

PENERAPAN *CRITICAL PATH METHOD* DAN *SIMULATED ANNEALING* UNTUK OPTIMASI PENJADWALAN PADA PROYEK PEMBANGUNAN SUATU GEDUNG KAMPUS UPI SUMEDANG

Aida Kusuma Wardah

Program Studi Matematika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia
e-mail: aidakusuma1331@gmail.com

Kartika Yulianti*

Program Studi Matematika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia
e-mail: kartika.yulianti@upi.edu

Sumanang Muhtar Gozali

Program Studi Matematika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia
e-mail: gozali@upi.edu

Abstrak

Penjadwalan proyek konstruksi merupakan elemen penting dalam manajemen proyek karena berdampak langsung terhadap durasi pelaksanaan dan efisiensi penggunaan sumber daya. Penelitian ini mengusulkan pendekatan kombinasi antara *Critical Path Method* (CPM) dan algoritma *Simulated Annealing* (SA) untuk mengoptimalkan jadwal pembangunan suatu gedung di kampus Universitas Pendidikan Indonesia (UPI) Sumedang. Model bertujuan meminimalkan total durasi proyek (*makespan*) dengan tetap memperhatikan ketergantungan antar aktivitas dan keterbatasan kapasitas sumber daya manusia. CPM digunakan untuk menghitung jalur kritis dan waktu toleransi keterlambatan (*slack*), sedangkan SA mengoptimasi penjadwalan aktivitas non-kritis melalui eksplorasi solusi alternatif. Implementasi dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python dan data aktual proyek. Hasil menunjukkan bahwa kombinasi metode ini mampu menurunkan durasi proyek dari 23 minggu menjadi 22 minggu, atau sekitar 4,35%, tanpa melanggar batasan sumber daya. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan yang diajukan efektif dalam meningkatkan efisiensi penjadwalan proyek secara realistis.

Kata Kunci: Penjadwalan proyek, *Critical Path Method*, *Simulated Annealing*, Jalur kritis, Optimasi.

Abstract

Project scheduling in construction is a crucial component of project management, as it directly impacts the duration and efficiency of resource utilization. This study proposes a combined approach using the Critical Path Method (CPM) and the Simulated Annealing (SA) algorithm to optimize the schedule of a building construction project at Universitas Pendidikan Indonesia (UPI) Sumedang Campus. The model aims to minimize the total project duration (makespan) while considering activity dependencies and limited human resource capacity. CPM is applied to identify the critical path and slack time, whereas SA explores alternative solutions by adjusting the schedule of non-critical activities. The model is implemented using Python programming language with real project data, including activity durations, dependencies, and resource requirements. Results show that the proposed approach reduces the project duration from 23 weeks to 22 weeks, achieving a 4.35% improvement without violating resource constraints. This indicates that the combined CPM and SA method is effective in enhancing realistic and efficient project scheduling.

Keywords: Project scheduling, *Critical Path Method*, *Simulated Annealing*, Critical path, Optimization

PENDAHULUAN

Penjadwalan proyek merupakan salah satu komponen krusial dalam manajemen proyek, terutama pada proyek berskala besar yang melibatkan banyak aktivitas dan sumber daya.

Efisiensi durasi proyek menjadi faktor penentu karena berdampak langsung pada biaya yang dikeluarkan. Salah satu permasalahan yang muncul adalah *Resource Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP), yaitu masalah optimasi untuk mengatur jadwal aktivitas proyek dengan mempertimbangkan

keterbatasan sumber daya (Blazewicz et al., 1983). RCPSP tergolong sebagai masalah optimasi kombinatorial *NP-hard* yang kompleks, sehingga sulit dipecahkan secara efisien menggunakan metode eksak, terutama untuk proyek skala besar (Hartmann & Briskorn, 2010).

Salah satu metode yang umum digunakan untuk mengatasi masalah ini adalah *Critical Path Method* (CPM). CPM berfokus pada pengelolaan waktu dengan mengidentifikasi jalur kritis, yaitu rangkaian tugas yang menentukan durasi total proyek (Huda & Prasinta, 2024; Wilar et al., 2025). Beberapa penelitian telah membuktikan keunggulan CPM. (Wijanarko et al., 2024) menyatakan metode CPM memungkinkan analisis yang komprehensif terkait dengan waktu optimal pelaksanaan setiap kegiatan dalam proyek, sementara Aprillia et al., (2023) menyatakan bahwa CPM mampu menyelesaikan proyek lebih cepat daripada metode PERT. Dengan demikian, CPM terbukti unggul dalam mengelola waktu dan memastikan proyek selesai sesuai jadwal.

