|O..O|
|..+..|
|..+O..O|
|..+O..O|
|..+O..O|
|..+O..O|
|..+O..O|
|..+O..O|
|..+O..O|
+---[SHA256]---+
root@debian:~#
```

Gambar 6. Kunci DSA ECDSA (256-bit): SSH - keygen - t
ecdsa - b 256

```
root@debian:~# ssh-keygen -t ecdsa -b 256 -f ~/.ssh/id_ecdsa_test
Generating public/private ecdsa key pair.
Enter passphrase (empty for no passphrase):
Enter same passphrase again:
Your identification has been saved in /root/.ssh/id_ecdsa_test.
Your public key has been saved in /root/.ssh/id_ecdsa_test.pub.
The key fingerprint is:
SHA256:IS0axq49xP83T8D4krN2J3n25Q7frHwF5qRCG7u/fYU root@debian
The key's randomart image is:
+---[ECDSA 256]---+
|..+O..|
|+..O..|
|+O E..O|
|..+..+|
|..+O..O|
|..+O..O|
|..+O..O|
|..+O..O|
|..+O..O|
|..+O..O|
+---[SHA256]---+
root@debian:~#
```

Gambar 7. Kunci ECDSA

4. Penyalinan Kunci Publik ke Server

```
ssh-copy-id -I ~/.ssh/id_rsa user@ip-server
ssh-copy-id -I ~/.ssh/id_dsa user@ip-server
```

```
root@debian:~# ssh-copy-id -p 8080 -i ~/.ssh/id_rsa_test.pub root@192.168.10.2
/usr/bin/ssh-copy-id: INFO: Source of key(s) to be installed: "/root/.ssh/id_rsa
_test.pub"
/usr/bin/ssh-copy-id: INFO: attempting to log in with the new key(s), to filter
out any that are already installed
/usr/bin/ssh-copy-id: INFO: 1 key(s) remain to be installed -- if you are prompt
ed now it is to install the new keys
root@192.168.10.2's password:
```

Number of key(s) added: 1

Now try logging into the machine, with: "ssh -p '8080' 'root@192.168.10.2'"
and check to make sure that only the key(s) you wanted were added.

```
root@debian:~#
```

Gambar 8. Kunci publik RSA - SSH-copy-id -i
~/.ssh/id_ecdsa user@ip-server

```
root@debian:~# ssh-copy-id -p 8080 -i ~/.ssh/id_ecdsa_test.pub root@192.168.10.2
/usr/bin/ssh-copy-id: INFO: Source of key(s) to be installed: "/root/.ssh/id_ecd
sa_test.pub"
/usr/bin/ssh-copy-id: INFO: attempting to log in with the new key(s), to filter
out any that are already installed
/usr/bin/ssh-copy-id: INFO: 1 key(s) remain to be installed -- if you are prompt
ed now it is to install the new keys
root@192.168.10.2's password:
```

Number of key(s) added: 1

Now try logging into the machine, with: "ssh -p '8080' 'root@192.168.10.2'"
and check to make sure that only the key(s) you wanted were added.

```
root@debian:~#
```

Gambar 9. Kunci Publik ECDSA

5. Konfigurasi SSH Server

Edit file /etc/ssh/sshd_config dan tambahkan:
PubkeyAcceptedKeyTypes +ssh-rsa,ssh-
dss,ecdsa-sha2-nistp256

```
lucanstenef@debian: ~
File Edit View Search Terminal Help
GNU nano 3.2 /etc/ssh/sshd_config

AcceptEnv LANG LC_*

# override default of no subsystems
Subsystem sftp /usr/lib/openssh/sftp-server

# Example of overriding settings on a per-user basis
#Match User anoncvs
#    X11Forwarding no
#    AllowTcpForwarding no
#    PermitTTY no
#    ForceCommand cvs server
PubkeyAcceptedKeyTypes +ssh-rsa,ssh-dss,ecdsa-sha2-nistp256
HostKeyAlgorithms +ssh-rsa,ssh-dss,ecdsa-sha2-nistp256

G Get Help  O Write Out  W Where Is  X Cut Text  J Justify
X Exit      R Read File   R Replace  U Uncut Text  T To Spell
```

Gambar 10. Proses Konfigurasi ssh Server

6. Pengujian dan Pengumpulan Data

- a. Ukur waktu login: `time ssh -i ~/.ssh/id_rsa root@192.168.10.2 exit`



```
Activities Terminal Fri08:59
stefen@debian: ~
File Edit View Search Terminal Help
Last login: Fri Jul 4 08:56:10 2025 from 192.168.10.2
root@debian:~# time ssh -p 8080 -i ~/ssh/id_rsa test root@192.168.10.2 exit
Warning: Identity file /root/.ssh/id_rsa not accessible: No such file or director
y.
root@192.168.10.2's password:
real    0m4.351s
user    0m0.016s
sys     0m0.009s
root@debian:~# time ssh -p 8080 -i ~/ssh/id_ecdsa test root@192.168.10.2 exit
Warning: Identity file /root/.ssh/id_ecdsa not accessible: No such file or director
y.
root@192.168.10.2's password:
real    0m3.948s
user    0m0.008s
sys     0m0.017s
root@debian:~# time ssh -p 8080 -i ~/ssh/id_ecdsa test root@192.168.10.2 exit
Warning: Identity file /root/.ssh/id_ecdsa not accessible: No such file or direct
ory.
root@192.168.10.2's password:
real    0m2.990s
user    0m0.015s
sys     0m0.008s
root@debian:~#
```

Gambar 11. Hasil Pengujian Waktu RSA, DSA, ECDSA

b. Pantau CPU: pidstat -p \$(pgrep -x sshd) 1 5

```
root@debian:~# pidstat -p $(pgrep -x sshd)
Linux 4.19.0-16-amd64 (debian) 07/04/2025      _x86_64_      (4 CPU)
09:39:17 AM  UID      PID      %usr %system %guest %wait   %CPU   CPU   Command
09:39:17 AM    0       762      0.00  0.00  0.00  0.01   0.04    0    sshd
root@debian:~# pidstat -p $(pgrep -x sshd)
Linux 4.19.0-16-amd64 (debian) 07/04/2025      _x86_64_      (4 CPU)
09:39:59 AM  UID      PID      %usr %system %guest %wait   %CPU   CPU   Command
09:39:59 AM    0       762      0.00  0.00  0.00  0.01   0.03    0    sshd
root@debian:~#
```

Gambar 12. Pemantauan CPU

```
Activities Firefox ESR Fri14:51
Terminal - debian Problem loading page
https://localhost:9090/system/terminal
DEBIAN GNU/LINUX
lucanhistefen@debian: ~ Appearance: Black Reset
lucanhistefen@debian:~$ su -
Password:
root@debian:~# sudo nano /etc/ssh/sshd_config
root@debian:~# sudo systemctl restart ssh
root@debian:~# pgrep -x sshd
2604
root@debian:~# pidstat -p 2604 1 5
Linux 4.19.0-16-amd64 (debian) 07/04/2025      _x86_64_      (4 CPU)
02:51:23 PM  UID      PID      %usr %system %guest %wait   %CPU   CPU   Command
02:51:23 PM    0      2604      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
02:51:25 PM    0      2604      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
02:51:26 PM    0      2604      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
02:51:27 PM    0      2604      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
02:51:28 PM    0      2604      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
Average:     0      2604      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
root@debian:~#
```

Gambar 13. Hasil dari Penggunaan CPU RSA

```
Activities Firefox ESR Fri14:56
Terminal - debian Problem loading page
https://localhost:9090/system/terminal
DEBIAN GNU/LINUX
lucanhistefen@debian: ~ Appearance: Black Reset
Job for ssh.service failed because the control process exited with error co
de.
See "systemctl status ssh.service" and "journalctl -xe" for details.
root@debian:~# sudo nano /etc/ssh/sshd_config
root@debian:~# sudo systemctl restart ssh
root@debian:~# pgrep -x sshd
2676
root@debian:~# pidstat -p 2676 1 5
Linux 4.19.0-16-amd64 (debian) 07/04/2025      _x86_64_      (4 CPU)
02:56:02 PM  UID      PID      %usr %system %guest %wait   %CPU   CPU   Command
02:56:03 PM    0      2676      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
02:56:04 PM    0      2676      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
02:56:05 PM    0      2676      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
02:56:06 PM    0      2676      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
02:56:07 PM    0      2676      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
Average:     0      2676      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
root@debian:~#
```

Gambar 14. Hasil Penggunaan CPU DSA

