

STRATEGI OPTIMALISASI WAKTU DAN BIAYA PROYEK KONSTRUKSI DENGAN *CRITICAL PATH METHOD* DAN *TIME-COST TRADE OFF***(Studi kasus: Pembangunan Ruang Kelas Baru Madrasah Ibtidaiyah Negeri 1 Ende)****Fadilah Assegaf ***

Program Studi Matematika, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang, Indonesia

e-mail: fadhilahassegaf97@gmail.com**Jusrry Rosalina Pahnael, Astri Atti, dan Rapmaida Megawaty Pangaribuan**

Dosen Program Studi Matematika, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana

e-mail: jusrry_pahnael@staf.undana.ac.id astri_atti@yahoo.com,dan pangaribuan_rapmaida@staf.undana.ac.id**Abstrak**

Pembangunan ruang kelas baru di MIN 1 Ende merupakan bagian dari upaya peningkatan kualitas sarana pendidikan, namun pelaksanaannya sering dihadapkan pada keterbatasan waktu dan biaya. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan durasi dan biaya proyek dengan menerapkan metode *Critical Path Method* (CPM) dan *Time-Cost Trade Off* (TCTO). Metode yang digunakan meliputi pengumpulan data lapangan, identifikasi aktivitas, penyusunan jaringan kerja, perhitungan maju dan mundur, analisis *float*, serta penentuan jalur kritis. Selanjutnya dilakukan simulasi percepatan dengan menghitung *cost slope* pada aktivitas kritis untuk memperoleh hubungan antara pengurangan durasi dan penambahan biaya. Hasil analisis CPM menunjukkan jalur kritis A1-B1-B2-B3-B4-C2-D1-D2-D3-D4-F1-F2-F3-I3-I4-I5 dengan durasi normal 357 hari dan biaya Rp2.564.447.521,51. Analisis TCTO menghasilkan tiga skenario percepatan, dan kondisi paling optimal adalah durasi 250 hari dengan tambahan biaya sebesar Rp96.000.000. Percepatan ini menghasilkan efisiensi waktu sebesar 29,97% dengan peningkatan biaya sekitar 3,7% dari total anggaran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan CPM dan TCTO efektif dalam menentukan strategi percepatan proyek secara optimal dan realistis.

Kata Kunci: CPM, TCTO, jalur kritis, optimasi waktu dan biaya, proyek konstruksi.

Abstract

The construction of new classrooms at MIN 1 Ende is part of an effort to improve the quality of educational facilities; however, its implementation is often constrained by limited time and budget. This study aims to optimize the project duration and cost by applying the *Critical Path Method* (CPM) and *Time-Cost Trade Off* (TCTO). The research method includes field data collection, activity identification, network diagram development, forward and backward pass calculations, float analysis, and critical path determination. Furthermore, a crashing simulation was carried out by calculating the *cost slope* of critical activities to evaluate the relationship between time reduction and additional cost. The CPM analysis identified the critical path as A1-B1-B2-B3-B4-C2-D1-D2-D3-D4-F1-F2-F3-I3-I4-I5 with a normal project duration of 357 days and a total cost of Rp2,564,447,521.51. The TCTO analysis produced several acceleration scenarios, with the most optimal result being a project duration of 250 days and an additional cost of Rp96,000,000. This acceleration achieved a time efficiency of 29.97% with a cost increase of approximately 3.7% of the total budget. The results indicate that the integration of CPM and TCTO is effective in determining an optimal and practical project acceleration strategy.

Keywords: CPM, TCTO, critical path, time-cost optimization, construction project.

PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur pendidikan memiliki peran penting dalam meningkatkan kualitas pembelajaran, salah satunya melalui pembangunan ruang kelas baru di Madrasah Ibtidaiyah Negeri 1 Ende. Menurut peneliti, ketersediaan ruang kelas yang layak dan memadai tidak hanya mendukung

kenyamanan siswa dan guru, tetapi juga berpengaruh langsung terhadap efektivitas proses belajar mengajar yang lebih optimal, kreatif, dan terarah. Meskipun proyek telah disusun sesuai perencanaan, peneliti menilai bahwa evaluasi terhadap efisiensi waktu dan biaya tetap diperlukan, mengingat proyek konstruksi pada umumnya dihadapkan pada keterbatasan sumber daya dan potensi keterlambatan pelaksanaan.

Sebagai upaya untuk meningkatkan efisiensi tersebut, penelitian ini menerapkan metode *Critical Path Method* (CPM) untuk mengidentifikasi jalur kritis yang menentukan durasi penyelesaian proyek, serta metode *Time-Cost Trade Off* (TCTO) untuk menganalisis hubungan antara percepatan waktu dan tambahan biaya yang ditimbulkan. Peneliti berpendapat bahwa kombinasi kedua metode ini mampu memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih tepat dalam menentukan strategi percepatan yang efektif dan efisien. Hal ini sejalan dengan penelitian Rahayu, Nurwan, dan Wungguli (2022) pada proyek pembangunan rumah sakit, yang menunjukkan bahwa penerapan CPM dan TCTO melalui pembagian kerja dua shift dan lembur berhasil mengurangi durasi proyek dari 210 hari menjadi 151 hari serta menghemat biaya sebesar Rp53.834.496,00. Dengan demikian, peneliti meyakini bahwa metode CPM dan TCTO sangat relevan untuk diterapkan pada proyek pembangunan ruang kelas baru di MIN 1 Ende dan berpotensi menghasilkan strategi optimalisasi yang dapat dijadikan acuan bagi proyek serupa di masa mendatang.

Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi waktu dan biaya dalam proyek pembangunan ruang kelas baru MIN 1 Ende, menerapkan metode *Critical Path Method* (CPM) dalam proyek tersebut, dengan fokus pada identifikasi jalur kritis dan analisis dampaknya terhadap pengelolaan waktu. Menjelaskan bagaimana penggunaan metode *Time-Cost Trade Off* (TCTO) dalam menemukan keseimbangan optimal antara waktu penyelesaian dan biaya yang dikeluarkan, dan menjelaskan strategi yang dapat diterapkan dalam proyek konstruksi untuk meminimalkan biaya tanpa mengorbankan waktu penyelesaian.

