

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Penjadwalan proyek merupakan aspek krusial dalam manajemen konstruksi yang berfungsi untuk menentukan urutan aktivitas secara *optimal* guna memaksimalkan efisiensi penggunaan waktu serta mengurangi durasi penyelesaian proyek secara keseluruhan (Harahap & Muliono, 2025). Namun, kegagalan dalam mengintegrasikan batasan ketersediaan sumber daya ke dalam jadwal sering kali menyebabkan jadwal menjadi tidak *realistis* untuk diimplementasikan di lapangan. Ketidakakuratan dalam perencanaan akan berdampak langsung pada pembengkakan biaya operasional dan keterlambatan penyelesaian proyek yang signifikan (Hussain dkk., 2015)

Tantangan kompleksitas ini dikenal sebagai *Resource-Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP), sebuah masalah *optimasi* kombinatorial kategori NP-*hard*. Pada level ini, tingkat kesulitan dalam menemukan solusi meningkat secara eksponensial seiring bertambahnya jumlah aktivitas dan variasi sumber daya (Coelho & Vanhoucke, 2020). Alokasi tenaga kerja menjadi faktor paling krusial yang menentukan durasi proyek. Ketidakseimbangan alokasi baik kekurangan maupun kelebihan tenaga kerja dapat memicu konflik sumber daya, inefisiensi biaya, hingga keterlambatan yang menyebabkan durasi pengerjaan lebih lama. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan *optimasi* yang mampu menyelaraskan urutan kegiatan dengan keterbatasan tenaga kerja guna menghasilkan keputusan penjadwalan yang paling efektif.

Upaya untuk menyusun penjadwalan proyek dapat dilakukan melalui metode deterministik klasik seperti *Critical Path Method* (CPM) dan *Program Evaluation and Review Technique* (PERT). Metode-metode tersebut

telah lama diandalkan untuk mengidentifikasi aktivitas kritis yang menentukan durasi proyek, namun keduanya memiliki kelemahan karena cenderung mengasumsikan ketersediaan sumber daya yang tidak terbatas (Liu dkk., 2020). Padahal kondisi aktual di lapangan menunjukkan fakta sebaliknya, adanya batasan pada aspek tenaga kerja, material, dan alat berat menciptakan kompleksitas yang tidak mampu diselesaikan secara *optimal* hanya melalui pendekatan deterministik tradisional (Brucker & Knust, 1999).

Adanya kesenjangan antara solusi *optimal* secara teoretis dan kendala praktis pada metode eksak mendorong perubahan pendekatan solusi menuju penggunaan algoritma metaheuristik. Berbagai pendekatan metaheuristik telah dikembangkan guna mengatasi keterbatasan metode konvensional (K. Hussain dkk., 2018). Beberapa metode metaheuristik ini adalah *Simulated Annealing* (SA) yang meniru proses pendinginan logam, *Particle Swarm Optimization* (PSO) yang mengadaptasi perilaku kawanan hewan, hingga *Ant Colony Optimization* (ACO) yang terinspirasi dari koloni semut (Gendreau & Potvin, 2010). Di antara berbagai metode tersebut, *Genetic Algorithm* (GA) menjadi salah satu metode yang paling andal dan telah diterapkan secara luas dalam beberapa tahun terakhir karena ketahanan, fleksibilitas, dan kemampuannya dalam pencarian *global*.

GA adalah algoritma evolusi berbasis populasi yang meniru prinsip seleksi alam, GA meningkatkan kualitas solusi secara iteratif melalui mekanisme seleksi, *crossover*, dan mutasi (Popescu, 2025). Karakteristik GA sangat sesuai untuk memecahkan RCPSP karena mampu menangani variabel keputusan diskrit serta ruang pencarian yang luas tanpa memerlukan informasi gradien yang ketat. Karakteristik GA juga sesuai dengan struktur permasalahan RCPSP yang berkaitan dengan urutan aktivitas, sehingga representasi solusi dapat dibentuk dalam bentuk daftar prioritas aktivitas.