```
Activities Firefox ESR Fri15:13
Terminal - debian
https://localhost:9090/system/terminal
DEBIAN GNU/LINUX
lucanhistefen@debian: ~ Appearance: Black Reset
lucanhistefen@debian:~$ su -
Password:
root@debian:~# sudo nano /etc/ssh/sshd_config
root@debian:~# sudo systemctl restart ssh
root@debian:~# pgrep -x sshd
3324
root@debian:~# pidstat -p 3324 1 5
Linux 4.19.0-16-amd64 (debian) 07/04/2025      _x86_64_      (4 CPU)
03:13:35 PM  UID      PID      %usr %system %guest %wait   %CPU   CPU   Command
03:13:36 PM    0      3324      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
03:13:37 PM    0      3324      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
03:13:38 PM    0      3324      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
03:13:39 PM    0      3324      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
03:13:40 PM    0      3324      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
Average:     0      3324      0.00  0.00  0.00  0.00  0.00    0    sshd
root@debian:~#
```

Gambar 15. Hasil Penggunaan CPU ECDSA

Hasil Kerja

Hasil penelitian ini menunjukkan perbedaan signifikan antara ketiga algoritma kriptografi (RSA, DSA, dan ECDSA) yang diuji pada koneksi SSH server. Pengujian dilakukan sebanyak lima kali untuk masing-masing algoritma dan menghasilkan rata-rata waktu dan penggunaan CPU seperti yang disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Rata-Rata Waktu Koneksi SSH

Algoritma	Waktu Rata-rata		
	Real	User	System
RSA	352s	016s	009s
DSA	048s	008s	017s
ECDSA	990s	015s	008s

Tabel 2. Penggunaan CPU

Algoritma	%Cpu
RSA	0,26
DSA	0,43
ECDSA	0,18

Kesimpulan

Penelitian mengenai perbandingan algoritma kriptografi pada SSH Server—RSA, DSA, dan ECDSA—menghasilkan sejumlah temuan penting terkait performa, efisiensi komputasi, serta dampaknya terhadap waktu proses dan beban CPU. Secara umum, setiap algoritma memiliki karakteristik unik yang memengaruhi kinerja server dalam proses autentikasi maupun pertukaran kunci.

1. Waktu Eksekusi

Hasil pengujian menunjukkan bahwa ECDSA memberikan waktu proses yang paling cepat dibandingkan RSA dan DSA. Kecepatan ini berasal dari desain algoritma ECDSA yang menggunakan kurva eliptik, sehingga mampu menghasilkan tingkat keamanan tinggi dengan ukuran kunci yang jauh lebih kecil. Sebagai contoh, kunci ECDSA 256-bit mampu memberikan tingkat keamanan yang setara dengan RSA 3072-bit. Dampaknya, proses *handshake* SSH dapat dilakukan lebih cepat dan *respons server* menjadi lebih efisien.

RSA, meskipun dikenal stabil dan aman, membutuhkan waktu eksekusi lebih lama terutama

pada ukuran kunci yang besar. Semakin besar ukuran kunci RSA, semakin besar pula perhitungan matematis yang dilakukan *server*, yang secara langsung memengaruhi waktu autentikasi. DSA cenderung memiliki performa waktu yang lebih baik dibanding RSA pada beberapa skenario, tetapi masih kalah cepat dibandingkan ECDSA. Selain itu, pembatasan penggunaan pada panjang kunci tertentu (umumnya 1024 bit) menjadikan DSA kurang relevan untuk standar keamanan modern.

2. Beban CPU

Dari aspek penggunaan CPU, algoritma ECDSA kembali menunjukkan efisiensi tertinggi. Penggunaan kunci yang lebih kecil menyebabkan komputasi lebih ringan sehingga beban CPU relatif rendah. Hal ini menjadikan ECDSA cocok diterapkan pada server dengan kapasitas terbatas atau perangkat IoT yang membutuhkan keamanan kuat namun tetap hemat sumber daya. RSA menghasilkan beban CPU yang paling tinggi terutama pada proses pembuatan kunci dan autentikasi awal. Hal ini disebabkan operasi matematis yang kompleks dan ukuran kunci yang besar. Beban CPU RSA meningkat seiring meningkatnya ukuran kunci, sehingga pada *server* bertrafik tinggi, RSA dapat menyebabkan *bottleneck* performa.

DSA menghasilkan beban CPU yang berada di antara RSA dan ECDSA. Meskipun lebih ringan dari RSA, DSA kehilangan relevansi karena standar keamanan modern menyarankan panjang kunci lebih besar, sedangkan DSA tidak mendukung ukuran kunci yang fleksibel.

3. Implikasi pada Keamanan dan Implementasi Server

Ketiga algoritma tersebut pada dasarnya menawarkan tingkat keamanan yang baik, namun perkembangan teknologi dan standar industri modern lebih mengarah pada penggunaan kurva eliptik (ECC), yang diimplementasikan melalui ECDSA. ECDSA tidak hanya lebih aman terhadap serangan *brute-force*, tetapi juga lebih hemat sumber daya.

RSA masih banyak digunakan karena kompatibilitas luas dan stabilitas historisnya. Namun demikian, kebutuhan modern yang menuntut efisiensi dan performa tinggi menjadikan ECDSA pilihan lebih unggul. DSA secara praktis semakin jarang digunakan karena keterbatasan fleksibilitas, tingkat keamanan, serta performa yang kurang optimal bila dibandingkan dengan dua algoritma lainnya.

4. Kesimpulan Umum Penelitian

Berdasarkan hasil analisis waktu eksekusi dan beban CPU, dapat disimpulkan beberapa poin utama:

1. ECDSA adalah algoritma paling efisien baik dari sisi waktu maupun beban CPU. Algoritma ini sangat cocok untuk *server* modern yang membutuhkan performa tinggi dan konsumsi sumber daya rendah.
2. RSA tetap menjadi algoritma yang kuat dan stabil, namun memiliki kekurangan pada efisiensi komputasi terutama ketika menggunakan kunci ukuran besar. RSA lebih cocok digunakan pada lingkungan yang mengutamakan kompatibilitas.
3. DSA semakin tergeser karena terbatasnya panjang kunci dan performa yang tidak lebih baik dibanding

RSA maupun ECDSA. Untuk standar keamanan saat ini, DSA kurang direkomendasikan.

4. Untuk implementasi SSH *Server* yang optimal, penggunaan ECDSA direkomendasikan sebagai pilihan utama, sedangkan RSA dapat digunakan sebagai *fallback* untuk kompatibilitas dengan sistem lama.

Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa pemilihan algoritma kriptografi pada SSH *Server* harus mempertimbangkan keseimbangan antara keamanan, waktu eksekusi, dan konsumsi sumber daya. ECDSA memberikan kombinasi terbaik dari ketiga aspek tersebut, sehingga layak dijadikan standar dalam konfigurasi SSH modern.

Ucapan Terimakasih

Dalam penyelesaian artikel ini, penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Ir. Andrew Joewono, S.T., M.T., IPU., ASEAN Eng., APEC Eng. selaku Dosen Pembimbing.
2. Ir. Rasional Sitepu, M.Eng., IPU., ASEAN Eng. selaku Dosen Pembimbing.
3. Semua pihak yang sudah yang sudah berpartisipasi dalam penulisan artikel ini.

Referensi

- Adams, C., & Lloyd, S. (2003). *Understanding PKI: Concepts, standards, and deployment considerations* (2nd ed.). Addison-Wesley.
- Bernstein, D. J. (2006). Curve25519: New Diffie–Hellman speed records. *Lecture Notes in Computer Science*, 3958, 207–228.
- Josefsson, S. (2006). *Authentication using SSH* (RFC 4252). Internet Society.
- Liu, Y., Meng, W., et al. (2019). A comparative study of performance and security of cryptographic algorithms on IoT devices. *IEEE Access*, 7, 122262–122275.
- National Institute of Standards and Technology. (2013). *Digital signature standard (DSS)* (FIPS PUB 186-4).
- OpenSSH. *SSH manual pages*. Diakses dari <https://man.openbsd.org/ssh>
- Smid, M., & Branstad, D. (1988). The data encryption standard: Past and future. *Proceedings of the IEEE*, 76(5).
- Stallings, W. (2017). *Cryptography and network security: Principles and practice* (7th ed.). Pearson.
- Ylönen, T., & Lonvick, C. (2006). *The secure shell (SSH) protocol architecture* (RFC 4251). Internet Society.

Analisis Penentuan Skala Prioritas Pembangunan Jalan Kabupaten di Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) Mandalika Menggunakan ANP

Henry Kadapi¹ Julius Mulyono¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ thekadapi75@gmail.com

Peningkatan infrastruktur jalan di wilayah penyangga Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) Mandalika menjadi prioritas strategis untuk memperkuat konektivitas dan pertumbuhan ekonomi di Kabupaten Lombok Tengah, namun keterbatasan anggaran menuntut penentuan prioritas yang selektif dan objektif. Penelitian ini bertujuan menetapkan skala prioritas peningkatan jalan kabupaten di sekitar KEK Mandalika dengan mempertimbangkan aspek teknis, sosial, ekonomi, biaya, dan aksesibilitas menggunakan metode *Analytic Network Process* (ANP). Data dikumpulkan melalui verifikasi lapangan dan kuesioner kepada para ahli untuk menilai tingkat kepentingan antar kriteria. Hasil menunjukkan bahwa aksesibilitas (bobot 0,40) merupakan faktor paling dominan, diikuti aspek sosial (0,38), teknis (0,097), ekonomi (0,09), dan biaya (0,02). Prioritas tertinggi diberikan kepada Ruas Tanak Beak-Gunung Tunak, kemudian Kelekuh-Pasung, Piang-Bun Mas, Pengembur-Mawun, Rembitan-Kedaron, dan Tumpak-Are Guling. Penerapan ANP terbukti efektif sebagai dasar pengambilan keputusan yang rasional dan transparan. Studi ini merekomendasikan penggunaan model ANP sebagai instrumen perencanaan berbasis bukti untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas Pembangunan Jalan Kabupaten.

Kata kunci: Prioritas Peningkatan Jalan, *Analytic Network Process* (ANP), Aksesibilitas, KEK Mandalika

Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur jalan memiliki peran yang sangat strategis dalam memperkuat konektivitas wilayah, mempercepat mobilitas, dan mendorong pertumbuhan ekonomi daerah. Di Kabupaten Lombok Tengah, pengembangan Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) Mandalika sebagai pusat pertumbuhan pariwisata nasional telah menjadikan wilayah ini sebagai simpul konektivitas utama antara sentra produksi, kawasan permukiman, dan destinasi wisata unggulan. Keberadaan infrastruktur jalan yang andal menjadi elemen penting dalam mendukung kegiatan ekonomi dan distribusi barang maupun jasa di wilayah sekitar kawasan tersebut.

Namun, kondisi eksisting menunjukkan bahwa sebagian besar ruas jalan kabupaten di kawasan penyangga KEK Mandalika masih berada dalam kondisi rusak atau belum beraspal, sehingga menurunkan efisiensi transportasi, aksesibilitas masyarakat, serta distribusi hasil ekonomi lokal. Permasalahan ini menjadi semakin kompleks karena keterbatasan anggaran pemerintah daerah tidak memungkinkan peningkatan seluruh ruas jalan secara bersamaan. Dalam situasi demikian, diperlukan mekanisme penentuan prioritas pembangunan jalan yang bersifat objektif, terukur, dan berbasis data teknis, agar intervensi pembangunan dapat diarahkan secara optimal pada ruas-ruas dengan dampak terbesar terhadap perekonomian dan konektivitas wilayah.

Permasalahan prioritas jalan tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga terkait dengan aspek sosial, ekonomi, dan pembiayaan. Penentuan prioritas yang tidak tepat

dapat berimplikasi pada pemborosan anggaran serta rendahnya efektivitas pembangunan. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan analitis yang mampu mengakomodasi keterkaitan antar faktor dan menghasilkan keputusan yang rasional. Dalam konteks ini, metode *Analytic Network Process* (ANP) digunakan sebagai pendekatan multi-kriteria yang mampu menganalisis hubungan timbal balik (interdependence) antar kriteria dan subkriteria. ANP merupakan pengembangan dari *Analytic Hierarchy Process* (AHP) yang diperkenalkan oleh (Saaty, 2001), dan dinilai lebih representatif dalam menggambarkan sistem yang kompleks seperti perencanaan infrastruktur jalan, di mana faktor teknis, biaya, sosial, ekonomi, dan aksesibilitas saling berpengaruh satu sama lain.

Sejumlah penelitian terdahulu menunjukkan efektivitas penerapan ANP dalam menentukan prioritas pembangunan infrastruktur. Syafei et al (2016) mengemukakan bahwa kondisi dan panjang jalan merupakan faktor dominan dalam menentukan prioritas peningkatan infrastruktur jalan kabupaten. Bauyaukyazc & Sucu (2003) menegaskan bahwa ANP mampu memberikan bobot objektif terhadap aspek teknis, sosial, dan ekonomi dalam proses perencanaan jalan daerah. Sementara itu, Simanjorang et al (2022) membuktikan bahwa kombinasi faktor biaya, lalu lintas, dan kondisi fisik jalan memiliki pengaruh signifikan terhadap urutan prioritas penangan jalan. Temuan-temuan tersebut menegaskan relevansi metode ANP dalam menghasilkan keputusan berbasis bukti (*evidence-based decision making*) di bidang infrastruktur.

Dalam konteks praktik keinsinyuran, proses penentuan prioritas pembangunan jalan merupakan bentuk penerapan prinsip rekayasa sistem (*systems engineering*) yang memerlukan integrasi antara data lapangan, analisis teknis, serta pertimbangan sosial dan ekonomi. Penelitian ini bertujuan untuk menyusun model penentuan prioritas peningkatan jalan kabupaten di kawasan penyangga KEK Mandalika secara sistematis dan berbasis data, dengan menggunakan metode *Analytic Network Process* (ANP). Tujuan utama penelitian ini adalah mengidentifikasi kriteria dan subkriteria yang paling berpengaruh dalam penentuan prioritas peningkatan jalan, menentukan bobot kepentingan antar kriteria melalui pendekatan ANP, serta menghasilkan rekomendasi ruas jalan prioritas yang dapat menjadi dasar pengambilan keputusan teknis bagi pemerintah daerah.

Ruang lingkup penelitian difokuskan pada jalan kabupaten di wilayah Kecamatan Pujut, Kabupaten Lombok Tengah, yang berfungsi sebagai penghubung antara sentra ekonomi masyarakat dengan kawasan strategis KEK Mandalika. Analisis dilakukan berdasarkan data teknis dan kondisi eksisting tahun 2024–2025, menggunakan hasil survei lapangan, data sekunder dari Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang (PUPR), serta data pendukung dari Bapperida Kabupaten Lombok Tengah. Aspek-aspek yang dianalisis meliputi kondisi teknis jalan, estimasi biaya peningkatan, aspek sosial dan ekonomi masyarakat, serta tingkat aksesibilitas terhadap fasilitas umum dan wilayah terpencil.

Melalui pendekatan ANP, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi empiris dan praktis bagi pengambil kebijakan di tingkat daerah dalam merumuskan prioritas pembangunan jalan secara objektif, rasional, dan selaras dengan arah pengembangan kawasan strategis nasional. Dari sisi keinsinyuran, studi ini menunjukkan bagaimana metode analitik dapat digunakan sebagai alat bantu dalam proses perencanaan dan pengambilan keputusan teknis di sektor infrastruktur, sehingga mendukung efisiensi penggunaan anggaran, peningkatan keselamatan transportasi, dan pemerataan pembangunan wilayah secara berkelanjutan.

Dalam perspektif pembangunan berkelanjutan, peningkatan kualitas infrastruktur jalan di kawasan penyangga KEK Mandalika juga sejalan dengan komitmen pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya SDG 9 (*Industry, Innovation, and Infrastructure*) yang menekankan pentingnya infrastruktur tangguh sebagai fondasi pertumbuhan ekonomi inklusif. Selain itu, penyediaan akses transportasi yang layak mendukung SDG 11 (*Sustainable Cities and Communities*) melalui pengurangan kesenjangan antarwilayah, peningkatan konektivitas permukiman terpencil, serta mendorong mobilitas yang efisien. Penguatan infrastruktur jalan diharapkan berkontribusi pada penurunan tingkat kemiskinan (SDG 1) dan peningkatan aktivitas ekonomi masyarakat (SDG 8) melalui akses yang lebih baik menuju pusat ekonomi, fasilitas layanan dasar, serta kawasan strategis nasional Mandalika.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memiliki relevansi teknis dalam menentukan prioritas pembangunan jalan, namun juga memuat dimensi keberlanjutan sebagai instrumen untuk memastikan bahwa pembangunan infrastruktur daerah berjalan inklusif, efektif, dan adaptif terhadap agenda pembangunan jangka panjang.

Metode

Penelitian ini menggunakan metode *Analytic Network Process* (ANP) yang dikembangkan oleh Saaty (2001) sebagai standar analisis multikriteria untuk menentukan bobot kepentingan antar kriteria yang saling berpengaruh dalam proses penentuan prioritas peningkatan jalan. Metode ini dipilih karena mampu memodelkan keterkaitan (*interdependence*) antar faktor teknis, sosial, ekonomi, biaya, dan aksesibilitas dalam jaringan penilaian.

Tahapan penelitian dimulai dengan identifikasi tujuan, yaitu menentukan prioritas peningkatan jalan kabupaten di kawasan penyangga KEK Mandalika. Berdasarkan studi terdahulu (Syafei et al, 2016). Baunyaikyazc & Sucu (2003) ditetapkan lima kriteria utama, yaitu kondisi dan dimensi jalan (teknis), estimasi kebutuhan peningkatan (biaya), kondisi sosial masyarakat, potensi ekonomi wilayah, serta tingkat aksesibilitas terhadap fasilitas umum dan kawasan terpencil. Hubungan antar kriteria tersebut kemudian dirumuskan dalam bentuk model jaringan ANP.

Penilaian tingkat kepentingan antar kriteria dilakukan melalui perbandingan berpasangan menggunakan skala fundamental Saaty (1–9). Data diperoleh dari kuesioner yang melibatkan responden ahli dari Bapperida, Dinas PUPR, dan Camat yang memahami kondisi infrastruktur lokal. Hasil penilaian diolah untuk membentuk supermatriks hingga mencapai limit *supermatrix* yang merepresentasikan bobot prioritas akhir. Bobot tersebut digunakan untuk menghitung nilai prioritas setiap ruas jalan dan menentukan urutan penanganan. Data primer penelitian berasal dari penilaian responden, sedangkan data sekunder diperoleh dari dokumen perencanaan daerah, peta jaringan jalan, serta data sosial ekonomi desa. Secara keseluruhan, metode ANP memberikan kerangka analisis yang objektif, terukur, dan berbasis bukti dalam penetapan prioritas pembangunan jalan daerah.

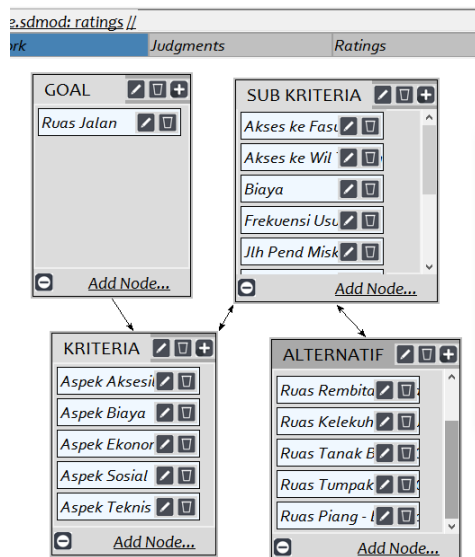
Dalam ANP, proses analisis dilakukan melalui beberapa tahap utama, yaitu penyusunan struktur jaringan, penyusunan matriks perbandingan berpasangan, normalisasi nilai, pembentukan supermatriks, serta perhitungan limit *supermatrix* untuk memperoleh bobot konvergen. Model ini membedakan diri dari *Analytic Hierarchy Process* (AHP), karena ANP tidak hanya memodelkan hubungan hierarkis, tetapi juga keterkaitan dan umpan balik antar elemen. Hal ini menjadi penting dalam penelitian infrastruktur jalan karena faktor teknis seperti kondisi perkerasan, panjang ruas, dan kebutuhan biaya sering kali saling memengaruhi dengan faktor sosial maupun ekonomi masyarakat lokal. Dengan memanfaatkan pendekatan jaringan, setiap faktor dapat dipertimbangkan secara

simultan sehingga bobot yang dihasilkan bersifat lebih komprehensif dan tidak bias.

Pengujian konsistensi dalam ANP dilakukan melalui nilai *Consistency Ratio* (CR), di mana $CR < 0,1$ menunjukkan bahwa hasil penilaian alternatif dianggap valid. Nilai konsistensi ini menjadi kunci pembuktian bahwa penilaian para ahli melalui kuesioner tidak bersifat acak maupun subjektif berlebihan. Hal ini juga memperkuat akurasi keputusan, terutama dalam konteks perencanaan infrastruktur yang memerlukan pertanggungjawaban teknis dan pertimbangan implikasi kebijakan jangka panjang.

1. Hasil Pengolahan Model ANP dan Interdependensi Kriteria

Seluruh proses analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak *Super Decisions*, yang merupakan standar dalam penelitian berbasis *Analytic Network Process* untuk menyusun model jaringan dan menghitung bobot prioritas melalui *supermatrix*. Perangkat lunak ini memungkinkan visualisasi hubungan antar kriteria dan subkriteria sehingga struktur sistem keputusan dapat dianalisis secara komprehensif. Pada Gambar 1 ditunjukkan model jaringan ANP yang menggambarkan interaksi timbal balik antar unsur penentu prioritas pembangunan jalan kabupaten.



Gambar 1. Model Jaringan *Software Super Decision*

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa elemen-elemen yang dianalisis saling berpengaruh satu sama lain. Kondisi fisik jalan memengaruhi besaran kebutuhan biaya peningkatkan, aksesibilitas menentukan tingkat perputaran ekonomi lokal, sementara peningkatan konektivitas terbukti memberi dampak pada kondisi sosial masyarakat. Temuan ini sejalan dengan teori sistem jaringan dalam pengambilan keputusan multikriteria, bahwa ANP mampu merepresentasikan interdependensi antar parameter penilaian secara dinamis dan objektif (Saaty, 2001).

Melalui penilaian perbandingan berpasangan menggunakan skala *fundamental* 1–9, diperoleh bobot

relatif masing-masing kriteria pada *supermatrix*. Bobot ini mencerminkan tingkat urgensi setiap aspek dalam menentukan prioritas penanganan jalan di kawasan penyangga KEK Mandalika.

Gambar 2. Matriks Perbandingan Berpasangan *Software Super Decision*

Selain memberikan bobot antar kriteria, hasil perbandingan berpasangan juga menunjukkan konsistensi pola penilaian para ahli dalam menilai keterkaitan antar faktor sistem. Hal ini tergambar melalui kesesuaian arah preferensi penilaian terhadap kriteria dominan seperti aksesibilitas dan sosial dibandingkan parameter biaya yang relatif lebih rendah urgensinya. Dengan demikian, proses pembobotan tidak hanya menjelaskan prioritas elemen dalam sistem, tetapi juga memperkuat validitas pendekatan ANP sebagai metode analitis yang mampu menggambarkan logika teknis dan pertimbangan strategis para ahli dalam merumuskan prioritas pembangunan infrastruktur jalan di tingkat daerah.

Gambar 3. Matriks Perbandingan Berpasangan Ruas Jalan Tanak Beak – Gn. Tunak

2. Pembobotan Kriteria dan Validasi

Tabel 1 di bawah ini menampilkan hasil bobot kriteria dan subkriteria yang diperoleh melalui pengolahan *supermatrix* ANP. Sebelum tabel ditampilkan, hasil ini merupakan *output* akhir bobot prioritas yang telah melalui proses normalisasi dan limit *supermatrix* sehingga bobot telah bersifat final dan konvergen.

Tabel 1 Bobot Kriteria dan Sub Kriteria

Kriteria	Bobot	Sub kriteria	Bobot
Aksesibilitas	0,401	Akses ke Fasum	0,265
Sosial	0,386	Akses ke Wil Terpencil	0,179
Teknis	0,098	Jlh Pend Miskin	0,163
