

Analisis Risiko Keterlambatan Pada Proyek Pembangunan Gedung Rusun 3 Lantai Kogabwilhan II

*Valentino Gracia Lumban Tobing, Almuntofa Purwantoro
Jurusan/Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Palangka Raya
*)valentinotobing50@gmail.com

Received: 04 April 2026, Revised: 20 April 2026, Accepted: 06 Mei 2026

Abstract

Construction project delays still frequently occur and lead to increased costs, schedule disruptions, and reduced work quality. Previous studies have generally been descriptive and have not quantitatively and comprehensively modeled duration uncertainty. This study aims to analyze delay risk by evaluating the probability of project completion and identifying the activities that most significantly influence delays. The case study was conducted on the construction project of the TNI Kogabwilhan II Flats in Balikpapan. The methods used include the Critical Path Method (CPM) to determine the critical path, Earned Value Management (EVM) to estimate the remaining duration based on actual progress, and Monte Carlo simulation to obtain the probability distribution of project duration. Sensitivity analysis is used to identify dominant activities and formulate appropriate mitigation strategies. The results show that the number of critical activities decreased from 67 to 37, with an estimated remaining project duration of 198 days. Under the highest deviation scenario, the P50 duration is 199.206 days and the P90 duration is 201.245 days. Roof slab work is identified as the most influential factor, while fast tracking is effective for non-structural activities such as practical columns.

Keywords: Risk Analysis, Project Delay, Building Construction Project

Abstrak

Keterlambatan proyek konstruksi masih sering terjadi dan berdampak pada peningkatan biaya, gangguan jadwal, serta penurunan mutu pekerjaan. Berbagai penelitian sebelumnya umumnya bersifat deskriptif dan belum memodelkan ketidakpastian durasi secara kuantitatif dan komprehensif. Penelitian ini bertujuan menganalisis risiko keterlambatan dengan mengevaluasi probabilitas penyelesaian proyek serta mengidentifikasi pekerjaan yang paling berpengaruh terhadap keterlambatan. Studi kasus dilakukan pada proyek pembangunan Rumah Susun TNI Kogabwilhan II di Balikpapan. Metode yang digunakan meliputi Critical Path Method (CPM) untuk menentukan lintasan kritis, Earned Value Management (EVM) untuk mengestimasi durasi sisa berdasarkan progres aktual, serta simulasi Monte Carlo untuk memperoleh distribusi probabilitas durasi proyek. Analisis sensitivitas digunakan untuk mengidentifikasi pekerjaan dominan dan merumuskan strategi mitigasi yang tepat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah pekerjaan kritis berkurang dari 67 menjadi 37, dengan estimasi durasi sisa proyek sebesar 198 hari. Pada skenario deviasi terbesar, diperoleh durasi P50 sebesar 199,206 hari dan P90 sebesar 201,245 hari. Pekerjaan pelat dak atap menjadi faktor paling berpengaruh, sedangkan fast tracking efektif pada pekerjaan non-struktur seperti kolom praktis.

Kata kunci: Analisis Risiko, Keterlambatan Proyek, Proyek Pembangunan Gedung

Pendahuluan

Sektor konstruksi memiliki peran penting dalam mendukung pembangunan infrastruktur di Indonesia. Dalam pelaksanaannya, proyek konstruksi dituntut untuk dapat diselesaikan sesuai

dengan target waktu, biaya, dan mutu yang telah ditetapkan (Winoto et al., 2023). Namun demikian, keterlambatan penyelesaian proyek masih sering terjadi, khususnya pada proyek pembangunan gedung bertingkat. Kondisi ini dapat menimbulkan berbagai dampak, seperti peningkatan biaya proyek,

terganggunya jadwal pelaksanaan, penurunan mutu pekerjaan, serta berkurangnya kepuasan pemilik proyek. Proyek konstruksi selalu menghadapi berbagai ketidakpastian, khususnya dalam hal durasi penyelesaian, yang dapat menimbulkan risiko kerugian bagi pihak kontraktor maupun pemilik proyek (Wijaya & Sulisto, 2019). Kondisi ini menegaskan perlunya analisis risiko keterlambatan yang lebih akurat dan komprehensif untuk mendukung pengambilan keputusan.