Metode metaheuristik lain yang populer untuk masalah optimasi adalah *Simulated Annealing* (SA). SA dikenal efektif karena kemampuannya menghindari solusi optimal lokal, yaitu kondisi di mana algoritma terjebak pada solusi yang baik namun bukan yang terbaik secara global (Hidayati et al., 2019). Sejak diperkenalkan oleh Kirkpatrick pada tahun 1983 untuk menyelesaikan masalah optimasi, SA telah banyak diterapkan dalam berbagai konteks penjadwalan. Penelitian oleh Wright (1989), Jeffcoat dan Bulfin (1993), serta Boctor (1996) secara konsisten menunjukkan bahwa SA mampu menghasilkan kualitas solusi yang lebih unggul dibandingkan algoritma heuristik lainnya dalam menangani masalah penjadwalan dengan batasan sumber daya (Kirkpatrick et al., 1983). Berdasarkan keunggulan pada masing-masing metode dan merujuk pada berbagai penelitian terdahulu terkait optimasi penjadwalan proyek, penelitian ini berupaya menggabungkan CPM dan SA untuk mengoptimalkan penjadwalan proyek konstruksi suatu gedung di Universitas Pendidikan Indonesia (UPI) kampus Sumedang. Ide utama dari penggabungan ini adalah memanfaatkan CPM untuk mengidentifikasi jalur kritis dan memberikan struktur jadwal awal, yang kemudian dioptimalkan lebih lanjut oleh SA untuk meminimalkan waktu penyelesaian serta memaksimalkan efisiensi

penggunaan sumber daya. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang menggabungkan CPM dengan Algoritma Genetika (Aristyono et al., 2021), penelitian ini menawarkan pendekatan baru dengan SA. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi alternatif metode dalam penyelesaian masalah penjadwalan proyek konstruksi maupun masalah lain yang relevan.

KAJIAN TEORI

CRITICAL PATH METHOD (CPM)

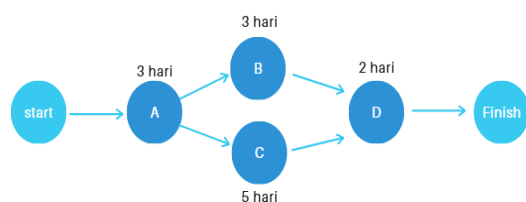
CPM adalah metode analisis jaringan yang digunakan untuk menentukan waktu penyelesaian proyek, mengidentifikasi jalur kritis, dan memastikan aktivitas-aktivitas yang memengaruhi durasi total proyek (Nalhadi & Suntana, 2017). Hasil perhitungan CPM ini akan digunakan untuk inisialisasi jadwal tetangga baru dalam algoritma optimasi. Langkah-langkah dalam CPM adalah:

1. Identifikasi aktifitas dan Ketergantungan

Langkah awal dalam CPM adalah mengidentifikasi seluruh aktivitas proyek beserta durasinya, serta hubungan ketergantungan antar aktivitas (*predecessor*). Contohnya, jika aktivitas A harus selesai sebelum B dimulai, maka A adalah *predecessor* dari B. Sebagai contoh, data pada Tabel 1 dapat dibuat diagram jaringan yang menggambarkan alur aktivitas proyek seperti Gambar 1. Diagram jaringan menunjukkan bahwa aktivitas A harus selesai terlebih dahulu sebelum B dan C dimulai, sementara D bergantung pada B dan C.