Ekonomi	0,091	Tingkat Kemiskinan	0,108

Kriteria	Bobot	Sub Kriteria	Bobot
Biaya	0,024	Potensi Ekonomi Lokal	0,101
		Kondisi Jalan	0,062
		Frekuensi Usulan	0,049
		Panjang Jalan	0,029
		Biaya	0,027
		Lebar Jalan	0,018

Hasil analisis menunjukkan bahwa Aspek Aksesibilitas memperoleh bobot tertinggi (0,401), diikuti oleh aspek sosial (0,386), aspek teknis (0,098), aspek ekonomi (0,091), dan biaya (0,024). Dominannya aspek aksesibilitas selaras dengan literatur (Syafei et al, 2016). Husni et al (2024) menegaskan bahwa fungsi konektivitas jalan, kemudahan akses menuju fasilitas dasar, serta keterhubungan antarwilayah menjadi elemen kunci dalam pembangunan infrastruktur daerah.

Temuan bahwa aspek aksesibilitas menjadi kriteria dengan bobot terbesar menunjukkan adanya dorongan kuat bahwa pembangunan infrastruktur harus diarahkan untuk menghubungkan pusat-pusat kegiatan ekonomi masyarakat dan fasilitas publik strategis. Ketersediaan jalan yang layak menjadi faktor penentu peningkatan kualitas hidup, akses pendidikan, kesehatan, serta daya saing ekonomi lokal. Selaras dengan hal tersebut, kawasan hinterland Mandalika yang masih bergantung pada aktivitas pertanian dan UMKM memerlukan konektivitas yang kuat untuk mendorong perputaran ekonomi dan memperluas rantai pasok. Faktor aksesibilitas yang dominan juga menunjukkan bahwa infrastruktur transportasi yang baik akan mempercepat pengembangan kawasan baru, mempermudah investor, serta mendukung tercapainya target pembangunan wilayah Kabupaten Lombok Tengah.

Selain itu, bobot faktor sosial yang berada pada urutan kedua menunjukkan bahwa pembangunan jalan kabupaten bukan semata-mata proyek teknis, tetapi menyangkut kebermanfaatan bagi masyarakat luas. Ketersediaan infrastruktur yang layak dapat menurunkan tingkat kemiskinan, memperkuat aktivitas perekonomian berbasis komunitas, serta mendukung integrasi antar-desa. Pembangunan ruas prioritas pada penelitian ini juga diharapkan mampu memperbaiki disparitas pembangunan antarwilayah dan menjadi instrumen pemerataan pembangunan. Hal ini juga menjawab kebutuhan daerah dalam mengurangi kesenjangan layanan infrastruktur dasar di kawasan pedesaan.

Dari sisi kebijakan, hasil pembobotan ANP pada studi ini dapat digunakan sebagai komponen akademik dalam penyusunan Rencana Kerja Pemerintah Daerah (RKPD), Renja Dinas PUPR, serta bahan verifikasi teknis pada penyusunan *Dokumen Readiness Criteria* (RC) proyek jalan. Rekomendasi ruas jalan berdasarkan ANP dapat membantu pemerintah daerah dalam menentukan intervensi strategis yang tepat sasaran, menghindari bias politik anggaran, serta memperkuat rasionalitas alokasi sumber daya secara lebih terukur.

Penelitian ini sekaligus menunjukkan bahwa pendekatan kuantitatif dalam perencanaan dapat meningkatkan kualitas proses pengambilan keputusan infrastruktur yang lebih transparan dan akuntabel. Gambar 2 menunjukkan uji konsistensi menghasilkan nilai CR sebesar 0,046 ($< 0,1$), yang merefleksikan tingkat konsistensi penilaian para ahli berada dalam batas standar ANP.

3. Results	
Normal	Hybrid
Inconsistency: 0.04871	
Akses ke ~	0.23523
Akses ke ~	0.26907
Biaya	0.02979
Frekuensi~	0.05806
Jlh Pend ~	0.07705
Kondisi J~	0.04811
Lebar Jal~	0.02837
Panjang J~	0.04527
Potensi E~	0.11429
Tingkat K~	0.09476

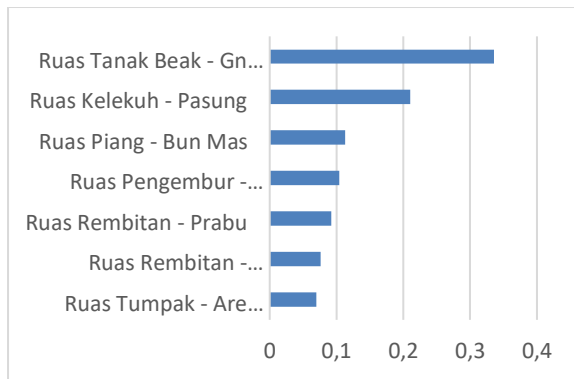
Gambar 4. Inconsistency Ruas Tanak Beak – Gn. Tunak

Uji konsistensi yang di tampilkan pada Gambar 4. Menunjukan nilai CR sebesar 0,0487 ($< 0,1$), yang merefleksikan tingkat konsistensi penilaian para ahli berada dalam batas standar ANP. Validasi lapangan melalui FGD bersama Dinas PUPR dan Bapperida juga memastikan bahwa bobot yang dihasilkan selaras dengan kondisi aktual serta arah kebijakan pembangunan daerah. Hal ini menambah tingkat reliabilitas ANP sebagai alat bantu teknis berbasis bukti (*evidence-based decision making*).

Ratings Unweighted Supermatriks													
Cluster	Sub-Cluster	Sub-Cluster	Sub-Cluster	Sub-Cluster	Sub-Cluster	Sub-Cluster	Sub-Cluster	Sub-Cluster	Sub-Cluster	Sub-Cluster	Sub-Cluster	Sub-Cluster	Sub-Cluster
ALTERNATIF	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
OASIS	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
SUB KETERANGAN	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Ruas Tanak Beak - Gunung	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Gambar 5. Ratings Unweighted Supermatriks Semua Ruas dan Kriteria

Berdasarkan bobot kriteria dan hasil agregasi nilai prioritas, diperoleh urutan ruas jalan dengan nilai total tertinggi hingga terendah, yaitu Tanak Beak – Gunung Tunak, Kelekuh – Pasung, Piang – Bun Mas, Pengembur – Mawun, Rembitan – Kedaron, dan Tumpak – Are Guling. Ruas Tanak Beak – Gunung Tunak ditetapkan sebagai prioritas utama karena memiliki nilai aksesibilitas tinggi, berperan penting dalam menghubungkan kawasan wisata Mandalika dengan area hinterland, serta memberikan dampak ekonomi signifikan terhadap aktivitas masyarakat lokal.



Gambar 6. Hasil Analisis Prioritas Ruas Jalan

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan metode *Analytic Network Process* (ANP) mampu memberikan kerangka analisis yang terukur, objektif, dan berbasis bukti dalam penentuan prioritas peningkatan jalan kabupaten di kawasan penyangga KEK Mandalika. Hasil pengolahan supermatrix membuktikan bahwa aspek aksesibilitas merupakan faktor paling dominan dalam mendukung kebutuhan peningkatan infrastruktur, diikuti aspek sosial, teknis, ekonomi, dan biaya. Temuan tersebut menegaskan bahwa intervensi pembangunan yang berorientasi pada peningkatan konektivitas menuju fasilitas publik dan wilayah terpencil memberikan dampak ganda dalam penguatan struktur sosial-ekonomi masyarakat.

Perhitungan nilai prioritas menunjukkan bahwa Ruas Tanak Beak–Gunung Tunak menjadi urutan utama peningkatan, diikuti ruas Kelekuh–Pasung, Piang–Bun Mas, Pengembur–Mawun, Rembitan–Kedaron, dan Tumpak–Are Guling. Uji konsistensi dan validasi teknis membuktikan bahwa bobot dan rekomendasi prioritas telah selaras dengan kondisi faktual dan arah pembangunan infrastruktur daerah. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar teknis yang transparan dan akuntabel dalam perencanaan pembangunan jalan strategis di Kabupaten Lombok Tengah.

Sebagai tindak lanjut, disarankan agar hasil prioritas ini diintegrasikan ke dalam dokumen perencanaan dan kebijakan daerah, khususnya RKPD dan Renja perangkat daerah terkait. Penelitian berikutnya dapat memperluas cakupan analisis dengan memasukkan faktor lalu lintas, potensi kawasan, serta perhitungan manfaat ekonomi secara kuantitatif. Selain itu, model ANP dapat dikembangkan lebih lanjut dengan kombinasi metode lain seperti GIS berbasis spasial atau pendekatan optimasi anggaran untuk meningkatkan kualitas rekomendasi keputusan teknik di sektor infrastruktur jalan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan pentingnya mengadopsi metode multikriteria seperti ANP untuk mendukung pembangunan infrastruktur yang tepat sasaran. Integrasi aspek teknis, sosial, ekonomi, biaya, dan aksesibilitas menghasilkan model perhitungan prioritas yang komprehensif dan adaptif terhadap dinamika wilayah penyangga KEK Mandalika. Temuan penelitian dapat menjadi pertimbangan teknis bagi pemangku kebijakan dalam menata ulang strategi

penanganan infrastruktur jalan secara bertahap dan berbasis bukti ilmiah. Dengan demikian, implementasi hasil analisis ANP dapat berkontribusi terhadap optimalisasi anggaran, peningkatan kualitas pelayanan infrastruktur publik, serta akselerasi pembangunan wilayah Kabupaten Lombok Tengah sebagai salah satu episentrum pertumbuhan ekonomi di Provinsi NTB.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah berperan penting dalam mendukung penyelesaian studi dan penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih secara khusus penulis sampaikan kepada Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas dukungan akademik dan fasilitas keilmuan yang diberikan selama proses penelitian. Penulis juga berterima kasih kepada Bapperida dan Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Kabupaten Lombok Tengah yang telah menyediakan data, informasi teknis, serta ruang diskusi dalam proses analisis prioritas pembangunan infrastruktur jalan.

Penghargaan mendalam penulis sampaikan kepada Bapak Ir. Julius Mulyono, S.T., M.T., CIOMP., IPM., ASEAN Eng., Bapak Dr. Ir. Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng, dan Ibu Cicilia atas bimbingan, arahan, dan masukan konstruktif yang sangat berarti dalam penyusunan artikel ini. Terima kasih yang tulus juga ditujukan kepada keluarga tercinta atas segala dukungan moral, doa, serta motivasi. Semoga kerja penelitian ini memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, praktik keinsinyuran, serta mendukung perencanaan pembangunan infrastruktur daerah yang lebih baik dan berkelanjutan.

Referensi

- Bauyaukyazc, M., & Sucu, M. (2003). The analytic hierarchy and analytic network processes. *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*, 32, 65–73. <https://www.hjms.hacettepe.edu.tr/uploads/49221df6-6484-4143-a95c-7e3336313629.pdf>
- Husni, H., Wesli, W., & Maizuar, M. (2024). Prioritas pembangunan infrastruktur jalan menggunakan analytical hierarchy process di Kabupaten Bireuen. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 14(2), 321. <https://doi.org/10.29103/tj.v14i2.1093>
- Saaty, T. L. (2001). Fundamentals of the analytic hierarchy process. Dalam *The analytic hierarchy process in natural resource and environmental decision making* (pp. 15–35). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9799-9_2
- Simanjorang, A., Perwira Mulia, A., & Anas, R. (2022). Prioritas penanganan jalan nasional menggunakan metode AHP dan ANP: Ruas jalan batas kota Rantau Prapat–Aek Nabara. *Jurnal Syntax Admiration*, 3(2), 297–313. <https://doi.org/10.46799/jsa.v3i2.386>
- Syafei, W. A., Kusnadi, K., & Surarso, B. (2016). Penentuan prioritas perbaikan jalan berbasis metode analytic network process sebagai komponen menuju kota cerdas. *Jurnal Sistem Informasi Bisnis*, 6(2), 105–113. <https://doi.org/10.21456/vol6iss2pp105-113>



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

Yusran¹ Andrew Joewono¹

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. 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 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.

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 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.

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](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.



Analisis SWOT Sederhana sebagai Kajian Strategis Penanganan Kerusakan Jalan Berdasarkan Data Sekunder

Khaerus Sobri¹ Julius Mulyono²

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya
Mandala Surabaya

✉ kasobri76@gmail.com

Peningkatan kualitas infrastruktur jalan merupakan faktor penting dalam mendukung konektivitas dan pertumbuhan ekonomi daerah. Namun, kerusakan dini pada perkerasan jalan masih menjadi permasalahan utama akibat beban lalu lintas berlebih, kurangnya pemeliharaan rutin, serta keterbatasan anggaran. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menerapkan metode Analisis SWOT sederhana sebagai alat bantu dalam manajemen risiko proyek jalan, dengan studi kasus pada ruas Jalan Cakranegara- Mantang, Lombok Barat. Analisis dilakukan untuk mengidentifikasi faktor internal dan eksternal yang memengaruhi kondisi jalan serta merumuskan strategi penanganan yang efektif dan berkelanjutan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan utama meliputi posisi strategis jalan dan ketersediaan data teknis, sedangkan kelemahan utamanya adalah kurangnya sistem pemeliharaan preventif dan tingginya beban kendaraan. Peluang utama terdapat pada dukungan kebijakan pemerintah dan penerapan teknologi digital seperti *RoadLab Pro*, sementara ancaman terbesar berasal dari keterbatasan anggaran dan faktor lingkungan. Strategi yang dihasilkan menekankan pentingnya pemanfaatan data teknis, kolaborasi lintas sektor, serta penerapan teknologi *weigh-in-motion* untuk mendukung sistem pemeliharaan jalan yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

Kata kunci: Analisis SWOT, Kerusakan Jalan, Manajemen Risiko, Pemeliharaan Preventif, Teknologi Digital

Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur jalan raya sangat penting untuk mendukung konektivitas dan pertumbuhan ekonomi suatu daerah. Namun, proyek konstruksi jalan sering menghadapi masalah kualitas, salah satunya kerusakan dini pada perkerasan jalan (Lamasi et al, 2025). Kerusakan ini tidak hanya merugikan dari segi biaya perbaikan yang tak terduga, tetapi juga mengancam umur layanan infrastruktur yang telah direncanakan (Jamal & Ian, 2025). Dalam kondisi proyek yang serba cepat, tim manajemen memerlukan alat analisis risiko yang tidak hanya akurat, tetapi juga praktis dan bisa segera digunakan di lapangan. Metode manajemen risiko yang rumit sering kali memakan waktu sehingga kurang efektif untuk mengatasi masalah yang mendesak.

Tujuan utama artikel ini adalah mengembangkan dan menerapkan Analisis SWOT dalam bentuk yang lebih sederhana untuk mendukung manajemen risiko pada proyek konstruksi jalan. Pendekatan ini menekankan pada analisis praktis terhadap kondisi proyek dengan cara mengidentifikasi secara cepat faktor internal dan eksternal yang berpotensi memicu kerusakan pada perkerasan jalan.

Metode

Artikel ini mengadaptasi metode perencanaan strategis, yaitu Analisis SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*), menjadi kerangka kerja yang lebih sederhana dan berorientasi pada tindakan nyata di lapangan. Metode ini digunakan untuk menilai kondisi jalan pada proyek tertentu dengan memetakan faktor internal (kekuatan dan

kelemahan) serta faktor eksternal (peluang dan ancaman) yang paling berpengaruh terhadap risiko kerusakan (Peginusa, 2025). Dengan membatasi analisis hanya pada faktor utama, proses pengambilan keputusan untuk mitigasi risiko bisa dilakukan lebih cepat dan terarah.

Hasil Kerja

Analisis SWOT (*Strenghts, Weaknesses, Opportunities, Threats*)

Analisis SWOT (*Strenghts, Weaknesses, Opportunities, Threats*) merupakan metode perencanaan strategis yang dapat digunakan untuk menganalisis faktor internal dan eksternal yang mempengaruhi penanganan kerusakan jalan. Hupi et al (2025), membahas tentang kondisi jalan Cakranegara-Mantang yang mengalami kerusakan akibat tingginya volume lalu lintas dan muatan kendaraan yang melebihi batas. Untuk memberikan pemahaman yang komprehensif, kasus tersebut dapat dianalisis menggunakan metode SWOT untuk memberikan gambaran yang jelas tentang kerusakan jalan dan rekomendasi penanganan yang sesuai.

Jalan Cakranegara-Mantang merupakan jalur yang penting dalam jaringan jalan, hal ini menunjukkan perlu dan pentingnya penanganan yang efektif. Hal ini dapat menjadi prioritas dalam alokasi sumber daya. Penggunaan metode penilaian kerusakan jalan seperti IRI dan SDI menyediakan data kuantitatif yang membantu dalam pengambilan keputusan. Data ini memungkinkan identifikasi jenis kerusakan dan tingkat keparahan secara objektif.

Adapun analisis SWOT untuk studi kasus tersebut ialah sebagai berikut:

a) Strengths (Kekuatan)

1. Jalur strategis dan vital secara ekonomi. Ruas jalan Cakranegara–Mantang termasuk jalan nasional kelas dua yang menjadi jalur utama distribusi barang dan jasa di Lombok Barat, menghubungkan pelabuhan Ampenan dan Lembar, serta akses menuju Lombok Utara. Hal ini menyatakan bahwa perbaikan jalan akan berdampak langsung pada kelancaran logistik dan ekonomi regional (Hupi et al, 2025).
2. Ketersediaan data survei dan evaluasi teknis. Penelitian ini sudah menghasilkan data kuantitatif kondisi jalan (IRI = 11,33 m/km; SDI = 108,55) yang menjadi dasar ilmiah untuk kebijakan perbaikan (Hupi et al, 2025). Hal ini memperkuat legitimasi teknis perencanaan rehabilitasi.
3. Pemanfaatan teknologi digital *RoadLab Pro* mempercepat proses survei dan pengumpulan data dengan biaya rendah (Hupi et al, 2025).
4. Adanya Rencana Anggaran Biaya (RAB) yang terukur. Nilai estimasi perbaikan sebesar Rp827.350.206,00 memberikan gambaran realistis bagi pemangku kebijakan dalam menentukan prioritas proyek jalan (Djojowiriono, 2005).

b) Weaknesses (Kelemahan)

1. Kondisi fisik jalan sudah mengalami kerusakan ringan–berat di lebih dari 50% segmen. Berdasarkan hasil IRI dan SDI, sekitar 51,16% segmen dikategorikan rusak berat dan 49,88% rusak ringan (Hupi et al, 2025). Hal ini menunjukkan kualitas struktur perkerasan yang menurun signifikan.
2. Beban lalu lintas melebihi kapasitas desain. Banyak kendaraan barang dengan muatan berlebih (*overload*) yang melintas, mempercepat kerusakan lapisan jalan (Nisumanti & Prawinata, 2020). Kondisi ini menunjukkan adanya kelemahan sistemik dalam pengelolaan transportasi jalan raya, khususnya pada aspek pengawasan dan penegakan hukum terhadap kendaraan bermuatan lebih.
3. Kurangnya sistem pemeliharaan rutin jangka panjang. Perawatan jalan umumnya baru dilakukan setelah kerusakan meluas, bukan secara periodik dan terencana. Kondisi ini menyebabkan pemborosan biaya karena pemeliharaan bersifat reaktif, bukan preventif.
4. Keterbatasan cakupan penelitian dan generalisasi. Studi hanya berfokus pada satu ruas (10 km), tanpa mempertimbangkan korelasi antara kondisi jalan, curah hujan, dan umur perkerasan (Zariah et al, 2022).

c) Opportunities (Peluang)

1. Penerapan teknologi digital dalam evaluasi jalan. Penggunaan *RoadLab Pro* dapat menjadi model bagi digitalisasi sistem *monitoring* jalan di NTB dan Indonesia, mempercepat deteksi dini kerusakan (Hupi et al, 2025).
2. Dukungan program pemerintah pusat terhadap infrastruktur daerah. Program pembangunan konektivitas nasional membuka peluang pendanaan tambahan untuk rehabilitasi jalan strategis antar-pelabuhan.
3. Kolaborasi akademik, industri, dan pemerintah daerah. Potensi sinergi antara lembaga penelitian,

PUPR, dan universitas untuk mengembangkan metode pemeliharaan jalan yang efisien dan berbasis data.

4. Peningkatan kesejahteraan masyarakat sekitar. Perbaikan jalan akan memperlancar mobilitas barang dan manusia, menurunkan biaya transportasi, dan meningkatkan akses ekonomi lokal (Prayugo et al, 2019).

d) Threats (Ancaman)

1. Tingkat pelanggaran *overload* yang masih tinggi. Selama belum ada pengawasan muatan kendaraan yang ketat, jalan akan terus mengalami kerusakan dini meski sudah diperbaiki (Nisumanti & Prawinata, 2020).
2. Keterbatasan anggaran pemerintah daerah. Biaya rehabilitasi yang tinggi tidak sebanding dengan kapasitas fiskal daerah, menyebabkan pemeliharaan tertunda dan memperparah kerusakan.
3. Faktor iklim dan lingkungan. Curah hujan tinggi dan sistem drainase yang kurang baik dapat mempercepat degradasi lapisan perkerasan jalan, terutama pada area dataran rendah.
4. Ketergantungan pada teknologi asing. Aplikasi seperti *RoadLab Pro* dikembangkan oleh pihak luar negeri (*World Bank & Softeco*), yang bisa menghadirkan kendala pembaruan sistem atau kompatibilitas jangka panjang.

Interpretasi Strategis

Dari hasil analisis SWOT di atas, dapat disimpulkan beberapa implikasi strategis:

- 1) Strategi SO (*Strength – Opportunity*): Mengoptimalkan data hasil penelitian dan posisi strategis jalan untuk menarik pendanaan pusat dalam pengembangan sistem pemeliharaan berbasis digital.
- 2) Strategi WO (*Weakness – Opportunity*): Mengatasi keterbatasan pemeliharaan dan *overload* kendaraan dengan menerapkan teknologi pemantauan beban (*weigh-in-motion*) serta melibatkan akademisi lokal.
- 3) Strategi ST (*Strength – Threat*): Memanfaatkan kekuatan data teknis dan dukungan institusional untuk menekan ancaman eksternal seperti cuaca dan *overload* melalui kebijakan pengendalian transportasi.
- 4) Strategi WT (*Weakness – Threat*): Meminimalkan dampak anggaran terbatas dan kondisi iklim dengan pendekatan *preventive maintenance* menggunakan bahan aspal adaptif dan sistem deteksi dini kerusakan.

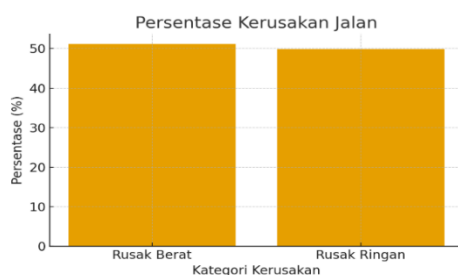
Analisis Kuantitatif Kondisi Jalan

Berikut ditampilkan tabel dan grafik yang menggambarkan persentase kerusakan jalan sebagai hasil analisis kondisi ruas Cakranegara–Mantang.

Tabel 1. Kondisi Kerusakan Jalan

Aspek	Hasil Analisis
Kondisi Ruas Jalan	Jalan Cakranegara – Mantang merupakan jalur strategis dan vital secara ekonomi yang mendukung distribusi barang dan jasa di Lombok Barat.

Data Teknis Utama	Nilai kondisi jalan: IRI = 11,33 m/km dan SDI = 108,55, yang menunjukkan kualitas perkerasan menurun signifikan.
Tingkat Kerusakan Jalan	Lebih dari 50% segmen mengalami kerusakan: 51,16% rusak berat dan 49,88% rusak ringan.
Faktor Kelemahan Utama	Beban kendaraan <i>overload</i> , pemeliharaan bersifat reaktif, dan belum adanya sistem pemeliharaan preventif yang konsisten.
Peluang Perbaikan	Adanya teknologi digital seperti <i>RoadLab Pro</i> , dukungan pemerintah, serta potensi kolaborasi antara akademisi–industri–pemerintah.
Ancaman Utama	Pelanggaran muatan berlebih yang tinggi, keterbatasan anggaran, serta faktor iklim dan kondisi drainase yang mempercepat kerusakan jalan.
Arah Strategi Perbaikan	Pemanfaatan data teknis, digitalisasi pemeliharaan, teknologi <i>weigh-in-motion</i> , serta pengawasan ketat terhadap kendaraan <i>overload</i> .
Kesimpulan Umum	Metode SWOT sederhana efektif untuk mengidentifikasi risiko dan arah strategi. Kombinasi pemeliharaan preventif, teknologi digital, dan penegakan hukum menjadi kunci pengelolaan jalan yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan.



Gambar 1. Grafik persentase kerusakan jalan