KAJIAN TEORI

PROYEK

Proyek adalah serangkaian tindakan jangka pendek dengan tujuan yang jelas, yang dilaksanakan dalam jangka waktu tertentu dengan memanfaatkan sumber daya yang tersedia secara optimal. Setiap proyek memiliki batasan penting, seperti waktu, biaya, dan kualitas, yang perlu diseimbangkan agar tujuan-tujuan ini dapat tercapai dengan sukses. Proyek konstruksi, menurut Burhanudin (2022),

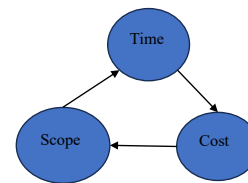
adalah upaya terorganisir dengan tujuan menciptakan infrastruktur nyata yang memiliki nilai guna.

MANAJEMEN PROYEK

Manajemen proyek konstruksi merupakan proses terstruktur yang mencakup pengorganisasian, perencanaan, pengarahan, dan pengendalian semua sumber daya proyek agar dapat memenuhi standar kualitas, menyelesaikan pekerjaan sesuai jadwal, dan tetap berada dalam batas anggaran. Mengingat proyek konstruksi bersifat rumit, unik, dan sangat tidak terduga, maka pendekatan yang sistematis. Sekaligus fleksibel sangat diperlukan di setiap tahap pelaksanaan untuk memastikan keberhasilan proyek secara keseluruhan.

Menurut Putri dan Sari (2021), manajemen proyek tidak hanya terbatas pada pelaksanaan teknis di lapangan, tetapi juga melibatkan integrasi manajemen waktu, biaya, dan mutu sebagai strategi utama dalam pencapaian target proyek.

SEGITIGA PROYEK



Gambar 1. Segitiga Proyek

Segitiga manajemen proyek merupakan kerangka konseptual yang menggambarkan tiga elemen utama yang saling berkaitan dalam pelaksanaan proyek, yaitu waktu, biaya, dan ruang lingkup (cakupan pekerjaan). Ketiga aspek ini harus dikelola secara seimbang karena perubahan pada salah satu elemen akan berdampak langsung pada elemen lainnya dan pada kualitas hasil proyek secara keseluruhan (PMI, 2021).

FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI WAKTU DAN BIAYA PROYEK

Keberhasilan proyek konstruksi dalam memenuhi target waktu dan biaya sangat dipengaruhi oleh banyak faktor, baik dari sisi internal maupun eksternal. Menurut Suharto (2021), kegagalan dalam mengendalikan waktu dan biaya proyek sering kali dipicu oleh lemahnya perencanaan, pelaksanaan yang tidak efektif, serta kurangnya koordinasi antar

pihak yang terlibat. Pemahaman terhadap faktor-faktor ini sangat penting agar upaya optimasi menggunakan metode seperti CPM dan TCTO dapat dijalankan secara maksimal.

CRITICAL PATH METHOD (CPM)

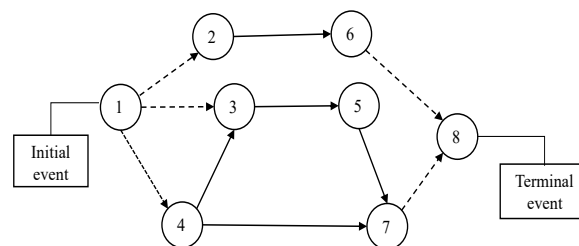
Critical Path Method (CPM) adalah metode yang digunakan dalam manajemen proyek untuk merencanakan, mengatur, dan mengelola waktu penyelesaian suatu proyek. CPM membantu untuk menentukan urutan kegiatan yang paling kritis, yang jika terlambat dapat menyebabkan keterlambatan proyek secara keseluruhan. Dengan kata lain, CPM digunakan untuk mengidentifikasi jalur kritis, yaitu serangkaian aktivitas yang tidak memiliki kelonggaran waktu (*slack*) dan harus diselesaikan tepat waktu agar proyek tidak mengalami keterlambatan (Suharto, 2021).

JARINGAN KERJA DALAM PENJADWALAN PROYEK

Jaringan kerja merupakan salah satu alat penting dalam manajemen proyek, khususnya pada tahap perencanaan dan penjadwalan proyek konstruksi. Melalui jaringan kerja, hubungan antar aktivitas dapat divisualisasikan secara logis dan sistematis, sehingga memudahkan penyusunan urutan kerja yang efisien dan memperkirakan waktu pelaksanaan proyek secara akurat. Penyusunan jaringan kerja mencakup dua tahapan utama, yaitu *forward pass* untuk menentukan waktu mulai dan selesai paling awal, serta *backward pass* untuk menghitung waktu mulai dan selesai paling lambat. Secara umum, jaringan kerja dapat disusun menggunakan dua pendekatan, yaitu *Activity on Arrow* (AOA) dan *Activity on Node* (AON). Metode AOA menggambarkan aktivitas sebagai panah yang menghubungkan dua peristiwa, sedangkan metode AON merepresentasikan aktivitas dalam bentuk kotak yang saling terhubung sesuai urutan pelaksanaannya.

Menurut Putri (2022), pemahaman terhadap simbol, alur kerja, dan aturan teknis dalam penyusunan jaringan sangat penting untuk menjamin ketepatan analisis. Jaringan kerja yang dirancang dengan benar akan menjadi dasar bagi perhitungan jadwal proyek, strategi percepatan, serta evaluasi kemajuan kegiatan di lapangan.

Gambaran umum bentuk jaringan dapat dilihat pada Gambar 2. berikut:



Gambar 2. Bentuk Umum Jaringan

JALUR KRITIS DAN FLOAT

Jalur kritis adalah rangkaian aktivitas dalam jaringan proyek yang memiliki durasi terpanjang dan secara langsung menentukan waktu penyelesaian total proyek. Dalam menentukan jalur kritis dilakukan perhitungan maju dan perhitungan mundur, dimana perhitungan maju atau *forward pass* adalah tahap awal dalam metode *Critical Path Method* (CPM) yang digunakan untuk menentukan waktu mulai paling awal *ES* dan waktu selesai paling awal *EL* dari setiap aktivitas proyek. Menurut Rahayu et al. (2022), perhitungan *forward pass* dimulai dengan memberikan nilai *ES* awal pada aktivitas yang tidak memiliki pendahulu, biasanya dimulai dari hari pertama proyek. Selanjutnya, nilai *EF* dihitung menggunakan rumus:

$$EF = ES + D \quad (1)$$

Keterangan:

EF (*Earliest Finish*): Waktu selesai paling awal

ES (*Earliest Start*): Waktu mulai paling awal

D (*Durasi*): Lama waktu pelaksanaan aktivitas

Sedangkan Perhitungan mundur atau *backward pass* merupakan langkah lanjutan dalam metode CPM yang digunakan untuk menentukan waktu mulai paling lambat (*Latest Start/LS*) dan waktu selesai paling lambat (*Latest Finish/LF*) dari setiap aktivitas dalam jaringan kerja proyek.