Tabel 1. Data Aktivitas Proyek

Kode Aktivitas	Durasi (hari)	Predecessor
A	0	-
B	3	A
C	5	A
D	2	B, C



Gambar 1. Contoh Diagram Sederhana

2. Perhitungan waktu maju (*forward pass*)
Forward pass digunakan untuk menentukan waktu mulai paling awal (*early start - ES*) dan waktu selesai paling awal (*early finish - EF*) bagi setiap aktivitas (Soeharto, 1997). Perhitungan *early start* menggunakan formula:

$$ES_i = \begin{cases} 0 & , i = 0 \\ \max \{EF_h \mid h \in Pred_i\} & , i \neq 0 \end{cases}$$

$$EF_i = ES_i + d_i$$

dengan ES_i adalah waktu mulai paling awal untuk aktivitas i , EF_h adalah waktu selesai paling awal dari aktivitas pendahulu h , EF_i adalah waktu penyelesaian paling awal untuk aktivitas i , d_i adalah durasi aktivitas i .

3. Perhitungan waktu mundur (*backward pass*)
Backward pass digunakan untuk menghitung waktu mulai paling lambat (*late start - LS*) dan waktu selesai paling lambat (*late finish - LF*) agar proyek tetap selesai tepat waktu (Soeharto, 1997).

$$LF_i = \begin{cases} c & , i = n + 1 \\ \min \{LS_k \mid k \in Suc_i\} & , i \neq n + 1 \end{cases}$$

$$LS_i = LF_i - d_i$$

dengan LF_i adalah waktu penyelesaian paling akhir untuk kegiatan i , LS_k adalah waktu mulai lambat dari aktivitas penerus k , c merupakan *deadline* proyek, dan LS_i adalah waktu mulai paling akhir untuk kegiatan i .

4. Identifikasi jalur kritis
 Jalur kritis terdiri dari aktivitas-aktivitas yang memiliki kelonggaran waktu atau *slack (tf)* nol dihitung dengan :

$$tf = LF - EF = LS - ES$$

Jika nilai $tf = 0$, maka aktivitas tersebut tidak memiliki kelonggaran waktu dan menjadi bagian dari jalur kritis (Soeharto, 1997). Penundaan aktivitas ini akan langsung berdampak pada keterlambatan proyek secara keseluruhan.

5. Penentuan durasi proyek dan optimasi
 Durasi proyek ditentukan oleh total durasi aktivitas dalam jalur kritis. Sebagai contoh, jika jalur kritis terdiri dari aktivitas $A \rightarrow C \rightarrow D$ dengan durasi masing-masing 3, 5, dan 2 hari, maka durasi total proyek adalah $3 + 5 + 2 = 10$ hari.

Langkah selanjutnya adalah proses optimasi jadwal menggunakan algoritma heuristik seperti Simulated Annealing, untuk menghasilkan jadwal yang lebih

efisien dengan tetap mematuhi ketergantungan antar aktivitas.

SIMULATED ANNEALING (SA)

Simulated Annealing (SA) adalah algoritma metaheuristik yang terinspirasi dari proses pendinginan logam. Dalam konteks penjadwalan proyek, SA digunakan untuk mencari solusi optimal dengan cara menjelajahi berbagai kemungkinan jadwal, termasuk menerima solusi yang kurang baik pada awal iterasi guna menghindari jebakan lokal optimum (Silitonga & Apdillah, 2017).

- 1) Inisialisasi Parameter Input

Parameter utama SA meliputi:

- T_a (suhu awal): mengatur fleksibilitas penerimaan solusi di awal iterasi.
- T_f (suhu akhir): batas minimal suhu yang menandakan konvergensi.
- α (faktor pendinginan): menentukan laju penurunan suhu antar iterasi.

- 2) Inisialisasi Solusi Awal

Solusi awal disusun berdasarkan urutan aktivitas proyek sesuai ketergantungan (*predecessor*) dan durasi. Contohnya, jika aktivitas A berdurasi 5 hari dan menjadi prasyarat aktivitas B berdurasi 3 hari, maka jadwal awal dimulai dari $A \rightarrow B$. Solusi awal ini harus memenuhi semua kendala dependensi antar aktivitas.

- 3) Pembangkitan Solusi Tetangga

Solusi tetangga dihasilkan dengan memodifikasi jadwal sebelumnya, tanpa melanggar ketergantungan. Prosedurnya:

- a) Pemilihan aktivitas acak (non-kritis).
- b) Penggeseran waktu mulai aktivitas untuk menyesuaikan urutan atau mengurangi waktu menganggur.
- c) Verifikasi dependensi: aktivitas tidak boleh mulai sebelum seluruh *predecessor*-nya selesai.