Kesimpulan

Artikel ini bertujuan untuk mengembangkan dan menerapkan Analisis SWOT dalam bentuk sederhana sebagai kerangka kerja praktis untuk mengidentifikasi risiko dan merumuskan strategi penanganan kerusakan jalan pada proyek konstruksi, khususnya pada ruas jalan Cakranegara-Mantang. Analisis ini berhasil memetakan faktor internal dan eksternal yang paling berpengaruh terhadap risiko kerusakan perkerasan jalan.

Hasil analisis pada studi kasus ruas jalan Cakranegara-Mantang menunjukkan:

- 1) Ruas jalan tersebut merupakan jalur strategis dan vital secara ekonomi yang mendukung distribusi barang dan jasa. Penelitian telah menghasilkan data kuantitatif kondisi jalan (IRI=11,33 m/km, SDI =108.55) yang menjadi dasar ilmiah bagi perencanaan perbaikan. Selain itu, adanya

pemanfaatan teknologi digital seperti *RoadLab Pro* mempercepat proses survei.

- 2) Lebih dari 50% segmen jalan telah mengalami kerusakan ringan hingga berat (51,16% rusak berat dan 49,88% rusak ringan). Kelemahan utama adalah beban lalu lintas yang melebihi kapasitas desain (*overload*), serta kurangnya sistem pemeliharaan rutin jangka panjang yang menyebabkan pemeliharaan bersifat reaktif dan tidak preventif.
- 3) Terdapat peluang melalui penerapan teknologi digital seperti *RoadLab Pro* yang dapat menjadi model untuk digitalisasi sistem monitoring jalan. Selain itu, terdapat dukungan program pemerintah pusat untuk infrastruktur daerah dan potensi kolaborasi antara akademisi, industri, dan pemerintah daerah untuk mengembangkan metode pemeliharaan berbasis data.
- 4) Ancaman utama meliputi tingkat pelanggaran *overload* yang masih tinggi, yang akan mempercepat kerusakan ini meskipun sudah diperbaiki. Ancaman lainnya adalah keterbatasan anggaran pemerintah daerah yang dapat menunda pemeliharaan, serta faktor iklim dan lingkungan seperti curah hujan tinggi yang mempercepat degradasi perkerasan.

Hasil interpretasi strategis menunjukkan bahwa peningkatan pemeliharaan jalan perlu difokuskan pada pemanfaatan data teknis dan teknologi digital untuk mendukung sistem pemeliharaan preventif. Kolaborasi lintas sektor serta penerapan teknologi seperti *weigh-in-motion* dapat membantu mengatasi keterbatasan anggaran dan beban lalu lintas berlebih, sehingga tercipta sistem pemeliharaan jalan yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

Secara keseluruhan, penerapan metode SWOT sederhana ini efektif dalam memberikan gambaran komprehensif mengenai kondisi proyek dan merekomendasikan intervensi strategis yang mengembangkan penegakan hukum, alokasi anggaran yang memadai, dan implementasi teknologi pemantauan jalan.

Ucapan Terimakasih

Terima kasih kepada civitas akademik program studi profesi insinyur, pembimbing, serta karyawan karyawan Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Provinsi Nusa Tenggara Barat khususnya Bidang Bina Jasa Konstruksi.

Referensi

- Djojowiriono, S. (2005). *Manajemen konstruksi* (Edisi keempat). Yogyakarta: Teknik Sipil UGM.
- Hupi, P. M., Rokhmawati, A., & Bakhtiar, A. (2025). Studi analisis kerusakan jalan dengan metode International Roughness Index (IRI) dan Surface Distress Index (SDI) pada ruas jalan Cakranegara–Mantang Kecamatan Lombok Barat NTB menggunakan aplikasi Roadlab Pro. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 15(1), 56–63.
- Jamal, J., & Ian, M. R. (2025). Analisis faktor penyebab keterlambatan proyek konstruksi di Indonesia. *Jurnal Kajian Teknik Sipil*, 10(1), 1–8.



- Lamasari, H. S., Rahawarin, A. R., Sari, L., & Muri, D. P. D. (2025). Efektivitas penerapan sanksi pidana denda dalam pelanggaran lalu lintas dan angkutan jalan Kota Jayapura. *Journal of Law Review*, 4(1), 25–36. <https://doi.org/10.55098/jolr.v4i1.173>
- Nisumanti, S., & Prawinata, D. (2020). Penilaian kondisi jalan menggunakan metode International Roughness Index (IRI) dan Surface Distress Index (SDI) pada ruas jalan akses Terminal Alang-Alang Lebar (Studi kasus: Sp. Soekarno Hatta–Bts. Kota Palembang Km 13). *Jurnal Tekno Global*, 9(2), 57–62.
- Peginusa, S. S. (2025). Analisis dan strategi mitigasi risiko dalam implementasi proyek konstruksi hijau. *Jurnal Konstruksi & Infrastruktur*, 13(1), 29–36.
- Prayugo, Y. S., Warsito, W., & Rachmawati, A. (2019). Studi peningkatan jalan (overlay) pada ruas Pamekasan–Sumenep Madura KM 138+900–KM 148+000 dengan perkerasan lentur. *Jurnal Rekayasa Sipil (e-Journal)*, 6(1), 106–115.
- Zariah, H. A., Noerhayati, E., & Bakhtiar, A. (2022). Evaluasi tebal perkerasan lentur dengan metode Bina Marga 2017 pada ruas jalan Waibangga, Nusa Tenggara Timur (STA 0+000–STA 10+000). *Jurnal Rekayasa Sipil*, 13(1), 80–89.



Bahaya Risiko Drainase pada Jembatan Kembar Liliba

Fabianus J S Nope¹² Tarsisius Dwi
Wibawa Budianta²

¹ Politeknik Negeri Kupang

² Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik
Widya Mandala Surabaya

✉ fabynope@gmail.com

Permasalahan drainase pada kawasan Jembatan Kembar Liliba menimbulkan dampak signifikan terhadap stabilitas lereng dan kinerja struktur jembatan. Sistem drainase eksisting tidak menyalurkan aliran air hingga ke hilir sungai, sehingga limpasan terbuang pada lereng dan berpotensi erosi, penggerusan tanah, serta potensi kerusakan pada struktur pondasi jembatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi risiko ketidakstabilan lereng, serta merumuskan alternatif solusi teknis yang berkelanjutan. Metode penelitian meliputi survei lapangan, serta analisis sebab-akibat menggunakan pendekatan risiko. Hasil analisis menunjukkan bahwa *outlet* drainase tidak terhubung ke sistem hilir, dan potensi pola aliran menyebabkan erosi progresif pada tebing sungai. Alternatif solusi yang diusulkan berupa perbaikan sistem drainase terintegrasi, pembangunan saluran tertutup menuju hilir, perkuatan lereng dengan metode teknis, serta penerapan konsep drainase berkelanjutan.

Kata kunci: Drainase, Lereng, Erosi, Risiko Infrastruktur

Pendahuluan

Pada kawasan lereng, sistem drainase memiliki peran yang lebih spesifik dan kritis, yaitu mengendalikan aliran permukaan dan aliran bawah tanah agar tidak memicu proses erosi maupun kelongsoran. Struktur geologi dan kemiringan lereng membuat wilayah perbukitan sangat rentan terhadap erosi apabila terjadi akumulasi resapan air. Aliran air yang tidak terkendali dapat meningkatkan tekanan pori, mengikis lapisan tanah bagian atas (*surface erosion*), hingga memicu ketidakstabilan lereng.

Permasalahan drainase yang tidak terintegrasi termanifestasi secara eksplisit pada kawasan Jembatan Kembar Liliba di Kota Kupang (NTT), yang notabene merupakan salah satu infrastruktur strategis dalam jaringan transportasi antarwilayah. Berdasarkan pengamatan di lapangan, *outlet* drainase yang berada di area tersebut tidak memiliki saluran penerima (*outlet channel*) yang memadai untuk menampung debit aliran pada saat hujan deras. *Outlet* pembuangan drainase bahkan berhenti di lereng tanpa adanya saluran lanjutan menuju sungai atau saluran pembuangan akhir. Konfigurasi seperti ini menyebabkan air hujan mengalir secara bebas menuruni lereng (*free discharge*), sehingga memperbesar potensi erosi dan merusak struktur tanah pendukung jembatan.

Ketidakmampuan sistem drainase dalam melepas aliran secara cepat dan terkontrol juga meningkatkan risiko terjadinya pelunakan tanah (*soil softening*) akibat kejenuhan berulang. Kondisi ini mengurangi kuat geser tanah pada kaki dan badan lereng, serta menyebabkan deformasi lokal pada tebing sungai. Jika berlangsung terus-menerus, kerusakan tersebut dapat mengancam

stabilitas pondasi jembatan, terutama pada bagian *abutment* yang sangat sensitif terhadap perubahan kondisi tanah di sekitarnya. Dampak lebih lanjut berupa kerusakan struktural, penurunan fungsi pelayanan jembatan, hingga potensi kegagalan konstruksi dalam jangka panjang.

Dengan demikian, evaluasi sistem drainase di sekitar Jembatan Liliba dilakukan untuk mengidentifikasi permasalahan yang ada, memahami bahaya dan dampak yang ditimbulkan, serta merumuskan solusi teknis yang efektif dan implementatif. Hasil evaluasi diharapkan mampu memberikan dasar ilmiah dalam menyusun rekomendasi perbaikan drainase yang mampu melindungi infrastruktur dan lingkungan secara berkelanjutan.

Metode

Metode analisa data pada studi kasus ini adalah metode analisis sebab akibat. Analisis sebab akibat adalah proses mengidentifikasi dan menentukan hubungan kausal antara dua atau lebih peristiwa atau variabel, di mana satu kejadian (sebab/penyebab) secara langsung berkontribusi pada atau menghasilkan kejadian lain (akibat/dampak).

Hasil Kerja

Situasi Permasalahan

Sistem drainase pada koridor Jalan Bundaran PU hingga Jalan Piet A Tallo, (sisi kanan Jembatan Kembar Liliba) merupakan bagian dari infrastruktur pengendalian limpasan permukaan yang dirancang untuk memastikan aliran air hujan tertangani secara efektif dan tidak menimbulkan genangan maupun

kerusakan pada struktur jalan. Jaringan drainase ini berfungsi sebagai saluran utama yang mengumpulkan dan mengalirkan limpasan dari permukaan jalan, area sekitar permukiman, serta kawasan fasilitas umum yang berada pada zona tangkapan air di sekitar Bundaran PU.

Tabel 1. Karakteristik Drainase Jalan Bundaran PU ke Jalan Frans Seda

No	Parameter	Uraian/Spesifikasi
1	Sistem drainase	Koridor Jalan Bundaran PU – Jalan Frans Seda
2	Titik awal sistem	Kawasan Bundaran PU (10°10'9.40"S, 123°37'42.31"E)
3	Titik akhir sistem (outlet)	Sisi kanan Jembatan Liliba (10° 9'25.07"S, 123°38'6.11"E)
4	Tipe saluran	Closed Drainage System
5	Penampang saluran	120 cm × 140 cm
6	Panjang jaringan	±1,80 km



Gambar 1. Titik Akhir Outlet Drainase, dan Potensi Area Longsoran



Gambar 2. Profil Drainase Jalan Bundaran PU ke Jalan Frans Seda

Permasalahan utama drainase di kawasan tersebut muncul akibat tidak adanya kesinambungan saluran dari hulu menuju pembuangan akhir. Outlet saluran yang berhenti di lereng tanpa kanal lanjutan menunjukkan bahwa sistem yang ada tidak dirancang secara terintegrasi, sehingga aliran air terpecah secara tidak terkontrol dan menimbulkan potensi erosi pada lereng serta ancaman terhadap stabilitas pondasi jembatan.



Gambar 3. Kondisi Outlet Drainase Jembatan Kembar Liliba

Limpasan air yang melimpah dan jatuh langsung ke lereng tanpa saluran lanjutan menuju badan sungai akan menimbulkan risiko:

1. Mengganggu Kestabilan Lereng (Erosi dan Longsor),
2. Mengganggu Pola Aliran Sungai,
3. Mengancam Keamanan Struktur Pondasi Jembatan.



Gambar 4. Fase Awal Potensi Rill Erosion pada Area Lereng Jembatan Liliba (2025)

Analisis Permasalahan

Analisis permasalahan dilakukan untuk memahami penyebab utama ketidakefektifan sistem drainase di kawasan Jembatan Kembar Liliba serta dampaknya terhadap stabilitas lereng, infrastruktur jembatan, dan lingkungan:

1. Ketidakterpaduan saluran dan ketidakjelasan arah pembuangan akhir

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa outlet drainase tidak terhubung dengan saluran pembuangan akhir (*final outlet*) dan hanya berakhir pada lereng terbuka. Kondisi ini bertentangan dengan konsep sistem drainase terintegrasi (Suripin, 2004) yang menekankan kesinambungan aliran dari hulu–hilir. Ketidakterpaduan ini menyebabkan aliran air keluar secara bebas (*free discharge*) dan langsung menggerus permukaan tanah di lereng. Aliran bebas tersebut memiliki energi erosif tinggi, mempercepat pembentukan alur erosi (*rill erosion*), memperdalam parit aliran, dan memengaruhi stabilitas tebing sungai.

2. Meningkatnya risiko erosi dan ketidakstabilan lereng

Hasil pengamatan menunjukkan adanya indikasi erosi di beberapa bagian lereng, termasuk terbentuknya alur erosi, permukaan tanah terkelupas, dan pelunakan tanah akibat jenuhnya air. Menurut teori mekanika tanah (Das, 2010; Terzaghi), peningkatan kadar air menyebabkan meningkatnya tekanan pori (*pore water pressure*) dan penurunan kuat geser tanah (*shear strength*). Dampak lanjutannya adalah menurunnya faktor keamanan lereng (*safety factor*), yang memperbesar potensi terjadinya longsor lokal. Outlet drainase melepaskan air langsung ke lereng tanpa proteksi, energi aliran secara terus-menerus menggerus kaki lereng (*toe erosion*). Kondisi ini mengancam kestabilan tebing sungai, yang berfungsi sebagai elemen pendukung abutment dan oprit jembatan.

3. Perubahan Tata Guna Lahan dan Bertambahnya Volume Limpasan

Jalan Bundaran PU merupakan salah satu urat nadi ekonomi dan sosial Kota Kupang. Peningkatan jumlah toko komersial dan penggunaan beton (betonasi/impermeabilitas) yang masif di sepanjang Jalan Bundaran PU, Kota Kupang, memiliki dampak signifikan terhadap fungsi lingkungan dan drainase area tersebut, menyebabkan limpasan drainase permukaan (*runoff*) menjadi lebih besar. Berdasarkan teori *runoff* (Asdak,

2007), konversi lahan menjadi kawasan terbangun dapat meningkatkan volume limpasan hingga beberapa kali lipat. Bertambahnya limpasan memperbesar beban hidrologis yang harus diterima oleh saluran drainase, bebas ke lereng dan memperbesar risiko erosi serta kerusakan infrastruktur.

4. Rendahnya proteksi lereng dan tidak adanya struktur pengendali aliran

Hasil pengamatan lapangan memperlihatkan pengarah drainase pada area *outlet* akhir seadanya, berupa rip-rap batu kali atau *boulder* yang dipasang secara acak yang ditutupi beton pada titik tertentu, tidak adanya struktur proteksi drainase yang memadai seperti: bronjong, talud beton, riprap, check dam kecil, saluran penangkap air (*interceptor*), atau vegetasi penutup tanah. Ketiadaan struktur pengendali aliran yang baik membuat lereng sepenuhnya terpapar oleh gaya erosi dari aliran air. Teori konservasi tanah (Arsyad, 2010) menyatakan bahwa aliran permukaan yang tidak terkendali merupakan penyebab utama degradasi lereng pada wilayah curam. Kondisi ini menjelaskan mengapa area *outlet* drainase di Liliba menjadi titik rentan terhadap erosi berat dan kerusakan tanah secara progresif.

5. Dampak terhadap pondasi dan struktur jembatan

Aliran air yang tidak terkendali berpotensi menyusup ke tanah di sekitar pondasi jembatan dan oprit. Jika proses ini dibiarkan berlangsung terus-menerus, tanah di sekitar pondasi dapat mengalami pelunakan (*softening*), pengurangan daya dukung, hingga menyebabkan *settlement* atau pergeseran lokal. Berdasarkan teori drainase jembatan (Bina Marga, 2017), kondisi tersebut sangat berbahaya karena dapat memengaruhi kinerja struktur *abutment* dan kestabilan jembatan secara keseluruhan.

6. Sistem Drainase Tidak Sesuai dengan Standar Desain Teknis

Berdasarkan pedoman teknis drainase (Permen PUPR 12/PRT/M/2014 dan Bina Marga 2016), setiap sistem drainase harus dirancang dengan: kapasitas saluran yang sesuai debit rencana, kelengkapan struktur *inlet-manhole-outlet*, perlindungan lereng pada area discharge, saluran penerima aliran yang jelas dan aman. Temuan lapangan menunjukkan bahwa beberapa aspek tidak terpenuhi. Hal ini mengindikasikan kelemahan dalam perencanaan awal serta kurangnya pemeliharaan sistem drainase.

Alternatif Solusi

Berdasarkan pengamatan terhadap kondisi eksisting sistem drainase dan dampaknya terhadap stabilitas lereng serta infrastruktur jembatan, beberapa alternatif solusi teknis dapat diterapkan untuk menangani permasalahan secara bertahap maupun terintegrasi.

1. Perpanjangan Saluran Drainase Menuju Pembuangan Akhir (*Final Outlet*)

Salah satu solusi adalah memperpanjang saluran drainase dari outlet eksisting hingga mencapai saluran pembuangan akhir berupa sungai atau drainase kota. Perpanjangan ini bertujuan memastikan aliran air tidak terlepas secara bebas ke lereng, melainkan dialirkan

secara terkendali. Komponen teknis yang dapat diterapkan: saluran beton bertulang mengikuti kontur lereng, *box culvert* atau U-ditch prefabrikasi, penyaluran drainase menggunakan pipa ke titik akhir.

2. Pemasangan Struktur Proteksi Lereng

Untuk mencegah erosi dan keruntuhan lereng akibat aliran drainase, perlindungan lereng dapat diterapkan pada area yang terpapar aliran. Pilihan metode proteksi lereng:

- 1) *Revetment* batu kali (*riprap*),
- 2) Bronjong (*gabion*) pada area kaki lereng dan tebing sungai,
- 3) *Dinding penahan* (*retaining wall*) untuk area yang sangat kritis,
- 4) Geotekstil sebagai lapisan penguat tanah.

3. Pembangunan Saluran Interceptor dan Check Dam Kecil

Pada kawasan lereng curam, diperlukan struktur pengendali aliran untuk mengurangi kecepatan dan gaya erosi dari limpasan permukaan. Struktur yang dapat digunakan antara lain:

- 1) *Interceptor drain* di bagian atas lereng untuk mengalihkan aliran permukaan,
- 2) *Check dam* kecil pada saluran alami untuk mengurangi energi aliran,
- 3) *Drop structure* untuk mengatur jatuhnya aliran secara bertahap.

4. Pengendalian limpasan permukaan melalui infrastruktur hijau

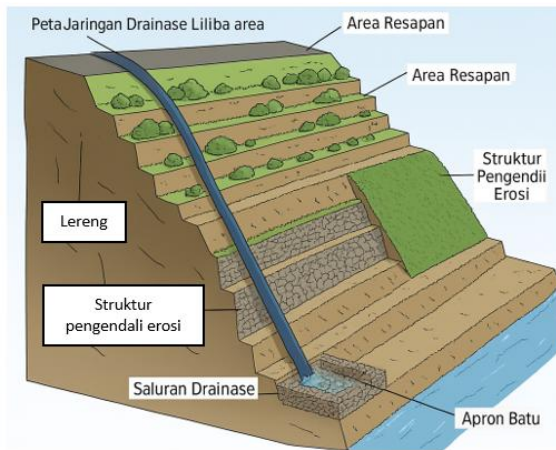
Untuk jangka panjang, pengelolaan limpasan permukaan dapat dilakukan melalui pendekatan *Sustainable Drainage Systems (SuDS)* dan *Water Sensitive Urban Design (WSUD)* yang memadukan engineering dan keberlanjutan lingkungan. Solusi berbasis alam (*Nature-Based Solutions*) yang dapat diterapkan:

- 1) Sumur resapan pada area permukiman,
- 2) Bioretensi atau *rain garden*,
- 3) Penanaman vegetasi penahan lereng,
- 4) Pembuatan ruang terbuka hijau sebagai area resapan tambahan.

Rekomendasi Solusi

Berdasarkan hasil evaluasi sistem drainase, kondisi lereng, dan analisis risiko terhadap infrastruktur jembatan, solusi terbaik yang direkomendasikan adalah penataan ulang sistem drainase secara terpadu (*integrated drainage rehabilitation*) yang mencakup perbaikan saluran dari hulu hingga hilir, serta perlindungan lereng secara struktural dan non-struktural. Rekomendasi solusi ini dirumuskan sebagai berikut:

- 1) Membuat peta jaringan drainase kawasan Liliba,
- 2) Mengidentifikasi saluran yang harus disambungkan atau diganti,
- 3) Merancang final outlet yang aman,
- 4) Menambah struktur pengendali erosi,
- 5) Memperbaiki area resapan.



Gambar 4. Skema Rekomendasi Solusi Drainase Lereng pada Jembatan Kembar Liliba

Kesimpulan

Permasalahan drainase di kawasan Jembatan Kembar Liliba disebabkan oleh kombinasi faktor teknis, hidrologis, dan perubahan lingkungan, yaitu:

1. Ketidakterpaduan sistem drainase dari hulu hingga hilir, di mana saluran drainase tidak memiliki koneksi menuju pembuangan akhir sehingga mengakibatkan aliran bebas yang merusak lereng.
2. Tidak adanya struktur proteksi pada *outlet* drainase, sehingga aliran air dengan energi tinggi langsung menghantam lereng dan mempercepat erosi permukaan maupun erosi kaki lereng (*toe erosion*).
3. Peningkatan tekanan pori akibat infiltrasi air pada bagian lereng, yang berpotensi menurunkan kuat geser tanah dan meningkatkan risiko longsor lokal.
4. Dampak hidrologis terhadap struktur jembatan, berupa potensi penggerusan (*scouring*) pada tebing sungai di sekitar pondasi abutment yang dapat mengancam keamanan struktur.
5. Ketiadaan fasilitas pengendali kecepatan aliran dan konservasi lereng, seperti *check dam*, bronjong, riprap terstruktur, ataupun vegetasi penguat tanah, sehingga lereng tidak memiliki ketahanan terhadap gaya hidraulik limpasan.

Keseluruhan faktor tersebut menunjukkan bahwa permasalahan di Jembatan Kembar Liliba bukan merupakan isu tunggal, melainkan kombinasi sebab-akibat (*causal chain*) yang saling terkait. Ketidakterpaduan drainase menjadi penyebab utama (*root cause*), sementara erosi lereng, gangguan stabilitas tebing sungai, dan potensi kerusakan pondasi jembatan merupakan akibat turunan yang memperburuk kondisi sistem secara keseluruhan.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang memberikan bantuan dan dukungan dalam penulisan Laporan Studi kasus ini, terutama kepada :

1. Bapak Dr. Ir. Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng. sebagai Ketua Program Studi Program Profesi Insinyur Fakultas Teknik Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya.
2. Bapak Ir. Tarsisius Dwi Wibawa Budianta, MT., IPM. sebagai pembimbing dalam program studi program

profesi insinyur

3. Direktur Politeknik Negeri Kupang yang mengizinkan penulis mengikuti program studi program profesi insinyur
4. Ibu Priska G Nahak, ST.MT sebagai Mentor dan sekaligus Ketua Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang,
5. Teman-teman Peserta program studi program profesi insinyur yang selalu memberikan dukungan dalam suka maupun duka, terima kasih telah sama-sama berjuang.

Referensi

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2002). *Slope stability and stabilization methods* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://tjfaonline.com/wp/wp-content/uploads/2018/11/TJFA-410.pdf>
- Arsyad, S. (2010). *Konservasi tanah dan air*. IPB Press. https://www.researchgate.net/publication/361380758_KONSERVASI_TANAH_DAN_AIR
- Asdak, C. (2007). *Hidrologi dan pengelolaan daerah aliran sungai*. Gajah Mada University Press.
- Direktorat Bina Teknik, Direktorat Jenderal Bina Marga. (2017). *Pedoman penanganan lereng jalan*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2016). *Pedoman teknis drainase jalan*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2017). *Pedoman perencanaan jembatan*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2014). *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 12/PRT/M/2014 tentang penyelenggaraan sistem drainase perkotaan*.
- Suripin. (2004). *Sistem drainase perkotaan yang berkelanjutan*. Penerbit Andi.
- Triatmodjo, B. (2009). *Hidrologi terapan*. Beta Offset.



Reformulasi Material Beton U-Ditch Untuk Efisiensi Biaya Produksi di Departemen Jasa dan Properti K3PG