Meskipun GA memiliki kemampuan eksplorasi *global* yang baik, GA standar masih memiliki keterbatasan dalam eksploitasi lokal. Keterbatasan GA dalam eksploitasi lokal mendorong beberapa penelitian untuk menggabungkan GA dengan mekanisme pencarian tambahan. (Liu dkk., 2020) menerapkan GA pada RCPSP dengan mekanisme mutasi adaptif untuk menjaga keseimbangan antara eksplorasi pada tahap awal dan konvergensi pada tahap akhir. Hal ini menunjukkan bahwa performa GA pada RCPSP dapat ditingkatkan melalui mekanisme adaptif, terutama ketika algoritma mulai mengalami stagnasi. (Viana dkk., 2020) juga menunjukkan bahwa penggabungan GA dengan *local search* dan operator adaptif mampu meningkatkan peluang algoritma dalam memperoleh solusi yang lebih baik dibandingkan GA dengan parameter statis. Hal ini memperkuat bahwa mekanisme perbaikan lokal diperlukan untuk meningkatkan performa GA dalam masalah penjadwalan proyek.

Salah satu pendekatan pencarian lokal yang dapat digunakan untuk mengatasi kelemahan tersebut adalah *Variable Neighborhood Search* (VNS). Pemilihan AVNS dalam penelitian ini didasarkan pada kemampuannya sebagai mekanisme pencarian lokal adaptif. Prinsip utama VNS, sebagaimana diperkenalkan oleh (Mladenović & Hansen, 1997), terletak pada perubahan sistematis dari berbagai struktur lingkungan (*neighborhood structures*) selama proses pencarian. Dengan mengeksplorasi lingkungan yang bervariasi, seperti mekanisme *swap*, *insert*, dan *reverse*, akan memberikan peluang lebih besar bagi algoritma untuk menemukan solusi yang lebih baik dibandingkan apabila pencarian lokal hanya dilakukan dengan satu jenis perubahan urutan aktivitas.

Selain itu, (Valls dkk., 2008) telah menunjukkan bahwa *Hybrid Genetic Algorithm* dengan mekanisme *local improvement* dapat meningkatkan kualitas solusi pada RCPSP. Namun, mekanisme perbaikan

lokal yang digunakan dalam penelitian tersebut belum berbasis *Adaptive Variable Neighborhood Search*. Di sisi lain, (Gu dkk., 2019) telah membuktikan potensi penggabungan GA dan AVNS, tetapi penerapannya dilakukan pada *Flexible Job-shop Scheduling Problem* (FJSP), bukan pada RCPSP. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini menggunakan AVNS sebagai mekanisme eksploitasi lokal dalam HGA-AVNS untuk menguji apakah pemilihan *neighborhood* secara adaptif dapat meningkatkan kinerja GA dalam menyelesaikan RCPSP pada dataset PSPLIB.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini mengusulkan metode *Hybrid Genetic Algorithm* dengan *Adaptive Variable Neighborhood Search* (HGA-AVNS) untuk menyelesaikan RCPSP. GA digunakan sebagai mekanisme eksplorasi *global* untuk menghasilkan berbagai alternatif urutan aktivitas, sedangkan AVNS digunakan sebagai mekanisme eksploitasi lokal untuk memperbaiki solusi terbaik yang diperoleh dari proses evolusi GA. Hibridasi ini diharapkan dapat menciptakan keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi, sehingga algoritma tidak hanya mampu menjelajahi ruang solusi secara luas, tetapi juga mampu memperbaiki kualitas solusi secara lebih mendalam.

Data yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari *Project Scheduling Problem Library* (PSPLIB). PSPLIB merupakan *benchmark* yang menyediakan berbagai data penjadwalan proyek, termasuk *single-mode*, *multi-mode*, dan *resource investment problems*. Penggunaan PSPLIB dalam penelitian ini bertujuan agar hasil metode yang diusulkan dapat dibandingkan secara objektif dengan nilai *Best Known Solution* (BKS) dari repositori resmi PSPLIB. Dalam penelitian ini digunakan 30 instansi PSPLIB, yaitu J601_1 hingga J60_10, J901_1 hingga J901_10, dan J1201_1 hingga J1201_10. Ketiga instansi tersebut dipilih karena merepresentasikan tingkat kompleksitas yang berbeda berdasarkan jumlah aktivitas proyek, yaitu J60,

J90, dan J120. Dengan menggunakan tiga tingkat ukuran data tersebut, penelitian ini dapat mengevaluasi konsistensi HGA-AVNS dalam menyelesaikan RCPSP.