- 4) Penghitungan Perubahan Biaya

Biaya optimasi biasanya direpresentasikan dalam durasi penyelesaian proyek. Selisih durasi antara solusi awal dan solusi tetangga dinyatakan dengan:

$$\delta = f_{n+1} - f_{n+1}'$$

dengan f_{n+1} adalah waktu selesai proyek terakhir pada solusi sebelumnya, f_{n+1}' adalah waktu selesai proyek terakhir pada solusi

selanjutnya. Jika $\delta \geq 0$, solusi tetangga langsung diterima. Jika $\delta < 0$, maka dihitung probabilitas penerimaannya:

$$P(\delta) = \exp\left(-\frac{|\delta|}{T_a}\right)$$

di mana δ merupakan perubahan biaya antara solusi sebelumnya dan solusi selanjutnya, dan T_a adalah suhu awal.

5) Proses Pendinginan

Suhu diturunkan secara bertahap agar pencarian solusi berpindah dari eksplorasi ke eksploitasi. Rumus pendinginan suhu:

$$T_{a+1} = \alpha \cdot T_a$$

di mana:

T_a : suhu pada iterasi ke- a

α : faktor pendinginan

6) Penghentian Algoritma

Algoritma dihentikan ketika suhu mendekati nilai T_{min} . Jika:

$$T \leq T_{min}$$

maka iterasi dianggap konvergen dan solusi saat ini menjadi solusi akhir.

METODE

Penelitian ini menggunakan dua metode, yaitu CPM dan SA. CPM digunakan untuk menentukan jalur kritis proyek dan menyusun jadwal awal berdasarkan urutan ketergantungan aktivitas. Selanjutnya, SA digunakan sebagai metode optimasi untuk memperoleh jadwal dengan durasi penyelesaian proyek yang lebih efisien.

Dalam penelitian ini, kedua metode tersebut diterapkan pada model *Resource Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP) yang mempertimbangkan batasan durasi, ketergantungan aktivitas, dan keterbatasan sumber daya tenaga kerja. Model RCPSP bertujuan meminimalkan waktu penyelesaian proyek. Model ini dibangun dengan asumsi sebagai berikut:

- Seluruh durasi aktivitas diketahui sebelumnya dan bersifat tetap.
- Aktivitas hanya dapat dimulai setelah semua aktivitas pendahulunya selesai.
- Ketersediaan dan kebutuhan tenaga kerja tetap sepanjang proyek berlangsung.
- Tidak ada penambahan atau pengurangan tenaga kerja selama proses penjadwalan.
- Proyek berlangsung tanpa gangguan eksternal.

Misalkan f adalah himpunan waktu selesai setiap aktivitas, $f = \{f_i | i \in A\}$ dengan f_i adalah waktu selesai aktivitas i . Misalkan pula $A(t) = \{i \in A | f_i - d_i \leq t \leq f_i\}$ adalah himpunan aktivitas yang aktif pada saat t , artinya aktivitas tersebut sedang dalam proses pengerjaan (Maghfiroh & Endrayanto, 2022), di mana:

- A : himpunan aktivitas untuk proyek yang terdiri dari $n + 2$ aktivitas.
- f_i : waktu selesai setiap aktivitas i ($i = 0, 1, 2, \dots, n + 1$).
- d_i : durasi aktivitas i .
- $Pred_i$: aktivitas pendahulu (*predecessor*) dari i , $Pred_i = \{j | M_{i,j} = 1\}$.
- Suc_i : aktivitas penerus (*successor*) dari i , $Suc_i = \{j | M_{i,j} = 1\}$.
- R_k : Kapasitas maksimum untuk sumber daya tipe k , dengan $k \in K$.
- r_{ik} : Jumlah sumber daya tipe k yang dibutuhkan oleh aktivitas i , $i \in A$ $k \in K$.
- A_t : aktivitas yang berjalan pada waktu ke- t .
- b : *ready-time*, yaitu waktu yang diperbolehkan untuk memulai proyek.
- M : matriks ketergantungan antar aktivitas berukuran $(n + 2) \times (n + 2)$.

Fungsi tujuan:

$$\min f_{n+1}$$

dengan f_{n+1} sebagai waktu penyelesaian proyek.