Proses *backward pass* dimulai dari aktivitas terakhir yang memiliki nilai *EF* tertinggi hasil perhitungan maju (*forward pass*). Nilai *EF* tertinggi ini dijadikan sebagai nilai *LF* untuk aktivitas terakhir. Setelah itu, nilai *LS* dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$LS = LF - D \quad (2)$$

Keterangan:

LF (*Latest Finish*): Waktu selesai paling lambat

LS (*Latest Start*): Waktu mulai paling lambat

D (*Durasi*): Lama pelaksanaan aktivitas

Setelah dilakukan perhitungan maju (*forward pass*) dan perhitungan mundur (*backward pass*), langkah selanjutnya dalam metode *Critical Path Method* (CPM) adalah menghitung slack dan menentukan jalur kritis. Untuk menghitung *float*, dapat digunakan dua rumus berikut ini:

$$\text{Float} = LS - ES \text{ atau } \text{Float} = LF - EF \quad (3)$$

Keterangan:

LS: Latest Start (waktu mulai paling lambat)

ES: Earliest Start (waktu mulai paling awal)

LF: Latest Finish (waktu selesai paling lambat)

EF: Earliest Finish (waktu selesai paling awal)

BIAYA DALAM PROYEK KONSTRUKSI

Biaya merupakan salah satu elemen paling krusial dalam manajemen proyek konstruksi. Selain waktu dan mutu, biaya menjadi bagian dari "segitiga manajemen proyek" yang harus dikendalikan secara seimbang agar proyek dapat berjalan sesuai rencana.

Menurut Rachmat et al. (2022), biaya proyek konstruksi dapat dikelompokkan menjadi dua kategori utama, yaitu biaya langsung dan biaya tidak langsung. Biaya langsung adalah jenis biaya yang secara langsung berkaitan dengan aktivitas fisik proyek di lapangan. Menurut Wahyuni et al. (2021), biaya langsung mencakup seluruh pengeluaran yang dibutuhkan untuk menyelesaikan pekerjaan secara langsung, seperti pembelian material, pembayaran upah tenaga kerja, dan penggunaan alat berat atau peralatan proyek. Berbeda dengan biaya langsung, biaya tidak langsung merupakan biaya yang tidak dapat secara langsung dikaitkan dengan aktivitas fisik tertentu di lapangan, namun tetap dibutuhkan dalam mendukung kelancaran pelaksanaan proyek secara keseluruhan. Menurut Rachmat et al. (2022), meskipun tidak terlihat secara langsung dalam satuan kerja konstruksi, biaya tidak langsung tetap harus diperhitungkan karena memberikan kontribusi signifikan terhadap keberhasilan pelaksanaan proyek.

METODE TIME-COST TRADE OFF (TCTO)

Metode *Time-Cost Trade Off* (TCTO) merupakan salah satu pendekatan dalam manajemen proyek yang bertujuan untuk menyeimbangkan antara waktu pelaksanaan dan biaya proyek. Menurut Rahayu et al. (2022), TCTO adalah metode yang memungkinkan percepatan aktivitas proyek (*crashing*) dengan penambahan biaya langsung tertentu, tanpa

mengubah lingkup kerja yang telah direncanakan. Dalam metode *Time-Cost Trade Off* (TCTO), proses percepatan aktivitas proyek disebut sebagai *crashing*, yaitu tindakan memperpendek durasi aktivitas dengan penambahan biaya langsung tertentu. *Crashing* hanya dilakukan pada aktivitas yang berada di jalur kritis dan dinilai paling efisien untuk dipercepat. Untuk mengetahui seberapa efisien suatu aktivitas dipercepat, digunakan rumus *crash cost* per hari atau sering disebut dengan *slope*. Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui tambahan biaya yang diperlukan untuk mempercepat aktivitas sebanyak satu hari.

Rumus dasar *crash cost* per hari adalah sebagai berikut:

$$\text{Cost Slope} = \frac{C_c - C_n}{D_n - D_c} \quad (4)$$

Keterangan:

C_c : Biaya *crash* (biaya setelah percepatan)

C_n : Biaya normal

D_c : Durasi *crash*

D_n : Durasi Normal

Menurut Kerzner (2017), perhitungan *crash cost* sangat penting dalam menentukan strategi percepatan yang tepat, agar proyek dapat diselesaikan lebih cepat tanpa membebani anggaran secara berlebihan.

METODE

JENIS DAN SUMBER DATA

Dalam penelitian ini, data yang digunakan terdiri atas:

1. Data Primer, berupa dokumen pelaksanaan proyek, seperti:
 - Rencana Anggaran Biaya (RAB)
 - *Time schedule* proyek
 - Laporan pelaksanaan lapangan dari kontraktor.
2. Data Sekunder, berupa literatur ilmiah seperti jurnal, buku teks, artikel, dan dokumen lain yang relevan sebagai landasan teori, khususnya yang membahas CPM dan TCTO.

ANALISIS DATA

Teknik analisis data dalam penelitian ini dilakukan secara sistematis dengan langkah-langkah berikut:

1. Mengidentifikasi kegiatan proyek berdasarkan time schedule dan menyusun urutan serta durasi setiap aktivitas.
2. Membuat diagram jaringan kerja menggunakan metode *Activity on Node* (AON).
3. Melakukan analisis *Critical Path Method* (CPM):
 - a. Menghitung *Earliest Start* (ES), *Earliest Finish* (EF), *Latest Start* (LS), dan *Latest Finish* (LF).
 - b. Menghitung total *float* untuk setiap aktivitas.
 - c. Menentukan jalur kritis proyek.
4. Menerapkan metode *Time-Cost Trade Off* (TCTO) yaitu dengan mengumpulkan data durasi normal, durasi *crash*, biaya normal, dan biaya *crash*.
 - a. Menghitung *slope* untuk tiap aktivitas pada jalur kritis.
 - b. Melakukan *crashing* terhadap aktivitas kritis dengan *float* terkecil terlebih dahulu.
 - c. Menyusun alternatif jadwal dengan berbagai skenario waktu dan biaya.
5. Melakukan evaluasi terhadap hasil *crashing* untuk mengetahui kombinasi waktu dan biaya paling optimal.
6. Menarik kesimpulan dari hasil analisis yang telah dilakukan serta menyusun rekomendasi strategis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

DESKRIPSI OBJEK PENELITIAN

Proyek yang menjadi objek penelitian ini adalah Pembangunan Ruang Kelas Baru MIN 1 Ende, yang berlokasi di Kecamatan Ende Tengah, Kabupaten Ende. Proyek ini dilaksanakan pada Tahun Anggaran 2024 dengan nilai kontrak sebesar Rp2.564.447.521,51. Jenis pekerjaan dalam proyek ini meliputi pekerjaan persiapan, pekerjaan struktur (pondasi, sloof, kolom, balok, plat lantai), pekerjaan arsitektur (dinding, lantai, plafond, kusen, pintu, jendela, atap, *façade*), serta pekerjaan mekanikal-elektrikal dan sanitasi.

FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI WAKTU DAN BIAYA PROYEK

Berdasarkan hasil analisis dokumen proyek (RAB, Time Schedule, dan laporan program bulanan) serta hasil wawancara dengan pihak kontraktor dan konsultan pengawas, terdapat beberapa faktor utama yang mempengaruhi waktu dan biaya dalam Pembangunan Ruang Kelas Baru MIN 1 Ende yaitu:

1. Tenaga Kerja
2. Material Konstruksi
3. Peralatan

4. Manajemen Proyek
5. Cuaca dan kondisi Lingkungan
6. Biaya Tambahan/ Perubahan Pekerjaan

ANALISIS DENGAN CRITICAL PATH METHOD

Dalam analisis CPM, hubungan antar pekerjaan diperlukan untuk mengetahui hubungan antar aktivitas sebelumnya dengan aktivitas berikutnya. Pada tahap ini disusun daftar aktivitas utama proyek yang akan menjadi input analisis CPM. Setiap aktivitas diberi kode, uraian singkat, durasi dalam hari kelender, serta daftar *predecessor* (kegiatan yang harus diselesaikan terlebih dahulu).

Berikut ini daftar hubungan antar pekerjaan dan durasinya:

Tabel 1. Hubungan antar pekerjaan

No	Kode	Nama Pekerjaan	<i>Predecessor</i>	Durasi (Hari)
1	A1	Pekerjaan Persiapan	-	7
2	B1	Pekerjaan Tanah	A1	14
3	B2	Pekerjaan Pondasi	B1	28
4	B3	Pekerjaan Kolom Pedestal	B2	28
5	B4	Pekerjaan <i>Sloof Elev.</i> [0,05]	B3	21
6	C1	Pekerjaan Tangga Lantai 1 ke Lantai 2	B4	14
7	C2	Pekerjaan Kolom Lantai 1	B4	28
8	D1	Balok Elev. [+3,70]	C2	35
9	D2	Plat Lantai 2	D1	21
10	D3	Kolom Lantai 2	D2	21
11	D4	Ring Balok Elev. [+7,50]	D3	14
12	E1	Arsitektur Lt 1 - Dinding, Beton Non Struktur, Plasteran dan Acian	C2, D1	28
13	E2	Arsitektur Lt 1 - Lantai dan Pelapis Dinding	E1	28
14	E3	Arsitektur Lt 1 - Plafond	E2	14
15	E4	Arsitektur Lt 1 - Kusen, Pintu, Jendela dan Boven	E2	21
16	E5	Arsitektur Lt 1 - Besi	E2	14
17	F1	Arsitektur Lt 2 - Dinding, Beton Non Struktur, Plasteran dan Acian	D4	42
18	F2	Arsitektur Lt 2 - Lantai dan Pelapis Dinding	F1	28
19	F3	Arsitektur Lt 2 - Plafond	F2	21
20	F4	Arsitektur Lt 2 - Kusen, Pintu, Jendela dan Boven	F2	21
21	F5	Arsitektur Lt 2 - Besi	D3, F2	14
22	G	Pekerjaan Atap	D4, F4	28
23	H	Pekerjaan <i>Facadace</i>	E1, F1, E5	35
24	I1	Elektrikal - Panel Distribusi dan Perkabelan	E2	28
25	I2	Elektrikal - <i>Raunding Installation Electric System</i>	I1	14
26	I3	Elektrikal - Instalasi Penerangan	I2, E3, F3	35
27	I4	Elektrikal - Penangkal Petir	I3	14
28	I5	Elektrikal - <i>Testing dan Commissioning Electrical Instalition</i>	I3, I2, J1, J2	14
29	J1	Sanitasi - Instalasi Air Kotor	E2	14
30	J2	Sanitasi - Instalasi Air Bersih	E2	14

PERHITUNGAN MAJU (FORWARD PASS)

Perhitungan maju (*forward pass*) merupakan tahap awal dalam metode CPM yang bertujuan untuk menentukan waktu mulai paling awal (*Earliest Start/ES*) dan waktu selesai paling awal (*Earliest Finish/EF*) dari setiap aktivitas proyek.

Tabel 2. Perhitungan Maju

No	Nama Pekerjaan	Kode	Durasi (Hari)	ES (Hari)	EF (Hari)
1	Pekerjaan Persiapan	A1	7	0	7
2	Pekerjaan Tanah	B1	14	7	21
3	Pekerjaan Pondasi	B2	28	21	49
4	Pekerjaan Kolom Pedestal	B3	28	49	77
5	Pekerjaan Sloof Elev. [0,05]	B4	21	77	98
6	Pekerjaan Tangga Lantai 1 ke Lantai 2	C1	14	98	112
7	Pekerjaan Kolom Lantai 1	C2	28	98	126
8	Balok Elev. [+3,70]	D1	35	126	161
9	Plat Lantai 2	D2	21	161	182
10	Kolom Lantai 2	D3	21	182	203
11	Ring Balok Elev. [+7,50]	D4	14	203	217
12	Arsitektur Lt 1 - Dinding, Beton Non Struktur, Plasteran dan Acian	E1	28	161	189
13	Arsitektur Lt 1 - Lantai dan Pelapis Dinding	E2	28	189	217
14	Arsitektur Lt 1 - Plafond	E3	14	217	231
15	Arsitektur Lt 1 - Kusen, Pintu, Jendela dan Boven	E4	21	217	238
16	Arsitektur Lt 1 - Besi	E5	14	217	231
17	Arsitektur Lt 2 - Dinding, Beton Non Struktur, Plasteran dan Acian	F1	42	217	259
18	Arsitektur Lt 2 - Lantai dan Pelapis Dinding	F2	28	259	287
19	Arsitektur Lt 2 - Plafond	F3	21	287	308
20	Arsitektur Lt 2 - Kusen, Pintu, Jendela dan Boven	F4	21	287	308
21	Arsitektur Lt 2 - Besi	F5	14	287	301
22	Pekerjaan Atap	G	28	308	336
23	Pekerjaan Facadace	H	35	259	294
24	Elektrikal - Panel Distribusi dan Per Kabelan	I1	28	217	245
25	Elektrikal - Raunding Installation Electric System	I2	14	245	259
26	Elektrikal - Instalasi Penerangan	I3	35	308	243
27	Elektrikal - Penangkal Petir	I4	14	343	357
28	Elektrikal - Testing dan Commissioning Electrical Instalition	I5	14	343	357
29	Sanitasi - Instalasi Air Kotor	J1	14	217	231
30	Sanitasi - Instalasi Air Bersih	J2	14	217	231