Awang Djohan Bachtiar

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ adbachtiar@gmail.com

Pendahuluan

Industri konstruksi di Indonesia menghadapi tantangan besar berupa peningkatan biaya material, terutama semen Portland yang berkontribusi besar terhadap total biaya proyek. Di sisi lain, produksi semen menghasilkan emisi karbon tinggi yang berdampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan solusi inovatif untuk menekan biaya sekaligus mengurangi dampak ekologis dari material beton.

Koperasi Karyawan Petrokimia Gresik (K3PG) yang bergerak di sektor properti melalui proyek Citra Sari Regency (CSR) menghadapi kondisi serupa, di mana rata-rata biaya produksi mencapai Rp 3,35 miliar per triwulan, dengan 71,09% di antaranya berasal dari unit teknik. Berdasarkan analisis Pareto, ditemukan bahwa komponen biaya material (semen, pasir, koral) menjadi penyumbang utama pemborosan.

Biaya tinggi dalam produksi beton disebabkan oleh ketergantungan pada bahan baku utama seperti semen, pasir, dan koral yang harganya fluktuatif. Keterbatasan stok bahan, minimnya pemasok (*supplier*), serta banyaknya proyek yang berjalan bersamaan memperparah kondisi ini. Melalui pendekatan *Quality Control Circle* (QCC), tim Gio Biocast melakukan analisis menggunakan metode Pareto dan *fishbone* diagram untuk menentukan faktor dominan penyebab inefisiensi. Dari hasil analisis, ditemukan empat akar penyebab utama, yaitu bahan baku utama terbatas, stok bahan baku terbatas, *supplier* terbatas, dan banyak proyek bersamaan. Berdasarkan hal tersebut, dilakukan reformulasi bahan beton U-Ditch menggunakan campuran limbah industri (*Fly Ash* dan *Bottom Ash*) sebagai substitusi parsial semen, serta mengganti Additon dengan molases, bahan alami dari tetes tebu yang memperkuat beton. Apabila hal ini tidak diatasi maka akan menggerus keuntungan K3PG. Saat ini

Kenaikan harga material konstruksi, khususnya semen, berdampak signifikan terhadap biaya pembangunan perumahan. Koperasi Karyawan Petrokimia Gresik (K3PG) melalui Gugus Gio Biocast mengembangkan inovasi material beton yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk merumuskan komposisi beton baru dengan memanfaatkan *Fly Ash* dan *Bottom Ash* sebagai substitusi semen serta *molases* sebagai *additive* alami. Metode yang digunakan meliputi analisis sebab-akibat (Ishikawa), diagram Pareto, serta pendekatan siklus PDCA (*Plan-Do-Check-Action*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi 30% *Fly Ash* dan 70% *Bottom Ash* dengan tambahan *molases* menghasilkan kuat tekan beton $\geq 300 \text{ kg/cm}^2$ (K-300) serta menurunkan biaya produksi sebesar 60,71%. Selain efisiensi ekonomi, terjadi pengurangan emisi karbon $\pm 149.019 \text{ ton CO}_2$ per tahun. Inovasi Gio Biocast terbukti mendukung efisiensi biaya, pengelolaan limbah industri, dan penerapan prinsip pembangunan berkelanjutan di sektor konstruksi.

Kata kunci: Beton Ramah Lingkungan, *Fly Ash*, *Bottom Ash*, Efisiensi Biaya

Departemen Jasa dan Properti terbagi menjadi 3 unit, meliputi, yaitu Teknik, Pemasaran, dan Jasa. Dalam pelaksanaannya ketiga unit ini harus saling mendukung agar dapat menciptakan keuntungan besar dan berkontribusi positif dalam kemajuan K3PG.

Metode

Metode sebab akibat atau *cause and effect method* merupakan pendekatan analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi dan memahami hubungan antara berbagai faktor penyebab (*cause*) yang memengaruhi munculnya suatu permasalahan atau hasil (*effect*). Menurut Ishikawa (1982), metode ini sering divisualisasikan dalam bentuk *diagram tulang ikan* (*fishbone diagram*), yang membantu mengelompokkan faktor penyebab ke dalam kategori tertentu agar proses analisis menjadi lebih sistematis dan terarah. Dalam konteks industri, metode sebab akibat digunakan untuk menemukan akar penyebab (*root cause*) dari suatu permasalahan, seperti inefisiensi produksi, penurunan mutu produk, atau peningkatan biaya operasional.

Hasil Kerja

Situasi Permasalahan

Departemen Jasa dan Properti K3PG memiliki unit produksi beton yang berfungsi memasok kebutuhan material konstruksi untuk proyek perumahan Citra Sari Regency (CSR). Berdasarkan hasil evaluasi laporan keuangan tahun 2022 (1), biaya produksi beton mencapai rata-rata Rp 398.926.785 per bulan, atau sekitar 50,24% dari total biaya proyek. Komponen biaya terbesar berasal dari pembelian semen, pasir, dan koral yang nilainya mencapai lebih dari setengah total pengeluaran.

Melalui rapat QCC (*Quality Control Circle*) yang dilakukan pada bulan Februari 2023, tim menemukan bahwa peningkatan efisiensi dapat dicapai melalui

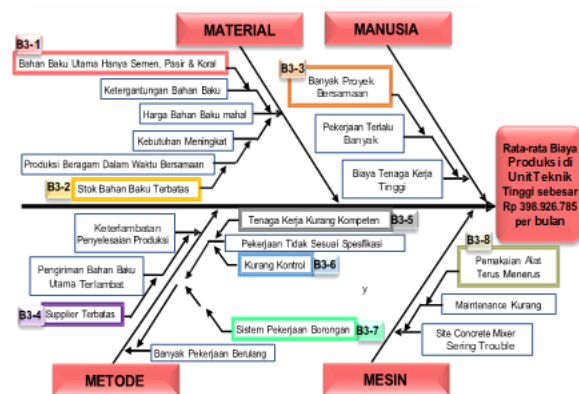
reformulasi material beton. Inovasi yang diusulkan adalah Gio Biocast, yaitu modifikasi komposisi beton dengan menambahkan bahan limbah industri berupa *fly ash* (30%) dan *bottom ash* (70%) serta mengganti bahan Additon dengan Molases sebagai bahan pengikat tambahan.

Analisis Fishbone

Untuk menemukan akar penyebab permasalahan secara lebih mendalam, digunakan diagram sebab-akibat (*fishbone diagram*). Analisis ini membagi faktor penyebab menjadi lima kategori utama, yaitu Manusia, Mesin, Material, Metode, dan Lingkungan. Hasil analisis menunjukkan bahwa faktor material memiliki pengaruh paling signifikan terhadap inefisiensi biaya. Akar penyebab yang teridentifikasi meliputi:

1. Ketergantungan tinggi pada semen sebagai bahan utama.
2. Keterbatasan variasi bahan tambahan.
3. Tidak adanya pemanfaatan limbah industri seperti *fly ash* dan *bottom ash*.
4. Kurangnya kontrol pada proporsi pencampuran air-semen (*water-cement ratio*) dengan batas maksimum 0,45 untuk menjaga konsistensi mutu tinggi.

Penjelasan akar penyebab dapat dilihat pada diagram *fishbone* di bawah ini.



Gambar 1. Diagram Fishbone Penyebab Biaya Produksi

Untuk mengetahui secara logis antar akar penyebab dengan akibat, berikut adalah analisa akar penyebab dan penyebab langsung sebagai berikut:

1. Material B3-1, bahan baku utama hanya semen, pasir & koral (akar penyebab), mengakibatkan ketergantungan bahan baku, sehingga harga bahan baku mahal (penyebab langsung).
2. Material B3-2, stok bahan baku terbatas (akar penyebab), mengakibatkan produksi beragam dalam waktu bersamaan (penyebab antara), berakibat kebutuhan meningkat, sehingga harga bahan baku mahal (penyebab langsung).
3. Manusia B3-3, banyak proyek bersamaan (akar penyebab), mengakibatkan pekerjaan terlalu banyak, sehingga biaya tenaga kerja tinggi (penyebab langsung).
4. Metode B3-4, *supplier* terbatas (akar penyebab), mengakibatkan pengiriman bahan baku utama terlambat, sehingga keterlambatan penyelesaian produksi (penyebab langsung).
5. Metode B3-5, tenaga kerja kurang kompeten (akar penyebab), mengakibatkan pekerjaan tidak sesuai

spesifikasi, berakibat pekerjaan rusak sebelum waktunya, sehingga banyak pekerjaan berulang (penyebab langsung).

6. Metode B3-6, kurang kontrol (akar penyebab), mengakibatkan pekerjaan tidak sesuai spesifikasi, berakibat pekerjaan rusak sebelum waktunya (penyebab antara), sehingga banyak pekerjaan berulang (penyebab langsung).
7. Metode B3-7, sistem pekerjaan borongan (akar penyebab), mengakibatkan proses dilakukan tergesa-gesa, berakibat pekerjaan rusak sebelum waktunya, sehingga banyak pekerjaan berulang (penyebab langsung).
8. Mesin B3-8, pemakaian alat terus menerus (akar penyebab), mengakibatkan *maintenance* kurang, sehingga *site concrete mixer* sering *trouble* (penyebab langsung).

Analisis Pareto

Analisis Pareto digunakan untuk mengidentifikasi faktor yang paling signifikan mempengaruhi tingginya biaya produksi. Berdasarkan data pengeluaran material, urutan faktor penyebab dominan adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Persentase Faktor Penyebab Tingginya Biaya Produksi

No.	Faktor Penyebab	Persentase Kontribusi
1	Penggunaan semen berlebih	38,5%
2	Harga bahan tambahan tinggi	22,4%
3	Proses pencampuran tidak efisien	18,7
4	Waktu produksi panjang	12,6
5	Limbah material tidak terpakai	7,8

Dari tabel tersebut, hasilnya terlihat bahwa lebih dari 60% biaya produksi dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu penggunaan semen berlebih dan harga bahan tambahan. Oleh karena itu, upaya utama diarahkan pada penggantian bahan tersebut dengan alternatif yang lebih ekonomis tanpa menurunkan mutu beton.

Analisis Hasil Uji Laboratorium dan Analisis Reformulasi

Untuk menentukan formulasi beton terbaik, dilakukan serangkaian uji kuat tekan terhadap lima komposisi campuran dengan variasi persentase *fly ash* dan *bottom ash*. Uji dilakukan menggunakan metode *Cylinder Test* pada umur beton 28 hari.

Tabel 2. Laboratorium Fly Ash & Bottom Ash

Komposisi	Fly Ash (%)	Bottom Ash (%)	Molases (L/m³)	Kuat Tekan (MPa)	Status
A (Standar)	0	0	0	27,8	Acuan
B	10	20	1,5	28,5	Lulus
C	20	40	2,0	29,1	Lulus
D	30	70	2,5	30,3	Optimal (Gio Biocast)
E	40	80	3,0	28,2	Tidak stabil

Dari tabel di atas, komposisi D dengan *Fly Ash* 30% dan *Bottom Ash* 70% menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 30,3 MPa, yang masih memenuhi standar mutu beton struktural (≥ 25 MPa) sesuai SNI 2847:2019. Formulasi ini kemudian ditetapkan sebagai inovasi Gio Biocast.

Analisis FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*)

Analisis FMEA dilakukan untuk menilai potensi kegagalan dan menentukan prioritas tindakan perbaikan berdasarkan nilai *Risk Priority Number (RPN)*:

Tabel 3. Perhitungan *Priority Risk Number*

No	Potensi Kegagalan	Severity (S)	Occurrence (O)	Detection (D)	RPN = S×O×D	Prioritas
1	Beton retak dini	6	4	3	72	Sedang
2	Segregasi campuran	5	3	4	60	Rendah
3	Kuat tekan tidak tercapai	8	3	2	48	Rendah
4	Kelebihan air pada pencampuran	7	5	3	105	Tinggi
5	Reaksi kimia molases berlebih	6	2	3	36	Rendah

Dari hasil perhitungan, nilai RPN tertinggi adalah 105 pada potensi kelebihan air pada pencampuran. Oleh karena itu, dilakukan kontrol ketat terhadap rasio air-semen (*water-cement ratio*) dengan batas maksimum 0,45 untuk menjaga konsistensi mutu.

Analisis Perbandingan Biaya Produksi

Berikut hasil perbandingan biaya produksi antara beton standar dan beton reformulasi Gio Biocast:

Tabel 4. Perbandingan Biaya Produksi Beton Standar & Beton Reformulasi Gio Biocast

Jenis Beton	Biaya Produksi per m ³ (Rp)	Produksi per Bulan (m ³)	Total Biaya Bulanan (Rp)	Efisiensi (%)
Beton Standar	1.250.000	319	398.926.785	-
Beton Gio Biocast	750.000	209	156.725.177	60,71

Dari tabel di atas, terlihat penurunan biaya produksi sebesar Rp 242.201.608 per bulan atau efisiensi 60,71%. Selain itu, pengurangan penggunaan semen menghasilkan penurunan emisi karbon sebesar 149,019 ton CO₂ per tahun. Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan Gio Biocast memberikan dampak positif baik dari aspek teknis, ekonomis, maupun lingkungan. Secara teknis, beton dengan komposisi baru memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan beton standar. Secara ekonomis, biaya produksi turun drastis karena berkurangnya ketergantungan terhadap semen dan bahan kimia impor. Dari sisi lingkungan, pemanfaatan *fly ash* dan *bottom ash* mendukung prinsip *circular economy* dengan memanfaatkan limbah industri sebagai bahan konstruksi.

Hasil studi kasus ini juga sejalan dengan teori *green innovation* yang dikemukakan oleh Porter dan Van der Linde (1995), di mana inovasi ramah lingkungan tidak hanya meningkatkan kinerja ekologis, tetapi juga efisiensi ekonomi perusahaan. Oleh karena itu, Gio Biocast direkomendasikan untuk diterapkan secara luas pada proyek-proyek K3PG berikutnya dan menjadi model inovasi material berkelanjutan.

Rekomendasi Solusi

Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan Gio Biocast memberikan dampak positif baik dari aspek teknis, ekonomis, maupun lingkungan. Secara teknis, beton dengan komposisi baru memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan beton standar. Secara ekonomis, biaya produksi turun drastis karena berkurangnya ketergantungan terhadap semen dan bahan kimia impor. Dari sisi lingkungan, pemanfaatan *fly ash* dan *bottom ash* mendukung prinsip *circular economy* dengan memanfaatkan limbah industri sebagai bahan konstruksi.

Hasil studi kasus ini juga sejalan dengan teori *green innovation* yang dikemukakan oleh Porter dan Van der Linde (1995), di mana inovasi ramah lingkungan tidak hanya meningkatkan kinerja ekologis, tetapi juga efisiensi ekonomi perusahaan. Oleh karena itu, Gio Biocast direkomendasikan untuk diterapkan secara luas pada proyek-proyek K3PG berikutnya dan menjadi model inovasi material berkelanjutan.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi kasus dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Faktor utama penyebab inefisiensi biaya produksi di Departemen Jasa dan Properti K3PG adalah penggunaan semen dalam jumlah besar serta harga bahan tambahan (*additon*) yang tinggi. Kedua faktor tersebut menyumbang lebih dari 60% terhadap total biaya produksi beton.
2. Inovasi Gio Biocast yang memanfaatkan *fly ash* (30%) dan *bottom ash* (70%) sebagai substitusi semen, serta penggunaan molases sebagai pengganti bahan *additon*, terbukti mampu menekan biaya produksi secara signifikan. Hasil uji laboratorium menunjukkan kuat tekan beton mencapai 30,3 MPa, melebihi standar mutu minimal (25 MPa) sesuai SNI 2847:2019.
3. Dari hasil implementasi, efisiensi biaya produksi meningkat sebesar 60,71% dengan penghematan rata-rata Rp 242.201.608 per bulan. Selain itu, inovasi ini juga berkontribusi terhadap penurunan emisi karbon sebesar 149,019 ton CO₂ per tahun, sehingga mendukung penerapan *green innovation* di sektor konstruksi.
4. Penerapan metode *Quality Control Circle (QCC)* dan siklus *Plan-Do-Check-Action (PDCA)* terbukti efektif dalam mengidentifikasi masalah, merumuskan solusi, dan mengevaluasi hasil perbaikan secara berkelanjutan. Metode ini memberikan dampak positif dalam peningkatan efisiensi proses produksi dan pengendalian mutu material beton.
5. Secara keseluruhan, studi kasus ini menunjukkan bahwa Gio Biocast merupakan solusi inovatif yang layak diterapkan secara luas di proyek-proyek konstruksi K3PG dan dapat menjadi model pengembangan teknologi beton ramah lingkungan di masa depan.

Saran

Berdasarkan hasil studi kasus, beberapa saran yang dapat diberikan adalah:

1. Implementasi Skala Penuh: Disarankan agar K3PG menerapkan inovasi Gio Biocast secara penuh di seluruh proyek yang memerlukan beton siap pakai untuk memastikan efisiensi biaya yang konsisten dan berkelanjutan.
2. Standarisasi Produksi: Diperlukan penyusunan standar operasional prosedur (SOP) khusus untuk proses pencampuran dan pengujian beton berbasis Gio Biocast agar kualitas tetap stabil di setiap *batch* produksi.
3. Studi kasus Lanjutan: Perlu dilakukan studi kasus lebih lanjut mengenai durabilitas jangka panjang beton Gio Biocast terhadap pengaruh lingkungan ekstrem seperti suhu tinggi, kelembapan, dan reaksi kimia.
4. Kolaborasi Akademik dan Industri: Kerja sama antara institusi pendidikan, laboratorium teknik sipil, dan industri konstruksi perlu ditingkatkan untuk memperluas penerapan teknologi beton ramah lingkungan.
5. Kampanye *Green Construction*: K3PG diharapkan menjadi pionir dalam penerapan *green construction* di wilayah Gresik dengan mengedukasi mitra kerja dan masyarakat mengenai manfaat penggunaan material konstruksi berbasis limbah industri.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada rekan-rekan di Departemen Jasa dan Properti K3PG atas kerja sama dan kontribusinya selama proses studi kasus berlangsung. Penulis menyadari laporan ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi penyempurnaan karya ilmiah ini di masa mendatang.

Referensi

- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 1974:2011 – Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). *SNI 7656:2012 – Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat, dan beton massa*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2014). *SNI 2460:2014 – Spesifikasi agregat untuk beton*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2018). *Sistem standarisasi dan penilaian kesesuaian nasional (PP No. 34 Tahun 2018)*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 2847:2019 – Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*. Badan Standardisasi Nasional.
- Chindaprasirt, P., & Rukzon, S. (2017). Strength, porosity and chloride resistance of blended Portland cement mortar containing fly ash and palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 22(5), 932–938.
- Hammond, G., & Jones, C. (2011). *Embodied carbon: The inventory of carbon and energy (ICE)*. University of Bath.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. IPCC.
- Ishikawa, K. (1982). *Panduan pengendalian mutu*. Asian Productivity Organization.
- Kim, Y. Y., Lee, K. M., & Kim, J. H. (2020). Utilization of coal ash for sustainable construction materials: Reduction of cement consumption and CO₂ emissions. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121–139.
- Nawy, E. G. (2010). *Concrete construction engineering handbook*. CRC Press.
- Porter, M. E., & Van der Linde, C. (1995). Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), 97–118.
- Rahman, M. M., Hossain, M. A., & Islam, M. N. (2022). Development of eco-friendly concrete using molasses as a sustainable additive. *Environmental Engineering Research*, 27(2), 210–221.
- Republik Indonesia. (2014). *Undang-Undang Nomor 20 Tahun 2014 tentang standarisasi dan penilaian kesesuaian*. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2014 Nomor 216.
- Schafer, J. L., & Kang, J. (2008). Average causal effects from nonrandomized studies: A practical guide and simulated example. *Psychological Methods*, 13, 379–393.
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.
- Skenderian, J., Siegel, J. T., Crano, W. D., Alvaro, E. E., & Lac, A. (2008). Expectancy change and adolescents' intentions to use marijuana. *Psychology of Addictive Behaviors*, 22, 563–569.
- Takahashi, M., Yamada, H., & Kobayashi, Y. (2021). Reducing CO₂ emissions from cementitious materials using bio-based additives. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126734.
- Thomas, M. D. A. (2013). *Supplementary cementing materials in concrete*. CRC Press.

Perancangan Sistem Kepatuhan *Timeline* Antar Departemen untuk Meningkatkan Kehandalan Rantai Pasok pada Industri FMCG

Bamban Handrianto¹

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya
Mandala Surabaya

✉ handrianto.bams@gmail.com

Kehandalan rantai pasok merupakan faktor penting dalam menjaga performa layanan pelanggan, khususnya pada industri *Fast Moving Consumer Goods* (FMCG) yang memiliki siklus permintaan tinggi dan waktu respons singkat. Studi kasus ini dilakukan di PT XYZ Food, produsen biskuit dan wafer, untuk menganalisis pengaruh kepatuhan *timeline* antar departemen terhadap konsistensi pemenuhan *order* pelanggan. Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif-kuantitatif dengan analisis eksperimental terbatas melalui pengukuran indikator keandalan rantai pasok, yaitu *On Time In Full* (OTIF), *Schedule Adherence*, dan *Lead Time Variability*. Data diperoleh dari observasi operasional, wawancara lintas fungsi, serta catatan sistem ERP selama periode enam bulan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan sistem digital *Supply Chain Timeline Dashboard* yang didukung oleh rapat koordinasi lintas departemen mampu meningkatkan kepatuhan *timeline* dari 78% menjadi 95%. Selain itu, nilai OTIF meningkat dari 79% menjadi 96%, serta variabilitas *lead time* menurun sebesar 5%. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan disiplin kepatuhan *timeline* dan koordinasi lintas fungsi berperan signifikan dalam meningkatkan keandalan rantai pasok dan efektivitas operasional perusahaan FMCG.

Kata kunci: Kehandalan Rantai Pasok, FMCG, Kepatuhan *Timeline*, OTIF

Pendahuluan

Industri *Fast Moving Consumer Goods* (FMCG) beroperasi dalam lingkungan dengan tingkat kompleksitas operasional yang tinggi, ditandai oleh fluktuasi permintaan yang cepat, variasi produk yang banyak, serta tekanan efisiensi biaya yang ketat. Kondisi ini menuntut sistem rantai pasok yang tidak hanya mampu memenuhi kebutuhan pasar, tetapi juga memiliki tingkat keandalan dan stabilitas proses yang tinggi agar dapat beroperasi secara berkelanjutan. Dalam konteks praktik keinsinyuran, keandalan rantai pasok dipandang sebagai hasil langsung dari desain sistem operasional yang mencakup pengendalian waktu, aliran material, dan koordinasi antar subsistem. Ketepatan waktu pemenuhan *order* menjadi indikator utama kinerja karena mencerminkan kemampuan sistem dalam bekerja secara konsisten sesuai dengan perencanaan yang telah ditetapkan.

Karakteristik produk FMCG yang memiliki umur simpan relatif pendek menuntut seluruh fungsi operasional bekerja dalam batas waktu yang ketat. Keterlambatan kecil pada satu tahapan proses dapat memicu dampak berantai yang signifikan pada tahapan berikutnya, sehingga meningkatkan risiko keterlambatan pengiriman dan pemborosan sumber daya. Dari sudut pandang rekayasa sistem, ketidaksesuaian jadwal antar departemen merupakan indikasi adanya kegagalan mekanisme pengendalian sistem, bukan sekadar kesalahan operasional individu. Ketika setiap fungsi bekerja berdasarkan referensi waktu yang berbeda, maka sistem kehilangan sinkronisasi dan menjadi sulit dikendalikan secara menyeluruh.

PT XYZ Food sebagai produsen biskuit dan wafer menghadapi tantangan tersebut dalam aktivitas pemenuhan *order* pelanggan. Meskipun perusahaan