Kendala:

1. Hubungan antar aktivitas
 $f_h \leq f_i - d_i, h \in Pred_i; i = 1, 2, \dots, n + 1,$
2. Ketersediaan sumber daya

$$\sum_{i \in A_t} r_{ik} x_{it} \leq R_k, \forall k \in K, ; t \geq 0,$$

3. Waktu mulai proyek

$$f_0 \geq b.$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

STUDI KASUS DAN DATA PROYEK

Penelitian ini diterapkan pada proyek pembangunan suatu gedung kampus Universitas Pendidikan Indonesia (UPI) di Sumedang, menggunakan data sekunder dari laporan pelaksanaan proyek tahun 2022. Data mencakup daftar aktivitas proyek, durasi pelaksanaan, hubungan ketergantungan antar aktivitas (*predecessor*), serta kebutuhan tenaga kerja

berdasarkan jenis sumber daya yang tersedia seperti yang ditampilkan pada Tabel 2. Data ini digunakan sebagai input utama dalam proses pemodelan dan optimasi penjadwalan proyek.

Tabel 2. Cuplikan Data aktivitas proyek

Kode	Durasi (minggu)	Predecessor	r_1	r_2	r_3	...	r_{37}
A	4	-	1	2	3	...	0
B	6	A	0	1	0	...	0
C	20	-	0	1	0	...	3
D	4	-	2	2	2	...	0
E	3	D	1	0	2	...	0
F	5	D	0	1	0	...	0
G	5	F	1	0	0	...	0
H	5	F	1	0	0	...	0
I	5	H	0	0	0	...	0
...
AO	8	F	0	0	1	...	0

Tabel 3. Batas Sumber Daya Tiap Kategori

Kode	Deskripsi	Jumlah
R_1	Tim Managerial	4
R_2	Supervisor (arsitek dan ME)	5
R_3	Pelaksana Lapangan (Sipil dan ME)	10
R_4	Surveyor	6
R_5	Administrasi	4
R_6	Logistik arsitek dan ME	8
...
R_{37}	Tukang Kanopi	8

Tabel 2 merupakan cuplikan data aktivitas proyek yang digunakan sebagai input dalam proses penjadwalan dan optimasi. Setiap baris pada tabel ini merepresentasikan satu aktivitas dalam proyek pembangunan, dengan informasi berupa kode aktivitas, durasi pelaksanaan dalam satuan minggu, *predecessor* (aktivitas pendahulu), serta kebutuhan terhadap berbagai jenis sumber daya (r_1 hingga r_{37}). Nilai pada kolom r_1 hingga r_{37} menunjukkan jumlah unit sumber daya dari masing-masing kategori yang dibutuhkan selama aktivitas tersebut berlangsung.

Sementara itu, Tabel 3 memuat informasi batas ketersediaan maksimum untuk setiap jenis sumber daya yang digunakan dalam proyek. Setiap sumber

daya diberi kode R_1 hingga R_{37} , dilengkapi dengan keterangan jenis tenaga kerja atau peran masing-masing, serta kapasitas maksimum (jumlah orang/unit) yang tersedia pada setiap minggunya selama proyek berlangsung.

CRITICAL PATH METHOD (CPM)

Dalam penelitian ini, metode CPM diterapkan untuk menentukan jalur kritis pada proyek pembangunan suatu gedung UPI kampus Sumedang. Jalur kritis merupakan urutan aktivitas yang menentukan durasi maksimum penyelesaian proyek, sehingga aktivitas di dalamnya tidak boleh mengalami keterlambatan.

Langkah awal penerapan CPM dimulai dengan identifikasi aktivitas dan ketergantungan antar aktivitas. Data proyek mencakup durasi tiap aktivitas, hubungan *predecessor* (ketergantungan), serta kebutuhan sumber daya manusia, sebagaimana dirangkum dalam Tabel 2 dan Tabel 3. Informasi ini digunakan untuk membentuk jaringan aktivitas proyek.

Selanjutnya dilakukan perhitungan waktu maju (*forward pass*) untuk menentukan waktu paling awal aktivitas dapat dimulai (*Early Start/ES*) dan selesai (*Early Finish/EF*). Setelah itu, dilakukan perhitungan waktu mundur (*backward pass*) guna menentukan waktu paling lambat aktivitas dapat dimulai (*Late Start/LS*) dan selesai (*Late Finish/LF*) tanpa menunda penyelesaian proyek. Proses ini dimulai dari aktivitas terakhir dan dihitung mundur menggunakan nilai makespan sebagai acuan.