PERHITUNGAN MUNDUR

Perhitungan mundur (*backward pass*) merupakan tahap lanjutan dalam metode (CPM) yang digunakan untuk menentukan waktu mulai paling lambat (*Latest Start/LS*) dan waktu selesai paling lam bat (*Latest Finish/LF*) dari setiap aktivitas proyek.

Tabel 3. Perhitungan Mundur

No	Nama Pekerjaan	Kode	Durasi (Hari)	LS (Hari)	LF (Hari)
1	Pekerjaan Persiapan	A1	7	0	7
2	Pekerjaan Tanah	B1	14	7	21
3	Pekerjaan Pondasi	B2	28	21	49
4	Pekerjaan Kolom Pedestal	B3	28	49	77
5	Pekerjaan Sloof Elev. [0,05]	B4	21	77	98
6	Pekerjaan Tangga Lantai 1 ke Lantai 2	C1	14	343	357
7	Pekerjaan Kolom Lantai 1	C2	28	98	126
8	Balok Elev. [+3,70]	D1	35	126	161
9	Plat Lantai 2	D2	21	161	182
10	Kolom Lantai 2	D3	21	182	203
11	Ring Balok Elev. [+7,50]	D4	14	203	217
12	Arsitektur Lt 1 - Dinding, Beton Non Struktur, Plasteran dan Acian	E1	28	210	238
13	Arsitektur Lt 1 - Lantai dan Pelapis Dinding	E2	28	238	266
14	Arsitektur Lt 1 - Plafond	E3	14	294	308
15	Arsitektur Lt 1 - Kusen, Pintu, Jendela dan Boven	E4	21	336	357
16	Arsitektur Lt 1 - Besi	E5	14	308	322
17	Arsitektur Lt 2 - Dinding, Beton Non Struktur, Plasteran dan Acian	F1	42	217	259
18	Arsitektur Lt 2 - Lantai dan Pelapis Dinding	F2	28	259	287
19	Arsitektur Lt 2 - Plafond	F3	21	287	308
20	Arsitektur Lt 2 - Kusen, Pintu, Jendela dan Boven	F4	21	308	329
21	Arsitektur Lt 2 - Besi	F5	14	343	357
22	Pekerjaan Atap	G	28	329	357
23	Pekerjaan Facadace	H	35	322	357
24	Elektrikal - Panel Distribusi dan Per Kabelan	I1	28	266	294
25	Elektrikal - Raunding Installation Electric System	I2	14	294	308
26	Elektrikal - Instalasi Penerangan	I3	35	308	343
27	Elektrikal - Penangkal Petir	I4	14	343	357
28	Elektrikal - Testing dan Commissioning Electrical Instalition	I5	14	343	357
29	Sanitasi - Instalasi Air Kotor	J1	14	329	343
30	Sanitasi - Instalasi Air Bersih	J2	14	329	343

MENGHITUNG TOTAL FLOAT DAN PENENTUAN JALUR Kritis PADA PROYEK

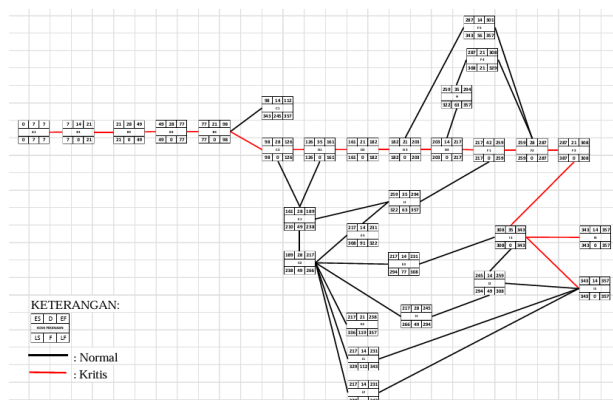
Setelah dilakukan perhitungan maju (*forward pass*) dan mundur (*backward pass*), langkah selanjutnya dalam metode (CPM) adalah menghitung total *float* atau *slack*. Total *float* merupakan waktu yang diperbolehkan bagi suatu aktivitas untuk ditunda tanpa memengaruhi penyelesaian proyek secara keseluruhan.

Tabel 4. Total Float

No	Kode	Durasi (Hari)	ES (Hari)	EF (Hari)	LS (Hari)	LF (Hari)	Float	Ket
1	A1	7	0	7	0	7	0	Kritis
2	B1	14	7	21	7	21	0	Kritis
3	B2	28	21	49	21	49	0	Kritis
4	B3	28	49	77	49	77	0	Kritis
5	B4	21	77	98	77	98	0	Kritis
6	C1	14	98	112	343	357	245	Non Kritis
7	C2	28	98	126	98	126	0	Kritis
8	D1	35	126	161	126	161	0	Kritis
9	D2	21	161	182	161	182	0	Kritis
10	D3	21	182	203	182	203	0	Kritis
11	D4	14	203	217	203	217	0	Kritis
12	E1	28	161	189	210	238	49	Non Kritis
13	E2	28	189	217	238	266	49	Non Kritis
14	E3	14	217	231	294	308	77	Non Kritis
15	E4	21	217	238	336	357	119	Non Kritis
16	E5	14	217	231	308	322	91	Non Kritis
17	F1	42	217	259	217	259	0	Kritis
18	F2	28	259	287	259	287	0	Kritis
19	F3	21	287	308	287	308	0	Kritis
20	F4	21	287	308	308	329	21	Non Kritis
21	F5	14	287	301	343	357	56	Non Kritis
22	G	28	308	336	329	357	21	Non Kritis
23	H	35	259	294	322	357	63	Non Kritis
24	I1	28	217	245	266	294	49	Non Kritis
25	I2	14	245	259	294	308	49	Non Kritis
26	I3	35	308	243	308	343	0	Kritis
27	I4	14	343	357	343	357	0	Kritis
28	I5	14	343	357	343	357	0	Kritis
29	J1	14	217	231	329	343	112	Non Kritis
30	J2	14	217	231	329	343	112	Non Kritis