Berdasarkan tinjauan yang telah dijelaskan sebelumnya, terdapat gap penelitian di mana integrasi antara mekanisme AVNS dan GA belum diteliti secara mendalam dalam bidang RCPSP guna meminimasi durasi proyek pada dataset PSPLIB. Oleh karena itu, penulis mengusulkan implementasi GA yang diperkuat dengan *Adaptive Variable Neighborhood Search* (AVNS). Penelitian ini perlu dilakukan karena penyelesaian RCPSP memerlukan metode yang mampu menghasilkan solusi layak dan mendekati *optimal* dalam waktu komputasi yang realistis.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam penerapan mekanisme AVNS adaptif di dalam proses evolusi GA untuk menyelesaikan RCPSP. Berbeda dengan pencarian lokal yang menggunakan operator secara tetap, metode yang diusulkan menyesuaikan peluang pemilihan neighborhood berdasarkan keberhasilannya dalam memperbaiki solusi. Penelitian ini juga mengevaluasi metode melalui pengujian replikasi dan pengujian beberapa inst agar kemampuan metode dapat dinilai dari sisi kualitas solusi, kestabilan, dan konsistensinya pada beberapa ukuran permasalahan.

1.2 Rumusan masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana mengimplementasikan mekanisme AVNS ke dalam metode GA untuk meminimasi *makespan* pada RCPSP dataset PSPLIB J60, J90, dan J120?

2. Bagaimana kinerja HGA-AVNS yang diusulkan dalam meminimalkan durasi pengerjaan proyek pada dataset PSPLIB dibandingkan dengan metode GA standar dan VNS?
3. Bagaimana kinerja HGA-AVNS yang diusulkan jika dibandingkan dengan BKS pada masing-masing instansi PSPLIB?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merancang dan mengimplementasikan metode HGA-AVNS untuk menyelesaikan permasalahan RCPSP pada dataset PSPLIB J60, J90, dan J120.
2. Menguji kinerja metode HGA-AVNS yang diusulkan dalam meminimalkan *makespan* pada dataset PSPLIB J60, J90, dan J120 serta membandingkannya dengan GA standar, VNS, dan BKS yang telah ditemukan peneliti terdahulu.
3. Mengevaluasi kualitas solusi HGA-AVNS dengan membandingkan nilai *makespan* yang diperoleh terhadap *Best Known Solution* (BKS) pada masing-masing instansi.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

- a) Bagi Akademisi dan Peneliti
 1. Memberikan kontribusi ilmiah berupa pengembangan variasi algoritma HGA-AVNS, khususnya untuk masalah RCPSP.
 2. Menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya mengenai penggunaan mekanisme AVNS pada GA.

b) Bagi Praktisi Manajemen Proyek:

1. Praktisi bisa memanfaatkan pencarian solusi alokasi sumber daya dengan lebih cepat.
2. Membantu manajer proyek dalam pengambilan keputusan alokasi sumber daya yang lebih efisien guna menghindari keterlambatan proyek.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini tetap fokus dan terarah, ditetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Permasalahan yang diselesaikan adalah RCPSP *single-mode*, yaitu setiap aktivitas hanya memiliki satu alternatif pelaksanaan dengan durasi dan kebutuhan sumber daya yang tetap.
2. Instansi yang digunakan pada dataset PSPLIB hanya 10 instansi dari tiap dataset (J601_1 hingga J601_10, J901_1 hingga J901_10, dan J1201_1 hingga J1201_10).
3. Sumber daya yang dipertimbangkan hanya sumber daya *renewable* (4 jenis), sesuai dengan spesifikasi dataset PSPLIB. Sumber daya *non-renewable* tidak dipertimbangkan.
4. Fungsi objektif yang dioptimalkan adalah minimisasi *makespan* (durasi total penyelesaian proyek). Objektif lain seperti minimisasi biaya, *resource leveling*, atau *net present value* tidak dipertimbangkan.
5. Hubungan preseden antar aktivitas bersifat *finish-start* dengan *lag* = 0, artinya aktivitas penerus baru dapat dimulai setelah aktivitas pendahulu selesai sepenuhnya.