Tabel 4. Hasil Perhitungan CPM

Kode	Durasi (minggu)	Predecessor	ES	EF	LS	LF	tf
A	4	-	0	4	12	16	12
B	6	A	4	10	16	22	12
C	20	-	0	20	2	22	2
D	4	-	0	4	0	4	0
E	3	D	4	7	8	11	4
F	5	D	4	9	4	9	0
G	5	F	9	14	11	16	2
H	5	F	9	14	9	14	0
I	5	H	14	19	14	19	0
...
AO	8	F	9	17	14	22	5

Berdasarkan hasil perhitungan CPM yang ditampilkan pada Tabel 4, jalur kritis ditentukan melalui analisis waktu maju (*forward pass*) dan waktu mundur (*backward pass*), yang menghasilkan nilai *Early Start (ES)*, *Early Finish (EF)*, *Late Start (LS)*, *Late Finish (LF)*, dan *slack (tf)* untuk setiap aktivitas. Aktivitas yang memiliki nilai *slack* sebesar nol, yaitu D, F, H, I, J, L, M, dan X, merupakan bagian dari jalur kritis karena tidak memiliki toleransi keterlambatan. Artinya, keterlambatan pada salah satu aktivitas ini akan langsung berdampak pada keterlambatan keseluruhan proyek. Sementara aktivitas lainnya tergolong non-kritis karena masih memiliki *slack* atau kelonggaran waktu.

SIMULATED ANNEALING (SA)

Setelah jalur kritis proyek ditentukan menggunakan metode CPM, langkah selanjutnya adalah melakukan optimasi penjadwalan dengan mempertimbangkan keterbatasan sumber daya yang tersedia. Dalam penelitian ini, digunakan algoritma SA sebagai pendekatan metaheuristik untuk memperoleh jadwal proyek yang lebih optimal.

Inisialisasi Parameter dan Solusi Awal

Parameter utama SA yang digunakan dalam implementasi:

- Suhu awal (T_a): 100 - memberikan fleksibilitas tinggi di awal pencarian.
- Suhu minimum (T_f): 0.01 - titik konvergensi algoritma.
- Faktor pendinginan (α): 0.9 - penurunan suhu sebesar 10% setiap iterasi.

Solusi awal disusun berdasarkan jadwal proyek yang ada (mengacu pada Tabel 2) yang telah memenuhi semua batasan, baik dari sisi ketergantungan antar aktivitas (*predecessor*) maupun ketersediaan sumber daya.

Pembangkitan Solusi Tetangga

Pembangkitan solusi tetangga dilakukan dengan memodifikasi waktu mulai aktivitas non-kritis. Proses ini terdiri dari beberapa tahap:

- Seleksi Aktivitas Target:
Algoritma memilih secara acak aktivitas non-kritis yang memiliki *slack time* ($tf > 0$). Berdasarkan Tabel 4, aktivitas yang dapat dimodifikasi antara lain:
Aktivitas A (*slack* = 12 minggu)
Aktivitas B (*slack* = 12 minggu)
Aktivitas C (*slack* = 2 minggu)

Aktivitas E (*slack* = 4 minggu)

Aktivitas AO (*slack* = 5 minggu)

- Perhitungan Rentang Pergeseran:
Untuk setiap aktivitas terpilih, rentang pergeseran dihitung berdasarkan *slack time* yang tersedia. Misalnya, aktivitas A dengan *slack* 12 minggu dapat digeser antara 0 hingga 12 minggu dari waktu mulai awalnya.
- Validasi Kendala:
Setiap solusi tetangga harus memenuhi kendala, yaitu:
 - i) kendala ketergantungan: aktivitas tidak boleh mulai sebelum semua predecessor selesai,
 - ii) kendala sumber daya: total kebutuhan tidak boleh melebihi kapasitas pada setiap periode,
 - iii) kendala waktu mulai: aktivitas tidak dapat mulai sebelum waktu yang diizinkan.

Validasi dan Perhitungan Makespan

Validasi solusi dilakukan dengan memeriksa penggunaan sumber daya pada setiap periode waktu. Berdasarkan data Tabel 3, kapasitas maksimum setiap jenis sumber daya telah ditentukan, misalnya Tim Managerial (R_1) sebanyak 4 unit dan Pelaksana Lapangan (R_3) sebanyak 10 unit.