Setelah menghitung total *float* semua pekerjaan dalam proyek, dapat diidentifikasi pekerjaan di jalur kritis dengan melihat pekerjaan dengan nilai *float* 0. Dengan menggunakan *Metode Activity on Node (AON)* untuk menyusun jaringan kerja proyek dan menganalisis ketergantungan antar aktivitas. Hasil analisis Critical Path Method (CPM) menunjukkan jalur kritis A1 - B1 - B2 - B3 - B4 - C2 - D1 - D2 - D3 - D4 - F1- F2 - F3 - I3 - I4 - I5 dengan durasi total 357 hari. Aktivitas pada jalur kritis memiliki *float* = 0, sehingga keterlambatan pada salah satu aktivitas akan memengaruhi keseluruhan proyek.

Berikut ini jaringan kerja pada jalur kritis dari pekerjaan proyek pembangunan ruang kelas baru MIN 1 Ende:



Gambar 3. Jaringan Pada Jalur Kritis

ANALISI TIME COST-TRADE OFF

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode CPM pada subbab sebelumnya, diperoleh lintasan kritis proyek pembangunan ruang kelas baru MIN 1 Ende, yaitu: A1 - B1 - B2 - B3 - B4 - C2 - D1 - D2 - D3 - D4 - F1- F2 - F3 - I3 - I4 - I5. Lintasan tersebut memiliki *total float* bernilai nol dengan durasi total proyek selama 357 hari, yang ditetapkan sebagai durasi normal.

Metode *Time-Cost Trade Off (TCTO)* diterapkan untuk mencari kombinasi optimal antara waktu dan biaya proyek. Percepatan waktu pelaksanaan biasanya meningkatkan biaya langsung, namun dapat menurunkan biaya tidak langsung karena durasi proyek menjadi lebih singkat. Oleh karena itu, analisis TCTO dilakukan untuk menyeimbangkan kedua aspek tersebut dan menentukan waktu serta biaya proyek yang paling efisien.

Langkah-langkah analisis dilakukan secara bertahap mulai dari penentuan durasi dan biaya normal, perhitungan durasi serta biaya crash, hingga penentuan *cost slope* dan simulasi *crashing* pada aktivitas yang termasuk dalam jalur kritis hasil analisis CPM. Langkah awal dalam analisis *Time-Cost Trade Off (TCTO)* adalah mengidentifikasi seluruh aktivitas proyek berdasarkan urutan pelaksanaan pekerjaan serta hubungan ketergantungannya. Data aktivitas diperoleh dari dokumen Rencana Anggaran Biaya (RAB) dan Schedule Realisasi Proyek pembangunan ruang kelas baru MIN 1 Ende. Berdasarkan analisis teknis dari data Rencana Anggaran Biaya (RAB), laporan realisasi proyek, serta hasil wawancara dengan pihak pelaksana di lapangan. Penyesuaian dilakukan dengan menghitung kapasitas sumber daya, tingkat

produktivitas tenaga kerja, serta batas aman percepatan untuk setiap pekerjaan konstruksi.

Dengan menerapkan strategi tersebut, setiap pekerjaan di jalur kritis memiliki dua kondisi: durasi normal (D_n) dan durasi *crash* (D_c), beserta biaya normal (C_n) dan biaya *crash* (C_c). Nilai selisih durasi (Δt) dan selisih biaya (Δc) dihitung untuk menentukan *cost slope* menggunakan rumus berikut:

$$\text{Cost Slope} = \frac{C_c - C_n}{D_n - D_c}$$

Nilai *cost slope* menunjukkan tambahan biaya per satu hari percepatan pekerjaan, yang kemudian digunakan sebagai dasar pemilihan aktivitas yang diutamakan untuk dilakukan *crashing*.

PERHITUNGAN COST SLOPE DAN SIMULASI CRASHING

Setelah dilakukan penentuan durasi *crash* (D_c) dan biaya *crash* (C_c) untuk setiap aktivitas pada jalur kritis melalui penerapan strategi percepatan seperti lembur, penambahan tenaga kerja, penggunaan metode cepat, serta pekerjaan tumpang tindih (*overlapping*), langkah berikutnya adalah menyusun tabel perbandingan antara kondisi normal dan kondisi *crash*.

Berikut ini adalah tabel perbandingan durasi dan biaya normal-crash:

Tabel 5. Durasi dan Biaya Normal-Crash

Kode	D_n	D_c	C_n (Rp)	C_c (Rp)	Cost Slope
A1	7	4	17.961.351,66	18.392.424,10	143.690,81
B1	14	8	5.710.410,66	5.881.722,98	28.552,05
B2	28	19	148.516.754,45	168.566.516,30	2.227.751,32
B3	28	19	32.180.442,02	35.076.681,80	321.804,42
B4	21	14	82.631.169,16	89.572.187,37	991.574,03
C2	28	22	136.121.810,28	148.372.773,21	2.041.827,15
D1	35	24	165.901.922,01	193.275.739,14	2.488.528,83
D2	21	14	204.220.472,83	225.663.622,48	3.063.307,09
D3	21	14	89.471.306,41	96.986.896,15	1.073.655,68
D4	14	9	31.094.835,42	32.649.577,19	310.948,35
F1	42	34	235.286.677,76	263.521.079,09	3.529.300,17
F2	28	19	155.242.434,23	176.200.162,85	2.328.636,51
F3	21	14	77.764.372,34	84.296.579,62	933.172,47
I3	35	28	47.865.368,86	51.215.944,68	478.653,69
I4	14	11	11.100.000,00	11.366.400,00	88.800,00
I5	14	11	717.974,38	728.744,00	3.589,87

SIMULASI PERCEPATAN DAN TITIK OPTIMUM

Tahapan ini bertujuan untuk menentukan kombinasi waktu dan biaya proyek yang paling efisien melalui proses *crashing* terhadap aktivitas-aktivitas di jalur kritis yang telah diperoleh dari analisis *Critical Path Method* (CPM). Proses *crashing* dilakukan dengan mempercepat durasi aktivitas tertentu yang berada pada lintasan kritis, namun tetap mempertahankan mutu dan batas teknis pekerjaan.