memiliki kapasitas produksi yang memadai, kinerja layanan yang dihasilkan belum mencerminkan potensi sistem secara optimal. Hal ini menunjukkan bahwa permasalahan utama terletak pada aspek pengelolaan dan pengendalian proses, bukan pada ketersediaan sumber daya fisik. Hasil audit internal memperlihatkan nilai *On Time In Full* (OTIF) sebesar 79%, *Schedule Adherence* sebesar 78%, dan *Lead Time Variability* mencapai 12%. Dari perspektif keinsinyuran, nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem operasional berada dalam kondisi tidak stabil dan memiliki tingkat variabilitas yang tinggi, sehingga sulit diprediksi dan dikendalikan.

Rendahnya nilai *Schedule Adherence* mengindikasikan bahwa sistem penjadwalan belum berfungsi sebagai mekanisme kontrol yang efektif. Jadwal yang seharusnya menjadi acuan eksekusi justru sering mengalami perubahan, sehingga mengganggu aliran proses dan meningkatkan ketidakpastian pada tahap produksi dan distribusi. Tingginya variabilitas *lead time* merupakan indikator bahwa sistem tidak memiliki pengendalian waktu yang memadai. Dalam praktik keinsinyuran industri, variabilitas waktu dipandang sebagai salah satu sumber utama inefisiensi karena mempersulit perencanaan, meningkatkan kebutuhan *buffer*, serta memicu biaya korektif yang tidak memberikan nilai tambah.

Kondisi tersebut diperparah oleh lemahnya koordinasi lintas fungsi antar departemen *Procurement*, PPIC, Produksi, dan Distribusi. Ketika informasi tidak mengalir secara terintegrasi dan tepat waktu, keputusan operasional cenderung bersifat reaktif dan parsial, sehingga mengurangi efektivitas sistem secara keseluruhan. Dalam kerangka praktik keinsinyuran (PPI/PII), permasalahan yang terjadi di PT XYZ Food tidak dapat diselesaikan hanya melalui kebijakan manajerial jangka pendek. Diperlukan intervensi

rekayasa sistem yang secara langsung memperbaiki desain pengendalian *timeline* dan mekanisme koordinasi antar subsistem operasional.

Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk menganalisis permasalahan rantai pasok sebagai kegagalan desain sistem, bukan sekadar penyimpangan kinerja. Pendekatan rekayasa sistem digunakan untuk mengidentifikasi titik kritis pengendalian waktu serta merancang solusi teknis yang mampu menurunkan variabilitas dan meningkatkan stabilitas proses. Tujuan utama dari praktik keinsinyuran ini adalah merancang dan mengimplementasikan sistem kepatuhan *timeline* antar departemen yang terintegrasi, terukur, dan dapat dikendalikan. Melalui pendekatan ini, diharapkan kehandalan rantai pasok PT XYZ Food dapat ditingkatkan secara signifikan dan berkelanjutan, sekaligus memberikan contoh penerapan praktik keinsinyuran profesional dalam pengelolaan sistem industri FMCG.

Metode

Penelitian ini dilaksanakan sebagai praktik keinsinyuran dengan menggunakan metode studi kasus berbasis rekayasa sistem (*engineering-based case study*) untuk menyelesaikan permasalahan kehandalan rantai pasok pada industri *Fast Moving Consumer Goods* (FMCG). Pendekatan deskriptif-kuantitatif digunakan untuk memastikan bahwa setiap keputusan teknis dan intervensi sistem didasarkan pada data kinerja operasional yang terukur dan dapat dipertanggungjawabkan secara profesional.

Pengumpulan data dilakukan melalui kombinasi observasi lapangan langsung, wawancara teknis lintas fungsi, serta analisis data historis sistem *Enterprise Resource Planning* (ERP) perusahaan. Observasi dan wawancara difokuskan pada fungsi *Procurement*, PPIC, Produksi, dan Distribusi sebagai subsistem utama dalam rantai pasok. Pendekatan ini bertujuan untuk memahami aliran proses aktual, titik kegagalan sistem, serta pola ketidaksesuaian *timeline* yang terjadi pada praktik operasional sehari-hari.

Pelaksanaan praktik keinsinyuran dilakukan selama periode enam bulan (Juni–November 2025) untuk memastikan keterwakilan siklus operasional secara menyeluruh. Periode ini mencakup fase diagnosis kondisi awal, perancangan solusi teknis, implementasi intervensi sistem, serta evaluasi kinerja pasca-implementasi. Rentang waktu tersebut dipilih agar dampak solusi dapat diamati secara stabil dan tidak dipengaruhi oleh fluktuasi jangka pendek.

Tahapan praktik keinsinyuran dimulai dengan pengukuran kinerja awal (*baseline performance measurement*) sebagai dasar evaluasi sistem. Selanjutnya dilakukan diagnosis kegagalan sistem menggunakan pendekatan rekayasa sistem untuk mengidentifikasi kelemahan desain pengendalian *timeline* dan koordinasi lintas fungsi. Berdasarkan hasil diagnosis tersebut, dirancang dan diimplementasikan intervensi rekayasa berupa sistem kepatuhan *timeline* antar departemen yang mencakup penguncian jadwal (*frozen schedule*), sistem monitoring digital, serta mekanisme koordinasi teknis harian.

Evaluasi keberhasilan praktik keinsinyuran dilakukan melalui pengukuran kinerja pasca-implementasi selama tiga bulan dengan menggunakan indikator kehandalan rantai pasok, yaitu *On Time In Full* (OTIF), *Schedule Adherence*, dan

Lead Time Variability. Indikator tersebut dipilih karena merepresentasikan keluaran sistem (*system output*) yang secara langsung dipengaruhi oleh efektivitas desain dan pengendalian sistem. Perbandingan kinerja sebelum dan sesudah intervensi digunakan sebagai dasar penilaian keberhasilan solusi rekayasa dalam meningkatkan kehandalan dan stabilitas operasional.

Hasil Kerja

1) Kondisi Awal

Hasil kerja pada tahap awal menunjukkan bahwa kehandalan rantai pasok PT XYZ Food berada pada kondisi yang belum terkendali secara sistemik. Hal ini tercermin dari nilai *On Time In Full* (OTIF) sebesar 79%, *Schedule Adherence* (SA) sebesar 78%, serta *Lead Time Variability* (LTV) sebesar 12%. Nilai-nilai tersebut mengindikasikan bahwa sistem pemenuhan order belum mampu beroperasi secara konsisten sesuai dengan rencana operasional yang ditetapkan.

Dari sudut pandang praktik keinsinyuran, rendahnya nilai OTIF tidak disebabkan oleh keterbatasan kapasitas produksi, melainkan oleh kegagalan sinkronisasi waktu antar proses. Meskipun *output* produksi secara kuantitas mencukupi, ketidaktepatan waktu pada tahap produksi dan distribusi menyebabkan keterlambatan pengiriman kepada pelanggan. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem gagal mengonversi kapasitas menjadi layanan yang andal.

Rendahnya *Schedule Adherence* menunjukkan bahwa jadwal produksi belum berfungsi sebagai mekanisme kontrol yang efektif. Perubahan jadwal yang sering terjadi mencerminkan lemahnya desain pengendalian perencanaan, di mana sistem tidak memiliki batasan teknis yang jelas untuk menjaga stabilitas eksekusi. Dalam konteks keinsinyuran industri, kondisi ini merupakan indikasi bahwa sistem bersifat reaktif dan belum memiliki baseline operasional yang kuat.

Tingginya *Lead Time Variability* memperkuat indikasi ketidakstabilan sistem. Variabilitas waktu proses menunjukkan bahwa sistem operasional tidak memiliki mekanisme pengendalian deviasi yang memadai. Akibatnya, setiap gangguan kecil pada satu subsistem berpotensi berkembang menjadi keterlambatan signifikan pada level *output* sistem.

Secara keseluruhan, kondisi As-Is menunjukkan bahwa permasalahan utama bukan terletak pada manusia atau sumber daya, melainkan pada kegagalan desain sistem pengendalian *timeline* dan koordinasi lintas fungsi. Temuan ini menjadi dasar bagi perlunya intervensi rekayasa sistem yang terstruktur dan berbasis data.

2) Pembahasan dan Relevansi Keinsinyuran

Intervensi yang diterapkan pada studi kasus ini merepresentasikan praktik keinsinyuran yang berfokus pada perbaikan desain sistem operasional, bukan sekadar penyesuaian kebijakan manajerial. Dalam perspektif rekayasa sistem, kehandalan rantai pasok dipandang sebagai keluaran (*system output*) dari interaksi terintegrasi antar subsistem perencanaan, produksi, dan distribusi (Blanchard & Fabrycky, 2011). Oleh karena itu, peningkatan kinerja hanya dapat dicapai melalui perbaikan mekanisme pengendalian sistem secara menyeluruh.

Penerapan *frozen schedule* merupakan bentuk penerapan prinsip stabilisasi sistem melalui pengendalian

variabilitas internal. Heizer, Render, dan Munson (2017) menegaskan bahwa ketidakdisiplinan terhadap jadwal produksi merupakan salah satu penyebab utama instabilitas aliran proses manufaktur. Dengan mengunci jadwal dalam horizon tertentu, sistem dipaksa beroperasi berdasarkan *baseline* yang konsisten sehingga variasi eksekusi dapat ditekan secara signifikan.

Pengembangan digital *supply chain timeline dashboard* mencerminkan penerapan prinsip *monitoring* dan *control* dalam sistem teknik. Menurut Chopra dan Meindl (2016), visibilitas *end-to-end* merupakan prasyarat utama dalam meningkatkan keandalan rantai pasok karena memungkinkan deteksi dini terhadap deviasi proses. *Dashboard* berfungsi sebagai *early warning system* yang mengubah data operasional menjadi informasi pengendalian yang dapat ditindaklanjuti secara cepat oleh insinyur dan pengambil keputusan.

Sementara itu, penerapan *daily coordination meeting* (DCM) berperan sebagai *closed-loop control mechanism* yang menghubungkan hasil monitoring dengan tindakan korektif. Konsep ini sejalan dengan prinsip umpan balik (*feedback loop*) dalam rekayasa sistem, di mana kinerja aktual dievaluasi secara berkala untuk memastikan kesesuaian dengan rencana (Sage & Rouse, 2014). Dengan adanya DCM, sistem tidak hanya mampu mendeteksi penyimpangan, tetapi juga memiliki mekanisme koreksi yang terstruktur dan berkelanjutan.

Relevansi praktik keinsinyuran dalam studi ini juga terlihat dari pergeseran pendekatan penyelesaian masalah, yaitu dari sistem yang bersifat reaktif menjadi sistem yang *predictable* dan *controllable*. Christopher (2016) menekankan bahwa kehandalan rantai pasok tidak dapat dicapai tanpa disiplin koordinasi lintas fungsi dan integrasi informasi yang kuat. Hasil kerja ini menunjukkan bahwa penguatan pengendalian *timeline* mampu menurunkan ketergantungan pada tindakan korektif berbasis biaya dan lembur.

Selain itu, hasil perbaikan yang dicapai menegaskan prinsip dasar keinsinyuran industri bahwa peningkatan kinerja tidak selalu memerlukan penambahan kapasitas fisik. Slack, Brandon-Jones, dan Johnston (2019) menyatakan bahwa pengendalian variabilitas dan konsistensi proses sering kali memberikan dampak kinerja yang lebih besar dibandingkan investasi aset baru. Temuan pada PT XYZ Food memperkuat pandangan tersebut melalui peningkatan OTIF, *schedule adherence*, dan stabilitas *lead time* tanpa ekspansi kapasitas.

Dengan demikian, studi kasus ini menunjukkan peran insinyur sebagai perancang dan pengendali sistem, bukan sekadar pelaksana operasional. Praktik keinsinyuran yang diterapkan mampu menghasilkan solusi yang terukur, berkelanjutan, dan memberikan dampak langsung terhadap kehandalan rantai pasok. Hal ini sejalan dengan tujuan praktik profesi insinyur (PPI/PII) dalam memastikan bahwa solusi teknik memberikan nilai tambah nyata bagi sistem industri dan pemangku kepentingan.

3) Hasil Perbandingan Kinerja

Evaluasi keberhasilan intervensi rekayasa sistem dilakukan dengan membandingkan kinerja rantai pasok sebelum (As-Is) dan sesudah (To-Be) *penerapan frozen schedule, digital supply chain timeline dashboard, dan daily coordination meeting* (DCM). Perbandingan ini bertujuan

untuk menilai efektivitas solusi secara kuantitatif, terukur, dan berbasis *output* sistem.

A. OTIF (On Time In Full)

OTIF digunakan untuk mengukur tingkat keberhasilan sistem dalam memenuhi pesanan pelanggan secara tepat waktu dan lengkap. Adapun OTIF didapatkan dari rumus perhitungan berikut:

$$OTIF = \left[\frac{\text{Jumlah pengiriman yang tepat waktu dan lengkap}}{\text{Total Pesanan Pelanggan}} \times 100\% \right]$$

Hasil Perhitungan:

➤ Before (As-Is)

$$OTIF_{\text{before}} = \left[\frac{685.000}{870.000} \times 100\% \right] = 79\%$$

➤ After (To-Be)

$$OTIF_{\text{after}} = \left[\frac{833.400}{870.000} \times 100\% \right] = 96\%$$

Peningkatan OTIF sebesar +17% menunjukkan bahwa sistem pemenuhan *order* telah bertransformasi dari kondisi reaktif menjadi sistem yang stabil dan terkendali. Secara teknis, hal ini menandakan keberhasilan pengendalian *timeline* dalam mengonversi kapasitas produksi menjadi layanan yang andal.

B. Schedule Adherence (SA)

Schedule Adherence menunjukkan tingkat kepatuhan pelaksanaan produksi terhadap jadwal yang direncanakan oleh tim PPIC. *Schedule Adherence* dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$SA = \left[\frac{\text{Jumlah aktivitas /lot produksi yang selesai sesuai jadwal}}{\text{Total Aktivitas/Lot Produksi}} \times 100\% \right]$$

Hasil Perhitungan:

➤ Before (As-Is)

$$SA_{\text{before}} = \left[\frac{58}{74} \times 100\% \right] = 78\%$$

➤ After (To-Be)

$$SA_{\text{after}} = \left[\frac{70}{74} \times 100\% \right] = 95\%$$

Kenaikan *Schedule Adherence* sebesar +17% mengindikasikan bahwa jadwal produksi telah berfungsi sebagai *baseline* eksekusi yang efektif, bukan sekadar dokumen perencanaan. *Frozen schedule* berperan sebagai *engineering constraint* yang menekan perubahan jadwal tidak terkontrol.

C. Lead Time Variability (LTV)

Lead Time Variability mencerminkan tingkat ketidakstabilan waktu proses dari produksi hingga distribusi. *Lead Time Variability* dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$LTV = \left[\frac{\sigma(\text{Lead Time})}{\mu(\text{Lead Time})} \times 100\% \right]$$

Hasil Perhitungan:

➤ **Before (As-Is)**

$$LTV_{before} = \left[\frac{508}{4.248} \times 100\% \right] = 12\%$$

➤ **After (To-Be)**

$$LTV_{after} = \left[\frac{312}{4.248} \times 100\% \right] = 7\%$$

Penurunan variabilitas *lead time* sebesar 5% menunjukkan bahwa sistem telah mengalami peningkatan stabilitas. Dari sudut pandang rekayasa sistem, berkurangnya variabilitas menandakan keberhasilan mekanisme *monitoring* dan *early warning* dalam mencegah deviasi waktu yang bersifat akumulatif.

D. Cost Of Delay (CoD)

Cost of Delay adalah biaya tambahan akibat kegagalan sistem memenuhi *timeline*. *Cost of Delay* dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$CoD = C_{lembur} + C_{ekspedisi} + C_{penalti} + C_{inefisiensi}$$

Hasil Perhitungan:

➤ **Before (As-Is)**

$$CoD_{before} = 125 + 225 + 185 = 535jt$$

➤ **After (To-Be)**

$$CoD_{after} = 25 + 66 + 24 = 115jt$$

Penurunan CoD sebesar 9% menunjukkan bahwa perbaikan sistem pengendalian *timeline* memberikan dampak ekonomi langsung. Biaya lembur, *rescheduling*, dan penanganan keterlambatan dapat ditekan melalui stabilitas proses, bukan penambahan sumber daya.

E. Change Frequency

Tingginya frekuensi perubahan jadwal produksi dihitung dari:

$$Change\ Frequency\ (\%) = \left[\frac{Jumlah\ Perubahan\ Schedule}{Total\ Schedule} \times 100\% \right]$$

Hasil Perhitungan:

➤ **Before (As-Is)**

$$Change\ Frequency\ (\%)_{before} = \left[\frac{7}{74} \times 100\% \right] = 9\%$$

➤ **After (To-Be)**

$$Change\ Frequency\ (\%)_{after} = \left[\frac{3}{74} \times 100\% \right] = 4\%$$

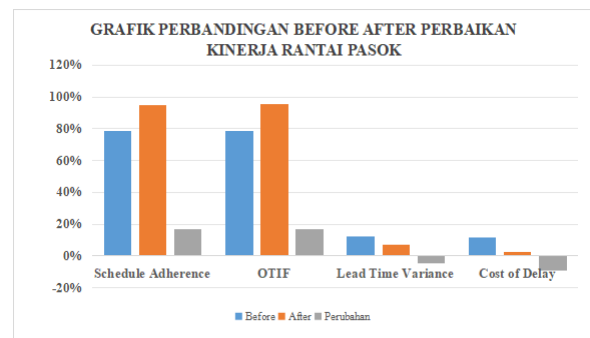
Penurunan frekuensi perubahan jadwal menunjukkan bahwa sistem perencanaan telah menjadi lebih *robust* dan *predictable*. Secara teknis, ini menandakan berkurangnya *noise* internal yang sebelumnya menjadi sumber instabilitas sistem. Adapun pada Tabel 1 menjelaskan perbandingan

indikator kinerja rantai pasok sebelum dan sesudah penerapan sistem kepatuhan *timeline* antar departemen.

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Rantai Pasok

Indikator Kinerja	Sebelum	Sesudah
OTIF (%)	79	96
Schedule Adherence (%)	78	95
LT Variability (%)	12	7

Data pada tabel menunjukkan bahwa seluruh indikator kinerja utama mengalami peningkatan yang konsisten dan signifikan setelah penerapan sistem kepatuhan *timeline* antar departemen. Temuan ini mengindikasikan bahwa solusi yang diimplementasikan mampu meningkatkan kehandalan rantai pasok secara menyeluruh. Pada Gambar 1 menjelaskan grafik perbandingan kinerja rantai pasok sebelum dan sesudah perbaikan. Grafik ini menampilkan perubahan nilai pada beberapa indikator kinerja utama yang digunakan untuk mengukur kehandalan rantai pasok, sehingga memberikan gambaran visual mengenai dampak implementasi solusi yang telah dilakukan.



Gambar 1. Perbandingan Kinerja Rantai Pasok Sebelum dan Sesudah Perbaikan

Gambar 1 menyajikan perbandingan kinerja rantai pasok sebelum dan sesudah penerapan intervensi rekayasa sistem pada PT XYZ Food. Grafik tersebut memperlihatkan tren peningkatan yang konsisten pada seluruh indikator kinerja utama, yang mencerminkan perubahan signifikan pada tingkat kehandalan sistem pemenuhan *order* pelanggan. Peningkatan paling menonjol terlihat pada indikator *On Time In Full* (OTIF) dan *Schedule Adherence*, yang menunjukkan bahwa sistem operasional mengalami perbaikan dari sisi ketepatan waktu dan kepatuhan terhadap jadwal. Kondisi ini mengindikasikan bahwa jadwal produksi dan distribusi telah berfungsi sebagai *baseline* eksekusi yang efektif, bukan sekadar rencana administratif.

Selain itu, grafik juga menunjukkan penurunan yang jelas pada *Lead Time Variability*, yang menandakan berkurangnya ketidakpastian waktu proses dalam rantai pasok. Dari perspektif rekayasa sistem, penurunan variabilitas merupakan indikator penting bahwa sistem telah menjadi lebih stabil, terprediksi, dan mudah dikendalikan. Peningkatan kinerja yang ditampilkan dalam grafik menunjukkan bahwa penerapan kepatuhan *timeline* tidak hanya berdampak pada satu titik proses, tetapi memengaruhi keseluruhan alur rantai pasok secara *end-to-end*. Hal ini menegaskan bahwa intervensi yang dilakukan bersifat sistemik dan menyentuh akar permasalahan pengendalian waktu dan koordinasi lintas fungsi.

Secara teknis, keberhasilan ini tidak terlepas dari integrasi antara mekanisme *frozen schedule*, *digital supply*

chain timeline dashboard, dan *daily coordination meeting* (DCM). Kombinasi ketiga intervensi tersebut membentuk sistem pengendalian yang saling melengkapi, di mana perencanaan, monitoring, dan tindakan korektif berjalan dalam satu siklus kontrol yang terstruktur.

Hasil perbandingan sebelum dan sesudah perbaikan juga menunjukkan bahwa peningkatan kinerja tidak dicapai melalui penambahan kapasitas produksi atau investasi fisik yang besar. Sebaliknya, perbaikan diperoleh melalui optimalisasi desain sistem operasional dan disiplin pelaksanaan proses, yang merupakan prinsip utama dalam praktik keinsinyuran industri. Secara keseluruhan, grafik perbandingan kinerja ini menegaskan bahwa pendekatan rekayasa sistem berbasis data, visibilitas digital, dan koordinasi lintas fungsi mampu meningkatkan kehandalan rantai pasok secara signifikan dan berkelanjutan. Temuan ini memberikan bukti empiris bahwa perusahaan FMCG dapat meningkatkan performa operasional tanpa harus melakukan ekspansi kapasitas secara signifikan, melainkan dengan memperbaiki desain dan pengendalian sistem yang ada.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil kerja yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kepatuhan terhadap *timeline* antar departemen memiliki peran yang sangat penting dalam meningkatkan kehandalan rantai pasok pada industri *Fast Moving Consumer Goods* (FMCG). Penerapan sistem kepatuhan *timeline* di PT XYZ Food melalui *frozen schedule*, *supply chain timeline dashboard*, serta penguatan koordinasi lintas fungsi terbukti mampu memperbaiki stabilitas proses dan meningkatkan kinerja operasional secara signifikan.

Peningkatan kinerja tersebut tercermin pada indikator utama rantai pasok, yaitu peningkatan nilai *On Time In Full* (OTIF) dari 79% menjadi 96% dan *Schedule Adherence* dari 78% menjadi 95%, serta penurunan *Lead Time Variability* dari 12% menjadi 7%. Hasil ini menunjukkan bahwa pengendalian jadwal yang konsisten dan visibilitas informasi lintas departemen berkontribusi langsung terhadap konsistensi pemenuhan order pelanggan dan peningkatan efektivitas layanan pada lingkungan operasional yang dinamis.

Sebagai tindak lanjut, perusahaan disarankan untuk mengintegrasikan *Supply Chain Timeline Dashboard* ke dalam sistem ERP utama serta melakukan evaluasi kinerja secara berkala guna menjaga keberlanjutan perbaikan. Selain itu, proyek lanjutan dapat diarahkan pada pengembangan sistem prediksi permintaan dan penguatan budaya disiplin kepatuhan *timeline*, sehingga peningkatan kehandalan rantai pasok dapat dipertahankan dan ditingkatkan secara berkelanjutan.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada manajemen PT XYZ Food atas dukungan dan kepercayaan yang diberikan selama pelaksanaan studi kasus ini. Keterbukaan informasi serta akses terhadap data operasional menjadi faktor penting yang memungkinkan penelitian ini dapat dilaksanakan secara komprehensif dan sistematis. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh tim PT XYZ Food, khususnya fungsi *Procurement*, PPIC, Produksi, dan Distribusi, atas kerja sama dan kontribusi aktif selama proses pengumpulan data, observasi lapangan, serta implementasi

solusi. Dukungan dari berbagai fungsi tersebut sangat membantu dalam memahami kondisi operasional dan memastikan kelancaran pelaksanaan penelitian.

Selain itu, penulis menyampaikan apresiasi kepada Program Profesi Insinyur dan para dosen pembimbing atas arahan, masukan, serta dukungan akademik yang diberikan selama penyusunan dan pelaksanaan penelitian. Bimbingan tersebut berperan penting dalam menjaga kualitas ilmiah penelitian serta memastikan kontribusinya bagi pengembangan praktik keinsinyuran di bidang manajemen rantai pasok.

Referensi

- Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (2011). *Systems engineering and analysis* (5th ed.). Pearson.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2016). *Supply chain management: Strategy, planning, and operation* (6th ed.). Pearson.
- Christopher, M. (2016). *Logistics & supply chain management* (5th ed.). Pearson.
- Heizer, J., Render, B., & Munson, C. (2017). *Operations management* (12th ed.). Pearson.
- Sage, A. P., & Rouse, W. B. (2014). *Handbook of systems engineering and management* (2nd ed.). Wiley.
- Slack, N., Brandon-Jones, A., & Johnston, R. (2019). *Operations management* (9th ed.). Pearson.



Evaluasi dan Koreksi Sistem Ventilasi pada Ruang *Workshop* Fabrikasi

Samsul Maarif

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ kangsastro@gmail.com

Evaluasi atas kondisi ventilasi bangunan *workshop* fabrikasi perlu dilakukan guna menciptakan lingkungan kerja yang nyaman sesuai dengan standard kesehatan dan keselamatan kerja yang selaras dengan dengan tujuan pembangunan yang berkelanjutan. Ventilasi harus diatur agar dapat memenuhi batas kebutuhan minimal kualitas udara yang sesuai dengan fungsinya. Observasi langsung dan perbandingan dengan standar/referensi dilakukan guna menilai kecukupan laju pergantian udara yang sesuai dengan fungsi ruang/bangunan tersebut. Selanjutnya perhitungan dilakukan sebagai pertimbangan teknis menilai kebutuhan minimal kapastias ventilasi. Berdasarkan pertimbangan teknis tersebut kemudian dilakukan tindakan koreksi berupa penambahan mekanisasi sistem ventilasi untuk meningkatkan laju pergantian udara ruangan dengan cara pemasangan *exhaust fan*. Penambahan fan ini terbukti cukup efektif membantu sistem ventilasi secara mekanis sehingga siklus pergantian udara lebih cepat dan kondisi lingkungan menjadi lebih nyaman.

Kata kunci: Ventilasi, Laju Pergantian Udara, Mekanisasi, *Exhaust Fan*

Pendahuluan

Kegiatan operasional di *Central Workshop* tidak hanya terkait dukungan terhadap operasional perusahaan, melainkan juga turut mempertimbangkan aspek bisnis yang berlandaskan pembangunan yang berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*) sebagaimana telah dideklarasikan secara global oleh PBB pada 2015 yang terdiri dari 17 tujuan dan 168 target (*United Nations*, 2015). SDGs memberikan arah strategis bagi perusahaan untuk mengintegrasikan aspek keberlanjutan ke dalam kegiatan operasional, termasuk efisiensi energi, pengurangan limbah, peningkatan keselamatan kerja, dan penggunaan sumber daya yang bertanggung jawab.

Sejalan dengan prinsip pembangunan berkelanjutan, pengelolaan kualitas udara dalam ruang kerja menjadi salah satu faktor penting yang mendukung tercapainya tujuan SDGs seperti kesehatan dan keselamatan kerja (SDG 3), lingkungan kerja yang layak (SDG 8), serta efisiensi energi pada fasilitas industri (SDG 12). Evaluasi terhadap sistem ventilasi bukan hanya bertujuan memenuhi persyaratan regulasi, tetapi juga memastikan bahwa proses produksi tidak menimbulkan dampak jangka panjang terhadap kesehatan pekerja maupun lingkungan sekitar. Dengan demikian, peninjauan ulang desain ventilasi *workshop* fabrikasi merupakan langkah strategis untuk menyelaraskan kegiatan operasional dengan tujuan keberlanjutan perusahaan.

Hal ini turut memperkuat alasan pentingnya peran insinyur dalam memastikan bahwa setiap rancangan, modifikasi, atau perbaikan yang dilakukan diharapkan memiliki dampak positif terhadap lingkungan, pekerja, dan keberlangsungan operasional industri. *Central Mechanical workshop* adalah salah satu fasilitas pendukung pemeliharaan milik PT Riau Andalan Pulp & Paper yang memiliki beberapa disiplin aktifitas, yaitu fabrikasi, pemesinan, mekanik *repair*, dan perawatan

genset. Khusus untuk *workshop* fabrikasi, sebagian besar aktifitas didalamnya adalah kegiatan pekerjaan panas, mulai dari pemotongan logam baik menggunakan *oxygen-acetylene torch* ataupun *plasma cutting*, penggerindaan bahan logam, dan pengelasan.

Pada fasilitas industri yang memiliki intensitas pekerjaan panas tinggi seperti *workshop* fabrikasi, pendekatan rekayasa berbasis risiko (*risk-based engineering*) diperlukan agar setiap ancaman terhadap kesehatan dan keselamatan dapat diidentifikasi secara kuantitatif. Sistem ventilasi yang kurang optimal dapat menimbulkan akumulasi polutan, peningkatan suhu area kerja, serta gangguan sirkulasi udara yang dapat memperburuk tingkat paparan pekerja terhadap bahaya. Oleh karena itu, survei lapangan, pengukuran teknis, serta analisis performa sistem ventilasi menjadi bagian penting untuk memastikan bahwa rancangan yang diterapkan benar-benar mampu mengontrol bahaya secara efektif.

Workshop fabrikasi harus beroperasi dalam kerangka kesehatan dan keselamatan kerja yang terkendali. Aspek K3 yang diperhatikan harus meliputi seluruh aktifitas yang berlangsung didalamnya. Setiap aktifitas tersebut digali lebih dalam mencakup aspek-aspek bahaya yang ada baik dari sisi manusia, metode, material, mesin, hingga lingkungan. Berkaitan dengan pengendalian bahaya lingkungan ini, salah satu yang menjadi perhatian serius adalah sistem ventilasi. Standar ASHRAE 62.1 menetapkan persyaratan ventilasi minimum untuk memastikan kualitas udara dalam ruang kerja memenuhi batas aman (ASHRAE, 2019). Hal ini menjadi landasan perlunya evaluasi terhadap desain sistem ventilasi yang ada.

Evaluasi ventilasinya harus memperhitungkan kondisi eksisting bangunan yang bersifat semi terbuka. Di dalam banyak kasus, ventilasi alami yang mengandalkan bukaan dinding dan gerbang tidak selalu mampu memberikan distribusi udara yang konsisten,

terutama ketika pola kerja, penempatan mesin, maupun volume pekerjaan mengalami perubahan. Ketidaksesuaian antara pola aliran udara yang direncanakan dengan kondisi operasional aktual dapat menyebabkan terjadinya *dead zone* yang menjadi titik akumulasi asap atau debu logam. Oleh karena itu, diperlukan analisis menyeluruh untuk memastikan bahwa strategi ventilasi yang digunakan tetap relevan dan efektif mendukung keselamatan kerja.

Evaluasi menyeluruh terhadap sistem ventilasi yang ada menjadi langkah penting untuk menilai kesesuaian antara desain, kondisi aktual, dan kebutuhan operasional *workshop*. Oleh karena itu, dilakukan kegiatan survei lapangan, pengukuran parameter kualitas udara, observasi pola aliran udara, serta analisis performa sistem ventilasi eksisting. Hasil dari kegiatan ini akan digunakan sebagai dasar dalam mengidentifikasi area bermasalah, menilai tingkat paparan, serta merumuskan rekomendasi teknis yang dapat meningkatkan kendali bahaya lingkungan secara berkelanjutan.

Melalui analisis ini, diharapkan dapat diperoleh gambaran komprehensif mengenai kondisi ventilasi *workshop* fabrikasi dan potensi peningkatannya. Temuan dan rekomendasi yang dihasilkan nantinya dapat menjadi rujukan bagi pengelolaan fasilitas, perencanaan rekayasa, maupun kebijakan K3 untuk memastikan operasional *workshop* tetap aman, efisien, dan selaras dengan prinsip keberlanjutan perusahaan.

Metode

Perencanaan evaluasi sistem ventilasi ruangan dilakukan mengantisipasi dinamika pekerjaan perawatan yang cenderung meningkat di *workshop* fabrikasi, sekaligus sebagai langkah nyata terhadap pengendalian bahaya lingkungan terhadap pekerja.

1. Studi Literatur dan Acuan Standar

Studi literatur digunakan untuk menentukan parameter laju pergantian udara (ACH) yang sesuai dengan fungsi ruang. Pengendalian ventilasi pada area pengelasan wajib memenuhi persyaratan keselamatan kerja sebagaimana diatur dalam standar OSHA mengenai *Ventilation (OSHA 1910.94)*. Standar ACH diambil dari referensi teknis DIN 1946-4, ACGIH *Industrial Ventilation*, serta ASHRAE *Handbook*.

2. Survei Lapangan dan Observasi Visual

Survei dilakukan guna meninjau situasi/ kondisi aktual ventilasi ruangan *workshop*, termasuk memperhatikan komponen-komponen bangunan yang mempengaruhi sistem sirkulasi udara ruangan tersebut.

3. Pengukuran Volumetrik Ruangan

Mengukur dimensi aktual bangunan untuk menghitung volume ruangan. Volume ini digunakan untuk menentukan kebutuhan ventilasi berdasarkan standar ACH.

4. Identifikasi Fungsi Ruangan dan Profil Aktivitas

Menentukan jenis aktivitas dan level intensitas pekerjaan panas (*hot work*), frekuensi operasional,

serta pola penggunaan ruang untuk menyesuaikan kebutuhan kapasitas ventilasi.

5. Identifikasi Sumber Aliran Udara (Alami dan Mekanis)

Menganalisis keberadaan kisi-kisi, pintu, celah bangunan, dan kondisi ventilasi alami. Pada tahap ini dilakukan pemetaan sumber udara masuk dan keluar serta potensi jalur aliran udara

6. Identifikasi Sumber Aliran Udara Ruangan

Selain unit-unit peralatan ventilasi, titik keluar-masuk udara kedalam ruangan juga menjadi pertimbangan dalam evaluasi kebutuhan kapasitas ventilasinya.

7. Identifikasi Sumber-Sumber Panas & Cemar Udara

Observasi visual jenis kegiatan atau aktifitas yang menghasilkan panas dan cemaran udara dan frekuensinya turut menjadi pertimbangan dalam penentuan kapasitas ventilasi yang dibutuhkan.

8. Perhitungan Kebutuhan Kapasitas Ventilasi

Menghitung total kapasitas ventilasi menggunakan rumus $ACH \times \text{volume ruangan}$. Perhitungan ini digunakan untuk menentukan jumlah dan kapasitas *exhaust fan*.

9. Validasi Teknis Spesifikasi *Exhaust Fan*

Melakukan pencocokan perhitungan kebutuhan ventilasi dengan spesifikasi teknis produk *exhaust fan* yang tersedia di pasaran.

10. Penyusunan Rekomendasi Teknis

Memberikan rekomendasi perbaikan seperti penambahan *exhaust fan*, redistribusi bukaan ventilasi, atau penggunaan *fume extractor* jika diperlukan.

Hasil Kerja

Survei Lapangan dan Pengukuran Volumetrik Ruang

Observasi visual menemukan bahwa ruangan *workshop* hanya didukung oleh ventilasi alami yang hanya memanfaatkan kisi-kisi pada dua bagian dinding serta bukaan pintu akses antar ruangnya saja. Pertukaran udara yang terjadi hanya didasari perbedaan temperatur udara luar dan dalam ruangan, sehingga pada situasi tertentu dapat dilihat asap tidak dapat terurai dengan cepat. Selanjutnya dilakukan perhitungan volumetrik didasarkan pada dimensi ruangan *workshop* fabrikasi. Secara keseluruhan, ruangan *workshop* fabrikasi sepanjang 42m, dengan lebar 24 meter dan tinggi 9 meter. Total volumetrik ruangan *workshop* adalah sekitar 9,072 m³.

Pada perencanaan perhitungan kebutuhan ventilasi, diambil beberapa asumsi:

- Kapasitas ACH *exhaust fan* dianggap tanpa hambatan.
- Aliran udara alami melalui kisi-kisi, celah struktur bangunan dan bukaan pintu diabaikan.

Pendekatan ini dilakukan dengan alasan bahwa perubahan temperatur lingkungan yang luas tidak dapat dikendalikan secara penuh.

Fungsi Ruang

Workshop fabrikasi dipergunakan pada sebagian besar aktifitas pekerjaan panas yang dilakukan *Central Mechanical Workshop*. Rutin aktifitasnya meliputi proses pemotongan metal/logam menggunakan gerinda, *oxy-acetylene cutting torch*, plasma *cutting*, *gouging*, dan pengelasan. Merujuk pada standar teknis ventilasi industri (DIN 1946-4) dan pedoman *Industrial Ventilation* (ACGIH,2023), fasilitas *workshop* fabrikasi dengan aktivitas pengelasan termasuk dalam kategori *welding workshop* dimana rekomendasi ACH/laju pergantian udara sebesar 20-30m³ per jam.

Identifikasi Sumber Aliran Udara Ruang

Pada kondisi standarnya, ventilasi bangunan telah dilengkapi dengan kisi-kisi yang dipasang di dinding pada ketinggian 6 hingga 8 meter. Kisi-kisi ini ditujukan untuk membantu mekanisme alami sirkulasi udara antara sisi dalam dan luar ruangan. Selain itu, terdapat 2 pintu gerbang dan 1 buah akses jalan yang turut menjadi jalur sirkulasi udara alami untuk ruangan *workshop* fabrikasi. Mekanisme alami perpindahan udara yang terjadi hanya didasari adanya perbedaan temperatur udara pada lingkungan sekitar *workshop* fabrikasi, sehingga kecukupan laju sirkulasinya tidak dapat dipastikan.

Identifikasi Sumber-Sumber Panas Cemar Udara

Semua pekerjaan panas yang dilakukan di *workshop* fabrikasi menghasilkan polutan/ cemar udara baik berupa asap, debu, maupun percikan serpihan partikel sebagaimana dalam Tabel 1.

Tabel 1. Daftar Cemar Udara Aktifitas Fabrikasi

No	Kegiatan	Bentuk Cemar Udara
1	Penggerindaan manual	debu, asap, dan serpihan
2	Pemotongan dengan <i>oxy-acetylen cutting torch</i>	asap organik
3	Pemotongan menggunakan plasma <i>cutting</i>	asap organik
4	Proses <i>gouging</i>	asap organik
5	Proses pengelasan	asap organik

Berdasarkan pengamatan, volume pencemaran udara tidak selalu konstan. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh dinamika/fluktuasi volume kegiatan pekerjaan panas yang dikerjakan di *workshop* fabrikasi. Dinamika pekerjaan fabrikasi sangat bervariasi dikarenakan lingkup kerja *workshop* untuk mendukung aktifitas perawatan, sehingga banyaknya beban pekerjaan tidak selalu tetap.

Perhitungan Kebutuhan Kapasitas Ventilasi

Perhitungan kapasitas aliran udara per jam yang diperlukan untuk standar *safety* pada ruangan *workshop* sebagai berikut:

$$Q = ACH \times V$$

ACH desain untuk *welding workshop* = 30 / jam
Volume ruangan = 9,072 m³

Sehingga,

$$Q = 30 \times 9,072$$

$$Q = 272,160 \text{ m}^3/\text{hr}$$

Kapasitas yang dihitung ini bersifat ideal, tetapi pada kondisi aktual pastinya terdapat hambatan yang dapat menurunkan efisiensinya. Untuk itu patut diperhitungkan *safety factor* antara 10-15%.

Dengan *safety factor* 10%,

$$Q = 272,160 \times 1.1 = 299,376 \text{ m}^3/\text{jam}$$

Dengan *safety factor* 15%,

$$Q = 272,160 \times 1.15 = 312,984 \text{ m}^3/\text{jam}$$

Validasi Teknis Spesifikasi Exhaust Fan

Memenuhi kebutuhan kapasitas ventilasi tersebut, maka dievaluasi spesifikasi teknis dari produk CKE *exhaust fan*. Produk yang dipilih untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah CKE axial LF *low noise exhaust fan* model LF-12.5-1.1kW (dapat dilihat di Gambar 1), di mana pada spesifikasi teknisnya memiliki kapasitas udara 46000 m³/jam. Selain kapasitasnya, model *exhaust fan* ini dinilai memiliki desain yang sederhana serta mudah dalam perawatan.

Model	Speed (rpm)	Air Vol. (CMH)	Pwr. (W)	Rating (T.Hz)	Noise db(A)
LF-8-0.25KW	400	12600	0.25	380/50	58
LF-8-0.37KW	500	16000	0.37	380/50	60
LF-8-0.55KW	600	19000	0.55	380/50	60
LF-10-0.55KW	420	26000	0.55	380/50	60
LF-10-0.75KW	460	29000	0.75	380/50	62
LF-12.5-0.75KW	720	40000	0.75	380/50	64
LF-12.5-1.1KW	360	46000	1.1	380/50	62
LF-15-1.1KW	280	37000	1.1	380/50	66
LF-15-1.5KW	290	60000	1.5	380/50	66

Gambar 1. Axial LF Low Noise Type Exhaust Fan

Kebutuhan unitnya dihitung sebagai berikut:

$$\text{Jumlah fan} = 299,376 / 46000 = 6.5 \approx 6 \text{ unit}$$

Setelah dievaluasi, jumlah ini sesuai dengan ruang yang tersedia pada struktur bangunan *workshop*, dimana dapat dipasangkan 1 buah exhaust fan pada setiap interval kolom bangunan.

Rekomendasi Teknis

Pada tahap selanjutnya dilakukan pembelian dan perencanaan pemasangan *exhaust fan* pada salah satu sisi dinding ruangan fabrikasi. Struktur pendukung tambahan dibuat sedemikian rupa agar tidak mengganggu aliran udara *exhaust fan*. Selain itu, mempertimbangkan perlunya kemudahan dalam aspek pemeliharannya, maka dipasang juga *platform* yang

berguna untuk kegiatan perawatan terhadap *exhaust fan* tersebut. Hasil pekerjaan pemasangannya dapat dilihat pada Gambar 2 dibawah.



Gambar 2. *Exhaust Fan* Terpasang

Penerapan mekanisasi ventilasi ini terbukti berhasil meningkatkan laju pergantian udara ruangan secara umum, sehingga penumpukan asap dapat diminimalkan. Selain itu, untuk menunjang keamanan operasionalnya, ditambahkan juga sistem otomatis menggunakan *time on relay switch* guna mengantisipasi potensi kerusakan *exhaust fan* akibat pengoperasian terus menerus tanpa henti. Sistem ini mengatur agar *exhaust fan* hanya beroperasi pada jam kerja normal *workshop* fabrikasi dan mematikan *exhaust fan* pada akhir jam kerja. Pada kondisi aktual sistem ini masih bisa *dibypass* dengan cara menghidupkan fan secara langsung dari panel listriknya jika diperlukan, misalnya pada jam kerja tambahan (*overtime*).

Kesimpulan

Hasil evaluasi penambahan *exhaust fan* sebagai langkah mekanisasi sistem ventilasi udara *workshop* fabrikasi secara umum menunjukkan peningkatan aliran udara keluar, sehingga menurunkan konsentrasi polutan yang ada di *workshop* fabrikasi. Penambahan *exhaust fan* ini memberikan tambahan tingkat pergantian udara dengan memaksa aliran udara keluar bangunan. Meski demikian, sistem ini belum sepenuhnya efektif karena tata letak area kerja penghasil polutan yang kadangkala berpindah-pindah sesuai dengan dinamika kebutuhan pekerjaan di *workshop* fabrikasi. Untuk itu tahap evaluasi lanjutan seperti penyesuaian ulang *layout* atau tata letak pekerjaan, serta penambahan fasilitas pengendalian polutan seperti *fume hood/filter* dapat dipertimbangkan guna memastikan pengendalian polutan yang lebih optimal dimasa yang akan datang.

Ucapan Terimakasih

Puji syukur penulis haturkan kepada Allah SWT, Tuhan Yang Maha Kuasa, sehingga artikel ini dapat penulis selesaikan dengan baik. Penulis juga sangat berterima kasih yang sebesar-besarnya kepada segenap civitas akademika UKWS, lebih khusus kepada:

1. Dr. Ir. Lusiana P. S. Hartanti, S.T., M. Eng., CIOMP., IPM., ASEAN Eng. selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar membimbing dan memotivasi penulis dalam penyelesaian artikel ini.
2. Dr. Ir. Ivan Gunawan, S.T., M.MT., CSCM., IPM., ASEAN Eng. selaku kepala program studi PSPI UKWMS yang terus memotivasi kami selaku mahasiswa PSPI.

3. Segenap civitas akademika UKWMS yang memfasilitasi kami dalam mengikuti program PSPI ini.

Referensi

- ACGIH. (2023). *Industrial ventilation: A manual of recommended practice*. American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- ASHRAE. (2019). *HVAC applications handbook: Industrial ventilation chapter*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Deutsches Institut für Normung. (n.d.). *DIN 1946-4: Ventilation and air conditioning – Part 4: Ventilation in buildings and rooms of health care*.
- Occupational Safety and Health Administration. (n.d.). *OSHA 1910.94 – Ventilation standard for general industry*.
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*.



Analisis Kesesuaian Model MOOC Nasional untuk Implementasi MOOC Institusional: Rekomendasi Model Ideal untuk ITB Yadika Pasuruan

Erri Wahyu Puspitarini¹

Erri Kartika Purnama Putri²

Ahmad Naim bin Che Pee @Che Hanapi³

Andrew Joewono⁴

Rasional Sitepu⁵

^{1,2} Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

³ Institut Pengurusan Teknologi Dan Keusahawanan, Universiti Teknikal Malaysia Melaka

^{4,5} Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

✉ erri@itbyadika.ac.id

✉ errikartika@gmail.com

✉ naim@utem.edu.my

✉ andrew_sby@ukwms.ac.id

✉ rasional@ukwms.ac.id

Perkembangan ekosistem pembelajaran digital di Indonesia mendorong perguruan tinggi untuk mengadopsi *Massive Open Online Course* (MOOC) sebagai bagian dari strategi transformasi pembelajaran. Institut Teknologi dan Bisnis (ITB) Yadika Pasuruan memiliki peluang strategis untuk mengembangkan model MOOC yang tidak hanya mendukung pembelajaran akademik, tetapi juga pengembangan keterampilan kerja dan pemberdayaan masyarakat. Penelitian konseptual ini bertujuan merumuskan model MOOC ITB Yadika melalui analisis komparatif terhadap lima model MOOC di Indonesia, yaitu SPADA Indonesia, IndonesiaX, ICE Institute, UT MOOCs, dan *Skill Academy*. Metode yang digunakan adalah analisis komparatif konseptual dengan membandingkan aspek tata kelola, segmentasi pengguna, orientasi konten, mekanisme kredensial, dan keberlanjutan. Hasil kajian menunjukkan bahwa masing-masing platform memiliki keunggulan berbeda yang dapat disintesis menjadi model MOOC hibrida bagi ITB Yadika. Model yang diusulkan mengintegrasikan jalur akademik berbasis SKS dengan jalur vokasional berbasis *microcredential* untuk mahasiswa, profesional, pelaku UMKM, dan masyarakat umum. Kerangka ini diharapkan menjadi dasar pengembangan ekosistem MOOC yang relevan dan berkelanjutan di ITB Yadika Pasuruan.

Kata kunci: MOOC, Pembelajaran Daring, ITB Yadika Pasuruan, Microcredential, Pendidikan Tinggi

Pendahuluan

Perkembangan teknologi digital serta penetrasi internet yang semakin luas telah mengubah wajah pendidikan tinggi secara global, dari model konvensional tatap muka menuju bentuk pembelajaran daring dan terbuka. *Massive Open Online Course* (MOOC) muncul sebagai inovasi penting yang menawarkan akses pendidikan lebih luas, fleksibel, dan terjangkau untuk berbagai kalangan. MOOC memungkinkan siapa saja dengan koneksi internet untuk mengikuti kursus dari berbagai institusi pendidikan tanpa dibatasi oleh lokasi, biaya, maupun waktu.

Dalam konteks Indonesia, MOOC telah menjadi bagian dari transformasi digital dalam penyelenggaraan pendidikan tinggi, sebagai upaya untuk memperluas akses, mendukung literasi digital, serta membuka peluang belajar sepanjang hayat. Studi terkini menyebut bahwa MOOCs mendukung digitalisasi pembelajaran di perguruan tinggi, meningkatkan fleksibilitas akses pendidikan, serta memungkinkan diversifikasi layanan pendidikan yang inklusif.

Namun demikian, implementasi MOOC tidak bebas dari tantangan. Banyak penelitian menunjukkan bahwa untuk menjadikan MOOCs efektif, baik sebagai jalur akademik maupun pembelajaran tambahan, diperlukan perencanaan matang terkait desain kursus, dukungan infrastruktur,

pendampingan, serta mekanisme kredit atau sertifikasi yang sesuai.