Contoh Evaluasi Periode Minggu ke-5: Jika pada minggu ke-5 terdapat aktivitas F, C, dan E yang berjalan bersamaan, maka total kebutuhan sumber daya dihitung sebagai penjumlahan kebutuhan masing-masing aktivitas. Dari Tabel 2:

- Kebutuhan R_1 : $0 (F) + 0 (C) + 1 (E) = 1 \text{ unit} \leq 4 \text{ unit}$ (*feasible*)
- Kebutuhan R_2 : $1 (F) + 1 (C) + 0 (E) = 2 \text{ unit} \leq 5 \text{ unit}$ (*feasible*)
- Kebutuhan R_3 : $0 (F) + 0 (C) + 2 (E) = 2 \text{ unit} \leq 10 \text{ unit}$ (*feasible*)

Makespan dihitung sebagai waktu selesai aktivitas terakhir dalam proyek. Solusi yang *feasible* kemudian dievaluasi berdasarkan perubahan *makespan* (δ) terhadap solusi sebelumnya.

Kriteria Penerimaan Solusi

Penerimaan solusi tetangga mengikuti kriteria probabilistik Metropolis (Metropolis et al., 1953):

- Solusi yang Lebih Baik ($\delta \geq 0$):
Jika solusi tetangga memberikan *makespan* yang lebih baik atau sama, solusi langsung diterima.

- Solusi yang Lebih Buruk ($\delta < 0$):
Solusi dengan makespan lebih besar diterima berdasarkan probabilitas:

$$P(\delta) = \exp\left(-\frac{|\delta|}{T_a}\right)$$

Contoh perhitungan: jika $\delta = 8$ minggu dan $T_a = 100$, maka:

$$P(\delta) = \exp\left(-\frac{|8|}{100}\right) \approx 0.923$$

Solusi diterima jika nilai random (r) $[0,1] < 0.923$.

HASIL OPTIMASI JADWAL

Setelah proses optimasi selesai, algoritma menyimpan jadwal terbaik dengan durasi proyek terpendek yang berhasil diperoleh seperti yang ditampilkan pada Tabel 5. Hasil penjadwalan menunjukkan penurunan durasi proyek dari 23 minggu menjadi 22 minggu, atau sekitar 4,35% lebih efisien. Ini membuktikan bahwa kombinasi metode CPM dan SA mampu menghasilkan jadwal yang lebih optimal tanpa mengubah batasan sumber daya yang ada.

Tabel 5. Cuplikan Data aktivitas proyek

Kode	Minggu											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	22
A	*	*	*	*							...	
B					*	*	*	*	*	*	...	
C	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	...	
D	*	*	*	*							...	
E					*	*	*				...	
F					*	*	*	*	*		...	
G										*	...	
H										*	...	
I												
...	
AO										*	...	

Tabel 5 menampilkan cuplikan data hasil optimasi penjadwalan proyek dalam bentuk Gantt chart, yaitu representasi visual penjadwalan aktivitas terhadap waktu (dalam minggu). Setiap baris menunjukkan aktivitas tertentu, sementara simbol Bintang "*" pada kolom minggu menunjukkan kapan aktivitas tersebut dijadwalkan berlangsung. Misalnya,

aktivitas A dijadwalkan berlangsung dari minggu ke-1 hingga minggu ke-4, sedangkan aktivitas B dimulai pada minggu ke-5 hingga minggu ke-10.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada kontraktor salah satu gedung UPI kampus Sumedang yang telah memberikan data dalam penelitian ini.

PENUTUP

SIMPULAN

Penelitian ini mengkaji penjadwalan proyek dengan pendekatan *Resource-Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP) menggunakan kombinasi metode *Critical Path Method* (CPM) dan *Simulated Annealing* (SA). CPM digunakan untuk menghitung waktu mulai dan selesai aktivitas serta mengidentifikasi jalur kritis proyek, sedangkan SA diterapkan untuk mengoptimalkan jadwal melalui eksplorasi solusi alternatif pada aktivitas non-kritis.