Dalam penelitian ini, total durasi proyek pembangunan ruang kelas baru MIN 1 Ende adalah **357 hari** dengan lintasan kritis sebagai berikut:

A1 - B1 - B2 - B3 - B4 - C2 - D1 - D2 - D3 - D4 - F1- F2 - F3 - I3 - I4 - I5.

Percepatan proyek dilakukan sebesar **107 hari** dari durasi normal, dengan tiga alternatif skenario pembiayaan untuk melihat perbandingan tingkat efisien sehingga memperoleh strategi yang optimal. Oleh karena itu dibuat tiga alternatif skenario sebagai berikut:

1. Skenario A (Optimis): total tambahan biaya Rp48.000.000,00
2. Skenario B (Realistis): total tambahan biaya Rp96.000.000,00
3. Skenario C (Konservatif): total tambahan biaya Rp104.000.000,00

untuk menentukan *cost slope* menggunakan rumus berikut:

$$Cost\ Slope = \frac{C_c - C_n}{D_n - D_c}$$

Keterangan:

C_c : Biaya *crash* (biaya setelah percepatan)

C_n : Biaya normal

D_c : Durasi *crash*

D_n : Durasi Normal

Sedangkan untuk menghitung biaya tambahan per aktivitas adalah:

$$Tambahan = \frac{Biaya\ per\ hari}{\Delta t}$$

Biaya tambahan untuk setiap aktivitas diperoleh dengan mengalikan selisih durasi percepatan ($\Delta t = D_n - D_c$) dengan rata-rata biaya percepatan per hari dari tiap skenario. Nilai total *cost slope* menunjukkan tambahan biaya per hari percepatan yang menjadi dasar pemilihan aktivitas yang akan dilakukan *crashing*.

1. Skenario A (Kondisi Optimis)

Skenario A menggambarkan kondisi paling efisien dengan biaya percepatan minimal, yaitu **Rp48.000.000** untuk total percepatan **107 hari**, atau setara dengan **Rp448.598,13 per hari**.

Tabel 6. Skenario A

Kode	D_n	D_c	Δt	C_n	Tambahan	C_c
A1	7	4	3	17.961.351,66	1.345.794,39	19.307.146,05
B1	14	8	6	5.710.410,66	2.691.588,78	8.401.999,44
B2	28	19	9	148.516.754,45	4.037.383,17	152.554.137,62
B3	28	19	9	32.180.442	4.037.383,17	36.217.825,17
B4	21	14	7	82.631.169,16	3.140.186,91	85.771.356,07
C2	28	22	6	136.121.810,28	2.691.588,78	138.813.399,06
D1	35	24	11	165.901.922,01	4.934.579,43	170.836.501,44
D2	21	14	7	204.220.472,83	3.140.186,91	207.360.659,74
D3	21	14	7	89.471.306,41	3.140.186,91	92.611.493,32
D4	14	9	5	31.094.835,42	2.242.990,65	33.337.826,07
F1	42	34	8	235.286.677,76	3.588.785,04	238.875.462,80
F2	28	19	9	155.242.434,23	4.037.383,17	159.279.817,40
F3	21	14	7	77.764.372,34	3.140.186,91	80.904.559,25
I3	35	28	7	47.865.368,86	3.140.186,91	51.005.555,77
I4	14	11	3	11.100.000,00	1.345.794,39	12.445.794,39
I5	14	11	3	717.974,38	1.345.794,39	2.063.768,77

2. Skenario B (Kondisi Realistis)

Skenario B dianggap paling mendekati kondisi aktual proyek di lapangan dengan biaya tambahan Rp96.000.000 atau Rp897.196,26 per hari.

Tabel 7. Skenario B

Kode	D_n	D_c	Δt	C_n	Tambahan	C_c
A1	7	4	3	17.961.351,66	2.691.588,78	20.652.940,4
B1	14	8	6	5.710.410,66	5.383.177,56	11.093.588,22
B2	28	19	9	148.516.754,45	8.074.766,34	156.591.520,79
B3	28	19	9	32.180.442	8.074.766,34	40.255.208,34
B4	21	14	7	82.631.169,16	6.280.373,82	88.911.542,98
C2	28	22	6	136.121.810,28	5.383.177,56	141.504.987,84
D1	35	24	11	165.901.922,01	9.869.158,86	175.771.080,87
D2	21	14	7	204.220.472,83	6.280.373,82	210.500.846,65
D3	21	14	7	89.471.306,41	6.280.373,82	95.751.680,23
D4	14	9	5	31.094.835,42	4.485.981,30	35.580.816,72
F1	42	34	8	235.286.677,76	7.177.570,08	242.464.247,84
F2	28	19	9	155.242.434,23	8.074.766,34	163.317.200,57
F3	21	14	7	77.764.372,34	6.280.373,82	84.044.746,16
I3	35	28	7	47.865.368,86	6.280.373,82	54.145.742,68
I4	14	11	3	11.100.000,00	2.691.588,78	13.791.588,78
I5	14	11	3	717.974,38	2.691.588,78	3.409.563,16

3. Skenario C (Kondisi Konservatif)

Skenario C merupakan pendekatan konservatif dengan biaya tambahan tertinggi sebesar Rp104.000.000 atau Rp972.972,97 per hari.

Tabel 8. Skenario C

Kode	D_n	D_c	Δt	C_n	Tambahan	C_c
A1	7	4	3	17.961.351,66	2.918.918,91	20.880.270,57
B1	14	8	6	5.710.410,66	5.837.837,82	11.548.248,48
B2	28	19	9	148.516.754,45	8.756.756,73	157.273.511,18
B3	28	19	9	32.180.442	8.756.756,73	40.937.198,73
B4	21	14	7	82.631.169,16	6.810.810,79	89.441.979,95
C2	28	22	6	136.121.810,28	5.837.837,82	141.959.648,10
D1	35	24	11	165.901.922,01	10.702.702,67	176.604.624,68
D2	21	14	7	204.220.472,83	6.810.810,79	211.031.283,62
D3	21	14	7	89.471.306,41	6.810.810,79	96.282.117,20
D4	14	9	5	31.094.835,42	4.864.864,85	35.959.700,27
F1	42	34	8	235.286.677,76	7.783.783,76	243.070.461,52
F2	28	19	9	155.242.434,23	8.756.756,73	163.999.190,96
F3	21	14	7	77.764.372,34	6.810.810,79	84.575.183,13
I3	35	28	7	47.865.368,86	6.810.810,79	54.676.179,65
I4	14	11	3	11.100.000,00	2.918.918,91	14.018.918,91
I5	14	11	3	717.974,38	2.918.918,91	3.636.893,29

Berdasarkan hasil simulasi ketiga skenario percepatan, dapat disimpulkan bahwa Skenario B (Realistis) merupakan kondisi yang paling efisien dan sesuai dengan situasi aktual di lapangan. Skenario ini menghasilkan keseimbangan optimal antara pengurangan durasi proyek dan tambahan biaya yang masih dalam batas wajar. Dengan tambahan biaya sebesar Rp96.000.000, durasi proyek dapat dipersingkat dari 357 hari menjadi 250 hari, tanpa mengurangi kualitas pekerjaan maupun melampaui batas teknis pelaksanaan.