Dengan latar belakang tersebut, perguruan tinggi swasta seperti ITB Yadika Pasuruan menghadapi dilema dan peluang strategis. Di satu sisi, institusi memiliki tanggung jawab untuk meningkatkan kualitas dan relevansi pendidikan, mendukung mahasiswa dengan fleksibilitas belajar, serta menjawab kebutuhan masyarakat lokal (misalnya pelaku UMKM, pekerja, masyarakat umum) yang membutuhkan akses pendidikan dan peningkatan keterampilan digital. Di sisi lain, institusi perlu memastikan bahwa penerapan MOOC memenuhi standar akademik, kredensial, dan kesinambungan keberlanjutan.

Oleh karena itu, penting untuk merancang model MOOC yang sesuai dengan karakteristik dan kapasitas institusi, tidak semata meniru model MOOC global atau nasional, tetapi menyesuaikannya dengan konteks lokal, kebutuhan mahasiswa, serta lingkungan sosial-ekonomi di sekitar kampus. Model semacam itu perlu menggabungkan aspek akademik (misalnya kurikulum, kredensial SKS) dengan aspek vokasional dan pengembangan kompetensi praktis (keterampilan digital, *technopreneurship*, literasi digital), sehingga MOOC dapat memberi nilai tambah bagi mahasiswa maupun masyarakat umum.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa MOOCs dapat memiliki dampak positif signifikan terhadap hasil belajar, aksesibilitas pendidikan, serta pemberdayaan pembelajar dewasa dan profesional (Alhazzani, 2020). Namun, harus diakui bahwa keberhasilan MOOC sangat tergantung pada desain instruksional, dukungan teknologi dan akses, serta manajemen institusional yang baik (Utami, 2024). Berdasarkan kondisi tersebut, artikel ini bertujuan merumuskan sebuah konsep model MOOC untuk ITB Yadika Pasuruan yang kontekstual, yaitu model yang mengintegrasikan pembelajaran akademik, pengembangan keterampilan praktis, serta akses terbuka bagi masyarakat. Untuk itu, penelitian ini melakukan analisis komparatif terhadap lima model MOOC terkemuka di Indonesia sebagai referensi, kemudian menyintesis praktik terbaik (*best practices*) yang relevan dengan kapasitas dan visi institusi. Konsep yang dihasilkan diharapkan menjadi landasan strategis bagi ITB Yadika dalam mengembangkan sistem pembelajaran daring berkualitas dan berkelanjutan.

Tujuan penelitian ini adalah mendeskripsikan karakter lima model MOOC di Indonesia, menyusun tabel perbandingan berdasarkan beberapa dimensi kunci dan merumuskan konsep model MOOC ITB Yadika yang selaras dengan visi institusi dan kebutuhan pemangku kepentingan. Dengan demikian, artikel ini diharapkan memberikan kontribusi teoritis dan praktis: secara teoritis memperkaya literatur MOOC di konteks perguruan tinggi swasta di Indonesia; secara praktis menyediakan *blueprint* bagi institusi seperti ITB Yadika untuk memulai, mengelola, dan mengembangkan MOOC secara bertanggung jawab dan adaptif terhadap kebutuhan lokal.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis komparatif konseptual (*conceptual comparative analysis*) yang umum digunakan dalam penelitian desain sistem pendidikan dan pengembangan model pembelajaran. Pendekatan ini dipilih karena tujuan utama penelitian adalah menyintesis berbagai model MOOC yang telah ada dan memformulasikan model baru yang sesuai dengan karakteristik ITB Yadika Pasuruan.

1. Tahap Identifikasi Model MOOC

Tahap awal penelitian adalah mengidentifikasi lima platform MOOC besar yang berkembang di Indonesia, yaitu SPADA Indonesia, IndonesiaX, ICE Institute, UT MOOCs, dan Skill Academy by Ruangguru. Pemilihan kelima model ini didasarkan pada kriteria Tingkat kematangan *platform*, Jangkauan penggunaan nasional, Keberagaman tata kelola (pemerintah, konsorsium, nirlaba, EdTech), Keunikan orientasi pembelajaran. Kelima model mewakili spektrum pendekatan MOOC yang luas sehingga relevan menjadi dasar penyusunan model bagi ITB Yadika Pasuruan.

2. Dimensi Analisis Komparatif

Untuk membandingkan kelima model, dilakukan pemetaan berdasarkan tujuh dimensi analisis berikut:

- Bentuk tata kelola (*governance structure*),
- Orientasi konten (akademik/vokasional),
- Segmentasi pengguna,
- Mekanisme kredensial (SKS, *microcredential*, sertifikat),
- Infrastruktur teknologi dan fitur *platform*,

f. Keberlanjutan model (*business model & institutional support*),

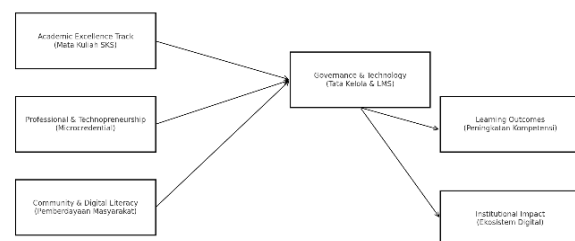
g. Kesesuaian dengan kebutuhan institusional ITB Yadika
Setiap dimensi dianalisis menggunakan data sekunder dari publikasi resmi *platform*, literatur ilmiah, repository regulasi, dan studi terkait MOOC nasional.

3. Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Data dalam penelitian ini bersifat kualitatif dan diperoleh dari Artikel ilmiah bereputasi, laporan institusi pemerintah (Kemdikbudristek, UT, SPADA), website, dan dokumentasi resmi masing-masing *platform* MOOC, Studi terdahulu mengenai penerapan MOOC di perguruan tinggi Indonesia. Data kemudian dianalisis menggunakan teknik *thematic comparison*, yaitu membandingkan karakteristik masing-masing model untuk menemukan pola, kelebihan, dan keterbatasan.

4. Penyusunan Model Konseptual

Hasil analisis komparatif digunakan untuk menyusun model konseptual MOOC ITB Yadika, yang terdiri dari Pilar Akademik, Pilar Technopreneurship, Pilar Literasi Digital & Pemberdayaan Komunitas, Pilar Tata Kelola & Teknologi. Model ini kemudian dilengkapi dengan kerangka penerimaan pengguna menggunakan teori UTAUT2 untuk memastikan implementasi MOOC dapat diterima oleh mahasiswa dan masyarakat luas.



Gambar 1. Diagram Model Konseptual

5. Validasi Konseptual

Validasi awal dilakukan secara desk evaluation melalui kesesuaian model dengan teori MOOC dan pembelajaran daring, konsistensi internal antar komponen model, relevansi dengan visi dan kapasitas institusi ITB Yadika. Validasi lanjutan direncanakan dilakukan dalam penelitian berikutnya melalui uji coba kursus (*pilot testing*), analisis penerimaan pengguna dengan UTAUT2, evaluasi efektivitas konten, dan pengalaman belajar.

Hasil dan Pembahasan

1. Hasil Analisis Komparatif Lima Model MOOC di Indonesia

Analisis terhadap lima *platform* MOOC utama di Indonesia menghasilkan pemahaman yang komprehensif mengenai karakteristik, kekuatan, dan orientasi masing-masing model. Tabel komparatif mengindikasikan bahwa setiap model memiliki fokus strategis yang berbeda, sehingga tidak ada satu platform yang dapat dijadikan rujukan tunggal bagi pengembangan MOOC ITB Yadika. Hasil utama analisis dapat diringkas sebagai berikut:

- SPADA Indonesia memiliki kekuatan pada aspek akademik, terutama integrasi SKS, struktur kursus formal, dan dukungan kebijakan nasional.

- IndonesiaX menawarkan akses terbuka dan gratis, cocok untuk pengayaan belajar nonformal.
 - ICE Institute berperan sebagai *marketplace* MOOC antaruniversitas, memungkinkan pertukaran mata kuliah dan *microcredential* secara nasional.
 - UT MOOCs menguatkan misi pendidikan jarak jauh dan pembelajaran sepanjang hayat.
 - Skill Academy menonjol sebagai *platform* pelatihan vokasional berorientasi industri dan pasar kerja.
- Dengan demikian, ITB Yadika membutuhkan model hibrida yang memadukan keunggulan model akademik dan nonakademik guna memenuhi kebutuhan mahasiswa dan masyarakat Pasuruan.

2. Sintesis Temuan dan Relevansinya untuk ITB Yadika

Hasil sintesis menunjukkan empat tema utama yang paling menentukan keberhasilan implementasi MOOC di ITB Yadika, yaitu:

- Kebutuhan Model Hibrida (Academic Blend)**
Data menunjukkan adanya kesenjangan antara kebutuhan mahasiswa (yang membutuhkan MOOC terintegrasi kurikulum) dan kebutuhan masyarakat/UMKM (yang membutuhkan kursus praktis dan cepat). Oleh karena itu, model MOOC ITB Yadika harus menyediakan dua jalur yaitu *Academic Excellence Track* (SKS), dan *Professional & Technopreneurship Track* (*Microcredential*). Model ini sejalan dengan penelitian terbaru yang menunjukkan bahwa kombinasi pembelajaran formal dan vokasional meningkatkan *employability* lulusan dan relevansi pendidikan tinggi (Sun & Chen, 2020).
- Segmentasi Pengguna yang Beragam**
Analisis menunjukkan bahwa MOOCs yang berhasil biasanya memiliki segmentasi pengguna yang jelas (Adarkwah, 2021). Di ITB Yadika, terdapat tiga segmen utama yang memiliki karakteristik dan kebutuhan berbeda yaitu Mahasiswa ITB Yadika, Mahasiswa kampus lain melalui SPADA/ICE, masyarakat umum (UMKM, guru, pekerja). Segmentasi ini menjadi dasar untuk mendesain konten MOOC yang adaptif dan modular.
- Tata Kelola dan Teknologi sebagai Faktor Kritis**
Hasil kajian menunjukkan bahwa tata kelola

pembelajaran digital (*digital governance*) menjadi elemen paling penting di hampir semua studi MOOC (Goodyear & Ellis, 2019). Dalam konteks ITB Yadika, tata kelola ini mencakup kebijakan akademik, pengelolaan LMS, standardisasi konten multimedia, sertifikasi, dan jaminan mutu (*quality assurance*). Temuan ini ditegaskan pula oleh literatur bahwa keberhasilan MOOC lebih ditentukan oleh manajemen internal daripada sekadar jenis *platform* yang digunakan (Alturkistani et al, 2020).

d. Keberlanjutan Model (*Sustainability*)

Analisis menunjukkan bahwa *platform* MOOC yang bertahan lama memiliki strategi keberlanjutan pada tiga aspek yaitu keberlanjutan finansial (*funding model*), keberlanjutan konten (*content renewal*), keberlanjutan pengguna (*retention ecosystem*). Skill Academy dan UT MOOCs menjadi rujukan penting pada aspek ini. Untuk ITB Yadika, keberlanjutan dapat dicapai melalui model *freemium* (kelas dasar gratis, kelas vokasional berbayar ringan), kolaborasi industri, hibah pemerintah (ICE Institute, SPADA), integrasi dengan aktivitas pengabdian masyarakat.

3. Model Konseptual MOOC ITB Yadika

Berdasarkan seluruh temuan, dirumuskan model konseptual MOOC ITB Yadika yang terdiri atas empat pilar utama, yaitu:

- Academic Excellence Track***
Menawarkan mata kuliah berbasis SKS yang dapat diakses daring penuh atau blended. Konten mengikuti standar kurikulum Sistem Informasi dan teknologi-bisnis lainnya.
- Professional & Technopreneurship Track***
Terdiri dari kursus terapan seperti *digital marketing*, dasar *data analytics*, pemrograman web sederhana, dan *technopreneurship*.
- Community & Digital Literacy Track***
Berisi kursus literasi digital yang sangat dibutuhkan masyarakat Pasuruan dan pelaku UMKM.
- Governance & Technology System***
Unit khusus bertanggung jawab atas tata kelola konten, pengelolaan LMS, sertifikasi, kemitraan eksternal, *monitoring* dan evaluasi.

Tabel 1. Kesesuaian Model MOOC dengan Kondisi ITB Yadika

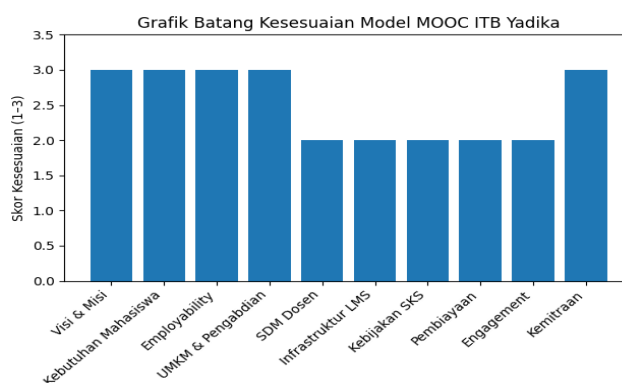
Aspek Kondisi ITB Yadika	Kebutuhan / Isu	Komponen Model MOOC	Indikator Data	Temuan / Data	Tingkat Kesesuaian (1-3)
Visi & Misi Institusi	Penguatan kampus teknologi dan bisnis berbasis digital	Academic, Professional, dan <i>Community Track</i>	Dokumen visi-misi dan renstra	Model MOOC hibrida selaras dengan arah pengembangan institusi	3
Kebutuhan Mahasiswa	Fleksibilitas belajar dan akses materi daring	<i>Academic Excellence Track</i>	Survei kebutuhan mahasiswa	Mahasiswa membutuhkan pembelajaran blended dan self-paced	3
<i>Employability & Technopreneurship</i>	Keterampilan digital dan kesiapan kerja	Professional & <i>Technopreneurship Track</i>	Tracer study dan kebutuhan industri	Microcredential mendukung peningkatan keterampilan praktis	3
Pengabdian Masyarakat & UMKM	Pelatihan digital berkelanjutan bagi UMKM	<i>Community & Digital Literacy Track</i>	Data mitra UMKM dan PKM	MOOC efektif sebagai media pelatihan skala luas	3
Kesiapan SDM Dosen	Kemampuan desain pembelajaran digital	<i>Governance & Technology</i> (pelatihan dan QA)	Jumlah dosen dan pengalaman e-learning	Perlu peningkatan kompetensi pedagogi digital	2

Aspek Kondisi ITB Yadika	Kebutuhan / Isu	Komponen Model MOOC	Indikator Data	Temuan / Data	Tingkat Kesesuaian (1-3)
Infrastruktur LMS	Kapasitas sistem dan dukungan multimedia	<i>Governance & Technology</i> (LMS dan SIAKAD)	Jenis LMS, <i>server</i> , <i>bandwidth</i>	LMS tersedia namun perlu peningkatan kapasitas	2
Kebijakan Akademik & SKS	Konversi SKS dan SOP blended learning	<i>Academic Track & Governance</i>	SK Akademik dan SOP MBKM	Regulasi internal perlu diperkuat	2
Keberlanjutan Pembiayaan	Biaya produksi dan operasional MOOC	<i>Freemium</i> dan kemitraan	RAB dan potensi hibah	Skema freemium dan hibah dinilai realistis	2
Engagement & Completion Rate	Risiko partisipasi dan penyelesaian rendah	<i>Gamification</i> dan <i>mentoring</i>	<i>Completion rate</i> dan aktivitas LMS	Perlu strategi retensi peserta	2
Kemitraan Nasional & Industri	Perluasan jangkauan dan reputasi institusi	ICE Institute, SPADA, dan mitra industri	MoU dan MoA aktif	Kemitraan memungkinkan scaling MOOC	3

Berdasarkan hasil pemetaan kesesuaian menggunakan skema penilaian tiga tingkat (1 = rendah, 2 = sedang, 3 = tinggi), model MOOC ITB Yadika memperoleh skor total 25 dari maksimum 30, yang setara dengan 83,3% tingkat kesesuaian institusional. Dari sepuluh aspek evaluasi yang dianalisis, lima aspek (50%) menunjukkan kesesuaian tinggi, sementara lima aspek lainnya (50%) berada pada tingkat kesesuaian sedang, dan tidak ditemukan aspek dengan kesesuaian rendah. Aspek dengan kesesuaian tinggi meliputi keselarasan dengan visi institusi, pemenuhan kebutuhan mahasiswa, penguatan *employability* dan *technopreneurship*, dukungan terhadap pengabdian masyarakat dan UMKM, serta potensi kemitraan nasional dan industri.

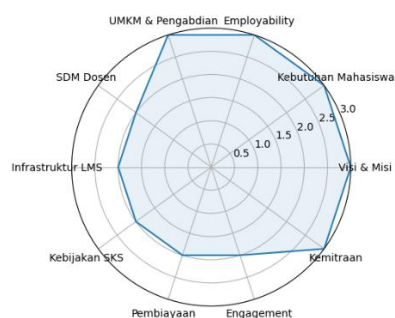
Sebaliknya, aspek kesiapan sumber daya dosen, infrastruktur LMS, kebijakan akademik dan konversi SKS, keberlanjutan pembiayaan, serta engagement dan *completion rate* peserta berada pada tingkat kesesuaian sedang, yang mengindikasikan perlunya penguatan bertahap melalui pelatihan pedagogi digital, peningkatan kapasitas teknologi, penyesuaian regulasi internal, dan penerapan strategi retensi pembelajar. Secara keseluruhan, nilai kesesuaian yang relatif tinggi ini menegaskan bahwa model MOOC ITB Yadika layak diimplementasikan secara bertahap dan memiliki fondasi yang kuat untuk dikembangkan lebih lanjut menjadi ekosistem pembelajaran digital institusional yang berkelanjutan dan adaptif terhadap kebutuhan multi-pemangku kepentingan.

Penilaian kesesuaian dilakukan menggunakan pendekatan *expert judgment* konseptual dengan skala ordinal tiga tingkat, yang umum digunakan pada tahap awal perancangan model dan evaluasi kelayakan sistem pendidikan berbasis teknologi. Gambar 2 menunjukkan distribusi skor kesesuaian (1–3) pada sepuluh aspek evaluasi. Terlihat bahwa Skor tertinggi (3) dicapai pada aspek visi & misi institusi, kebutuhan mahasiswa, *employability*, UMKM & pengabdian, serta kemitraan. Skor sedang (2) muncul pada aspek SDM dosen, infrastruktur LMS, kebijakan SKS, pembiayaan, dan engagement.



Gambar 2. Kesesuaian Model MOOC ITB Yadika

Visualisasi ini menegaskan bahwa kekuatan utama model MOOC ITB Yadika berada pada aspek strategis dan kebutuhan pemangku kepentingan, sementara aspek operasional masih membutuhkan penguatan bertahap. Gambar 3 memberikan gambaran holistik mengenai keseimbangan kesesuaian model. Pola radar yang relatif melebar pada lima dimensi utama menunjukkan fondasi institusional yang kuat, sedangkan penyempitan pada aspek operasional mengindikasikan area prioritas pengembangan.



Gambar 3. Radar Chart Kesesuaian Model

Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan bahwa model MOOC ITB Yadika memiliki tingkat kesesuaian tinggi pada aspek strategis dan kebutuhan pemangku kepentingan utama, sementara aspek operasional berada pada tingkat kesesuaian sedang. Pola ini mengindikasikan bahwa implementasi MOOC layak dilakukan secara bertahap dengan fokus awal pada penguatan tata kelola, sumber daya dosen, dan infrastruktur teknologi.

Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk merumuskan model *Massive Open Online Course* (MOOC) yang sesuai dengan

karakteristik dan kebutuhan Institut Teknologi dan Bisnis Yadika Pasuruan melalui analisis komparatif lima model MOOC di Indonesia serta sintesis praktik terbaik yang relevan. Hasil analisis menunjukkan bahwa model MOOC hibrida yang diusulkan, yang terdiri atas *Academic Excellence Track*, *Professional & Technopreneurship Track*, dan *Community & Digital Literacy Track* dengan dukungan *Governance & Technology System*, memiliki tingkat kesesuaian institusional yang tinggi.

Berdasarkan pemetaan kuantitatif menggunakan skema penilaian tiga tingkat, model MOOC ITB Yadika memperoleh skor kesesuaian sebesar 83,3%, yang mengindikasikan kelayakan implementasi model secara institusional. Aspek-aspek strategis seperti keselarasan dengan visi institusi, pemenuhan kebutuhan mahasiswa, penguatan *employability*, dukungan terhadap pengabdian masyarakat dan UMKM, serta potensi kemitraan nasional dan industri menunjukkan tingkat kesesuaian tinggi. Temuan ini menegaskan bahwa model MOOC tidak hanya relevan sebagai inovasi pembelajaran digital, tetapi juga sebagai instrumen strategis untuk memperluas dampak akademik dan sosial ITB Yadika.

Namun demikian, penelitian ini juga mengidentifikasi beberapa aspek operasional yang berada pada tingkat kesesuaian sedang, meliputi kesiapan sumber daya dosen, infrastruktur *Learning Management System* (LMS), kebijakan konversi SKS, keberlanjutan pembiayaan, serta keterlibatan dan tingkat penyelesaian peserta (*engagement* dan *completion rate*). Aspek-aspek tersebut menuntut penguatan bertahap melalui kebijakan internal, peningkatan kapasitas teknologi, serta pengembangan kompetensi pedagogi digital agar implementasi MOOC dapat berjalan optimal dan berkelanjutan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa model MOOC ITB Yadika layak untuk diimplementasikan secara bertahap dan berpotensi menjadi fondasi ekosistem pembelajaran digital institusional yang adaptif, inklusif, dan berorientasi pada peningkatan kualitas pembelajaran serta pemberdayaan masyarakat. Berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian, beberapa saran yang dapat diajukan adalah ITB Yadika disarankan untuk mengimplementasikan MOOC secara bertahap dengan prioritas awal pada *Academic Excellence Track* untuk mendukung pembelajaran berbasis SKS, sebelum memperluas ke jalur microcredential dan literasi digital masyarakat. Kemudian Perlu dilakukan program pelatihan berkelanjutan bagi dosen terkait desain instruksional digital, produksi konten multimedia, dan pemanfaatan LMS agar kualitas pembelajaran MOOC tetap terjaga.

Institusi perlu menyusun dan memperkuat regulasi internal terkait konversi SKS, standar evaluasi pembelajaran daring, serta mekanisme penjaminan mutu khusus untuk MOOC. Disarankan untuk mengadopsi skema pembiayaan hibrida melalui model *freemium*, kemitraan industri, serta pemanfaatan hibah nasional guna menjamin keberlanjutan operasional MOOC.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan evaluasi empiris terhadap penerimaan pengguna MOOC menggunakan model UTAUT2 guna mengukur pengaruh faktor-faktor penerimaan teknologi terhadap behavioral intention dan penggunaan aktual. ITB Yadika perlu mengembangkan sistem analitik pembelajaran untuk memantau tingkat keterlibatan, retensi, dan capaian

pembelajaran peserta sebagai dasar perbaikan berkelanjutan.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Program Studi Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya atas dukungan, bimbingan, dan fasilitas yang telah diberikan selama proses penelitian dan penyusunan artikel ini. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu keinsinyuran dan konstruksi. Juga kepada Persatuan Insinyur Indonesia (PII) Kabupaten Pasuruan yang telah memberikan banyak dukungan agar terus melanjutkan keilmuan profesi di bidang insinyur.

Referensi

- Astuti, R. (2020). *Manajemen laboratorium yang cerdas, cermat, dan selamat*. CV Jejak.
- Capryani, A., Fahma, F., & Nur, A. (2017). Perancangan dokumentasi sistem manajemen pada laboratorium mekatronika UNS berdasarkan SNI ISO/IEC 17025:2008. *Performa: Media Ilmiah Teknik Industri*, 16(1).
- Gunawan, K. S., & Rahardjo, J. (2022). Perancangan dokumen SNI ISO 17025:2017 untuk laboratorium beton dan konstruksi di Universitas Kristen Petra. *Jurnal Titra*, 10(2).
- Hadi, A. (2018). *Persyaratan umum kompetensi laboratorium pengujian & laboratorium kalibrasi ISO/IEC 17025:2017*. Gramedia Pustaka Utama.
- Heires, M. (2008). The international organization for standardization (ISO). *New Political Economy*, 13(3), 357–367.
- Nasional, B. S. (2009). *Pengantar standarisasi*. Badan Standardisasi Nasional.
- Nannyk Widyaningrum, S., Ilham, S., Sadat, L. A., Flora, H. S., Wijaya, E. P., IP, M. T., Novasani, R. J., Simarmata, N., Anjani, I. A. M. S., & IP, M. E. (2025). *Pengantar kesehatan dan keselamatan kerja (K3)*. CV Rey Media Grafika.
- Pratiwi, S. A., & Pudyastuti, P. S. (2023). Pengawasan dan pengendalian mutu beton pada pelaksanaan pembangunan bendungan Jlantah. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS*, 50–57.
- Puspitarini, E. W., Suprpto, A., Tantawi, I. A. R., Rusmiati, E., Jawak, G., Buan, F. C. H., & Kom, S. (2025). *Perancangan eksperimen*. CV Rey Media Grafika.
- Sepriano, S., Prasetyo, Y. P. W., Judijanto, L., Akhlak, M. L. M., Erna, A., Puspitarini, E. W., Adhicandra, I., Saifuddin, S., Sutoyo, N., & Efitra, E. (2025). *Multi criteria decision making: Teori dan praktik*. PT Sonpedia Publishing Indonesia.
- Setyoko, A. T., Achmadi, A., Kristiningrum, E., Susanto, D. A., Lukiawan, R., & Ayundyahrini, M. (2020). *Potret standarisasi dan penilaian kesesuaian di Indonesia dan negara lain*. Deepublish.
- Shin, S., Hong, J., & Kim, G. (2023). Study on the standard components of digital forensics laboratory. *Journal of Forensic Sciences*, 68(3), 839–855.
- Witara, K. (2018). *Cara singkat memahami sistem manajemen mutu ISO 9001:2015 dan implementasinya*. CV Jejak.