Model diimplementasikan pada proyek pembangunan suatu gedung UPI kampus Sumedang, dengan data berupa durasi, ketergantungan antar aktivitas, dan kebutuhan tenaga kerja. Hasil optimasi menunjukkan adanya pengurangan makespan dari 23 minggu menjadi 22 minggu (efisiensi sebesar 4,35%). Perbaikan ini dilakukan tanpa melanggar batasan teknis proyek, dan menunjukkan bahwa kombinasi metode CPM dan SA dapat menghasilkan jadwal proyek yang lebih efisien. Walaupun jadwal aktual proyek sudah mendekati kondisi optimal, pendekatan optimasi ini efektif sebagai alat evaluasi maupun penyempurnaan jadwal.

SARAN

Untuk penelitian selanjutnya, dapat dikembangkan model matematika dengan mempertimbangkan ketidakpastian atau melibatkan metode *fuzzy* dan menggunakan algoritma heuristic lain, misalnya *Ant Colony Optimization* atau *Pseudo-Genetic Algorithm*.

DAFTAR PUSTAKA

- Aprillia, S. C., W., A'yun, W., & Qonita, Q. (2023). Optimalisasi Biaya dan Waktu Pelaksanaan Pembangunan rumah tinggal di Kecamatan

- Rantau Pulung Kutai Timur menggunakan Critical Path Method (CPM) dan Program Evaluation and Review Technique (PERT). *Basis: Jurnal Ilmiah Matematika*, 2(1), 11–24.
- Aristyono, D., Hakim, A., Fathurohman, & Oganda, D. (2021). Optimasi Penjadwalan Proyek dengan Kombinasi Critical Path Method dan Algoritma Genetika. *Industrial Engineering Student Scientific Journal*, 2(2).
- Blazewicz, J., Lenstra, J., & Kan, A. R. (1983). Scheduling subject to resource constraints: Classification and complexity. *Discrete Applied Mathematics*, 5(1), 11–24.
- Hartmann, S., & Briskorn, D. (2010). A Survey of Variants and Extensions of the Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*, 207(1), 1–14.
- Hidayati, R., Guntoro, I., & Junianti, S. (2019). Penggunaan metode simulated annealing untuk penyelesaian travelling salesman problem. *Journal of Computer Engineering System and Science*, 4(2), 217–221.
- Huda, I. F. N., & Prasinta, W. R. (2024). Perencanaan Manajemen Proyek dengan Metode Critical Path Method (CPM) dalam Pelaksanaan Program PKL di SMK Cendekia Batujajar. *EKONOMIKA45: Jurnal Ilmiah Manajemen, Ekonomi Bisnis, Kewirausahaan*, 12(1), 539–550.
- Kirkpatrick, S., Gellat, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *American Association for the Advancement of Science*, 220(4598), 671–680.
- Maghfiroh, S. H., & Endrayanto, I. (2022). Penyelesaian Fuzzy Resource-Constrained Project Scheduling Problem sebagai Permasalahan Multi Knapsack. *Jurnal Matematika Thales*, 4(2), 1–17.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., & Teller, E. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *The Journal of Chemical Physics*, 21(6), 1087–1092.
- Nalhadi, A., & Suntana, N. (2017). Analisa Infrastruktur Desa Sukaci-Baros Dengan Metode Critical Path Method (CPM). *Jurnal Sistem Dan Manajemen Industri*, 1(1), 35–42.
- Silitonga, A., & Apdillah, D. (2017). Penjadwalan Perkuliahan Dengan Metode Vertex Graph Coloring Dan Simulated Annealing. *Journal of Industrial and Manufacture Engineering*, 1(2), 56–63.
- Soeharto, I. (1997). *Manajemen Proyek*. Erlangga.
- Wijanarko, A., Purwaningsih, R., & Silviana, S. (2024). Evaluasi manajemen waktu penyelesaian proyek pembangunan jalan terminal petikemas Tanjung Emas Semarang dengan CPM dan PERT. *Jurnal Profesi Insinyur Indonesia*, 2(1), 9–16.
- Wilar, W. P., Malingkas, G. Y., & Mangare, J. B. (2025). Penerapan Manajemen Waktu Dengan Metode Cpm (Critical Path Method) Pada Proyek Pembangunan Laboratorium SMKS Kema Perintis. *Tekno*, 23(91), 107–116.