PENUTUP

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka kesimpulan penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Faktor-Faktor yang mempengaruhi waktu dan biaya proyek antara lain ketersediaan material, produktivitas tenaga kerja, kondisi cuaca, metode pelaksanaan pekerjaan, cuaca dan kondisi lingkungan serta manajemen pengawasan di lapangan.
2. Penerapan Metode *Critical Path Method* (CPM)
Melalui penerepan metode CPM, diperoleh jalur kritis proyek sebagai berikut: A1 – B1 – B2 – B3 – B4 – C2 – D1 – D2 – D3 – D4 – F1 – F2 – F3 – I3 – I4 – I5. Jalur ini memiliki nilai *float* nol dan menentukan durasi total proyek selama 357 hari.

4. Penerapan Metode *Time-Cost Trade Off* (TCTO)
Berdasarkan hasil analisis (TCTO), menunjukkan bahwa percepatan proyek sebesar 107 hari dapat dilakukan dengan menambah biaya tertentu pada aktivitas yang berada di jalur kritis. Tiga skenario percepatan yang disimulasikan menunjukkan perbedaan efisiensi biaya sebagai berikut:

- Skenario A (Optimis): tambahan biaya Rp48.000.000, *cost slope* Rp448.598,13/hari;
- Skenario B (Realistis): tambahan biaya Rp96.000.000, *cost slope* Rp897.196,26/hari;
- Skenario C (Konservatif): tambahan biaya Rp104.000.000, *cost slope* Rp972.972,97/hari.

5. Strategi Optimalisasi Waktu dan Biaya Proyek

Berdasarkan hasil perbandingan ketiga skenario percepatan, Skenario B (Realistis) memberikan kombinasi yang paling optimal antara percepatan waktu dan efisiensi biaya. Skenario ini menghasilkan durasi proyek menjadi 250 hari dengan tambahan biaya sebesar Rp96.000.000, sehingga total biaya proyek setelah optimasi menjadi Rp2.660.447.521,51 dari total biaya normal sebesar Rp2.564.447.521,51. Nilai *cost slope* sebesar Rp897.196,26/hari menunjukkan efisiensi biaya percepatan yang rasional dengan tingkat risiko pelaksanaan yang relatif rendah.

Dengan demikian, Skenario B dapat dikategorikan sebagai kondisi optimal yang mampu menyeimbangkan antara waktu penyelesaian proyek dan pembiayaan pelaksanaannya.

SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, penulis memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai penerapan metode CPM dan TCTO pada proyek konstruksi. Bagi peneliti selanjutnya, disarankan untuk menambahkan variabel lain seperti risiko cuaca, perubahan harga material, dan tingkat produktivitas tenaga kerja agar hasil analisis menjadi lebih komprehensif dan mendekati kondisi nyata di lapangan. Dengan demikian, penelitian lanjutan diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih akurat terhadap dinamika pelaksanaan proyek.

Bagi kalangan akademisi, penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi tambahan dalam pembelajaran manajemen proyek konstruksi, khususnya pada materi penjadwalan dan optimalisasi waktu serta biaya. Pengembangan penelitian serupa juga dapat dilakukan dengan bantuan perangkat lunak seperti Primavera, Microsoft Project, atau MATLAB agar analisis menjadi lebih sistematis dan aplikatif. Sementara itu, bagi praktisi dan pelaksana proyek, penerapan metode CPM dan TCTO dapat membantu dalam menentukan aktivitas prioritas serta strategi percepatan yang efektif. Berdasarkan hasil penelitian ini, Skenario B dapat dijadikan acuan yang realistis untuk mempercepat penyelesaian proyek tanpa meningkatkan biaya secara signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Burhanudin, A. (2022). Pengelolaan proyek konstruksi: Dari perencanaan hingga pelaksanaan. *Jurnal Konstruksi dan Manajemen*, 8(2), 50-58. <https://doi.org/10.5678/jkm.2022>.
- Rahayu, N., Nurwan, A., & Wungguli, A. (2022). Penerapan metode perhitungan maju pada penjadwalan proyek pembangunan RS Bhayangkara. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 10(2), 87-95. <https://doi.org/10.1234/jtsp.v10i2.45678>.
- Project Management Institute. (2021). A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide) - Seventh edition. Project Management Institute.
- Suharto, R. (2021). Faktor-faktor penyebab penyimpangan waktu dan biaya dalam proyek konstruksi. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 7(3), 101-109.
- Suharto, E. (2021). *Manajemen proyek konstruksi* (4th ed.). Jakarta: Erlangga.
- Putri, A. R., & Sari, D. L. (2021). Strategi manajemen risiko dalam proyek konstruksi untuk menjaga keseimbangan waktu, biaya, dan mutu. *Jurnal Teknik Sipil*, 10(3), 210-220.
- Rachmat, H., Putri, S. N., & Nugroho, A. D. (2022). Klasifikasi biaya dalam manajemen proyek konstruksi. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan Infrastruktur*, 8(1), 55-62.
- Wahyuni, S., Santosa, B., & Lestari, R. (2021). *Manajemen biaya proyek konstruksi: Konsep, strategi, dan aplikasi*. Surabaya: Penerbit Rekayasa Sipil.
- Kerzner, H. (2017). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling* (12th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Putri, A. R. (2022). Analisis faktor penyebab keterlambatan dan optimalisasi waktu proyek pada pembangunan perumahan (Skripsi sarjana). Universitas Indonesia, Depok.
- Rahayu, N., Nugroho, R., & Suryani, T. (2022). Analisis metode CPM dan forward pass dalam optimalisasi waktu pelaksanaan proyek konstruksi. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Arsitektur*, 9(1), 55-62. <https://doi.org/10.1234/jrsa.v9i1.23456>.