1.6 Asumsi

Asumsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Setiap aktivitas yang telah dimulai tidak dapat dihentikan sementara dan harus diselesaikan secara utuh sebelum sumber dayanya dapat digunakan oleh aktivitas lain.
2. Durasi pemrosesan setiap aktivitas diketahui secara pasti dan tidak berubah selama proses penjadwalan. Ketidakpastian dalam durasi tidak dipertimbangkan.
3. Kapasitas sumber daya untuk setiap jenis sumber daya tersedia secara konstan sepanjang horizon penjadwalan. Tidak ada variasi ketersediaan sumber daya antar periode waktu.
4. Setelah suatu aktivitas selesai, sumber daya yang digunakannya langsung tersedia kembali untuk aktivitas lain. Tidak ada sumber daya yang habis dikonsumsi (*non-renewable*).
5. Perpindahan sumber daya dari satu aktivitas ke aktivitas lain tidak memerlukan waktu persiapan tambahan.
6. Aktivitas *dummy start* dimulai pada waktu 0 dengan durasi 0 dan tanpa kebutuhan sumber daya.
7. Instansi PSPLIB J601_1 hingga J601_10, J901_1 hingga J901_10, dan J1201_1 hingga J1201_10 (durasi, kebutuhan sumber daya, kapasitas, relasi preseden) diasumsikan benar dan merepresentasikan permasalahan RCPSP secara valid.
8. *Best-Known Solutions* (BKS) yang dipublikasikan pada repositori PSPLIB dan diambil dari nilai *heuristic solution* (HRS) diasumsikan sebagai acuan solusi *feasible* terbaik yang tersedia untuk evaluasi kinerja algoritma pada J601_1, J901_1, dan J1201_9.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini disusun sebagai kerangka dan pedoman untuk memudahkan pembaca dalam memahami secara menyeluruh isi pembahasan pada setiap bab. Adapun susunan sistematika penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Bab ini mencakup latar belakang permasalahan penjadwalan proyek dengan keterbatasan sumber daya (RCPSP), perumusan masalah yang berfokus pada implementasi *Hybrid Genetic Algorithm* dengan mekanisme AVNS, tujuan penelitian, manfaat penelitian baik bagi akademisi maupun praktisi manajemen proyek, batasan masalah, asumsi yang digunakan, serta sistematika penulisan.

BAB II Landasan Teori

Bab ini menyajikan dasar teori dan kajian literatur yang menjadi acuan dalam penelitian. Pembahasan mencakup teori penjadwalan proyek dan formulasi matematis RCPSP, PSPLIB sebagai *benchmark* standar, *Genetic Algorithm* beserta operator-operatornya (seleksi, *crossover*, mutasi) dan skema dekoding SSGS, konsep AVNS sebagai strategi pencarian lokal yang dinamis, serta integrasinya ke dalam model *Hybrid Genetic Algorithm*.

BAB III Metode Penelitian

Bab ini menjelaskan tahapan penelitian secara sistematis. Pembahasan dimulai dari deskripsi dataset PSPLIB dan instansi yang digunakan, meliputi struktur instansi (aktivitas + 2 *dummy*, 4 jenis sumber daya *renewable*), format *file*, parameter yang diekstrak (durasi, kebutuhan sumber daya, kapasitas, dan relasi preseden), serta BKS yang dijadikan acuan evaluasi.

Selanjutnya perancangan algoritma *Hybrid Genetic Algorithm* yang mengintegrasikan mekanisme AVNS diuraikan, penentuan parameter algoritma, serta definisi metrik evaluasi dan uji statistik yang digunakan. Seluruh implementasi metaheuristik dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python pada platform Google Colab.

BAB IV Pengumpulan dan Pengolahan Data

Bab ini menjelaskan data yang digunakan dalam penelitian, teknik pengumpulan data, instrumen penelitian, serta tahapan pengolahan data. Bab ini juga menjelaskan proses implementasi GA standar dan HGA-AVNS. Hasil pengolahan data berupa nilai *makespan*, *runtime*, solusi penjadwalan, dan data replikasi eksperimen menjadi dasar analisis pada Bab V.

BAB V Analisis Data

Bab ini membahas hasil pengolahan data secara kuantitatif dan teoretis. Analisis dilakukan dengan membandingkan performa HGA-AVNS terhadap GA standar dan nilai acuan PSPLIB. Pembahasan mencakup analisis nilai *makespan*, deviasi terhadap BKS, waktu komputasi, konvergensi algoritma, serta uji statistik.

BAB VI Kesimpulan dan Saran

Bab ini memuat kesimpulan yang menjawab rumusan masalah berdasarkan hasil penelitian dan analisis. Selain itu, bab ini berisi saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya, seperti pengujian pada dataset lain, pengembangan penyesuaian parameter algoritma, serta penerapan pada kasus penjadwalan proyek nyata.