Dalam analisis risiko keterlambatan proyek, pengendalian waktu pada proyek menjadi hal yang penting, metode penjadwalan seperti *Critical Path Method* (CPM) dan *Program Evaluation and Review Technique* (PERT) telah banyak digunakan. Metode tersebut efektif dalam menentukan lintasan kritis dan estimasi durasi proyek, namun masih memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan ketidakpastian durasi pekerjaan. Oleh karena itu, pendekatan probabilistik seperti Monte Carlo Simulation mulai dikembangkan untuk menghasilkan distribusi probabilitas durasi proyek yang lebih realistis.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji analisis durasi proyek dengan berbagai metode, namun masih memiliki keterbatasan. Penelitian (Azmi et al., 2025) menggunakan *Monte Carlo Simulation* untuk mengestimasi durasi proyek secara probabilistik sehingga menghasilkan estimasi yang lebih realistis dan mampu menggambarkan risiko keterlambatan. Namun, penelitian ini masih berbasis data perencanaan, belum mempertimbangkan progress aktual proyek, serta belum mengintegrasikan CPM, EVM, dan analisis sensitivitas.

Penelitian (Baponzel et al., 2025) menggunakan metode HAZOP untuk menganalisis risiko K3 pada fase operasional bangunan dan menemukan dominasi risiko tinggi yang perlu perhatian dalam manajemen keselamatan. Akan tetapi, penelitian ini tidak membahas aspek penjadwalan proyek seperti keterlambatan maupun estimasi durasi penyelesaian.

Penelitian (Putra & Sekarsari, 2020) menerapkan metode M-PERT untuk estimasi durasi proyek dan menghasilkan estimasi waktu yang cukup akurat dalam perencanaan. Namun, pendekatan ini masih berbasis jadwal rencana dan belum mengintegrasikan EVM serta analisis kinerja proyek secara komprehensif.

Penelitian (Setiawan et al., 2021) menggabungkan CPM dan PERT untuk menentukan lintasan kritis serta peluang penyelesaian proyek. Meskipun demikian, penelitian ini belum menggunakan

Monte Carlo Simulation belum mempertimbangkan progress aktual, serta belum dilengkapi analisis kinerja dan strategi mitigasi keterlambatan. Penelitian (Hudoyo et al., 2023) menggunakan CPM dan PERT untuk mengidentifikasi pekerjaan kritis dalam proyek konstruksi dengan pendekatan deterministik. Namun, penelitian ini belum mempertimbangkan ketidakpastian, belum mengintegrasikan EVM, serta belum menggunakan *Monte Carlo Simulation* berbasis progress aktual.

Penelitian (Abolghasemian et al., 2024) menganalisis durasi proyek dengan pendekatan probabilistik yang mampu menggambarkan ketidakpastian waktu pelaksanaan proyek. Akan tetapi, penelitian ini belum berbasis progress aktual serta belum mengintegrasikan EVM, CPM, dan analisis sensitivitas.

Penelitian (Teguh et al., 2022) menggunakan *Monte Carlo Simulation* berbasis data historis untuk menganalisis distribusi probabilistik durasi proyek. Namun, penelitian ini masih terbatas pada analisis durasi dan belum dilanjutkan dengan mitigasi keterlambatan, analisis sensitivitas aktivitas kritis, maupun strategi schedule compression.

Berdasarkan telaah tersebut, dapat disimpulkan bahwa penelitian terdahulu umumnya masih memiliki keterbatasan, yaitu belum mempertimbangkan progress aktual proyek, belum mengintegrasikan metode CPM, EVM, dan *Monte Carlo Simulation* secara komprehensif, serta belum dilengkapi dengan analisis sensitivitas dan strategi mitigasi keterlambatan.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengintegrasian metode *Critical Path Method* (CPM), *Earned Value Management* (EVM), dan simulasi Monte Carlo dalam satu kerangka analisis yang komprehensif untuk mengevaluasi kinerja jadwal sekaligus memprediksi probabilitas penyelesaian proyek secara lebih akurat dan berbasis risiko. Penelitian ini tidak hanya mengandalkan data perencanaan, tetapi juga secara eksplisit mengakomodasi progress aktual proyek sebagai dasar dalam menghitung deviasi kinerja, estimasi durasi sisa, serta parameter distribusi pada simulasi Monte Carlo, sehingga menghasilkan proyeksi waktu yang lebih realistis terhadap kondisi lapangan. Selain itu, kebaruan lainnya terletak pada pemanfaatan hasil simulasi probabilistik sebagai dasar dalam penyusunan strategi mitigasi keterlambatan melalui pendekatan schedule compression, seperti crashing dan fast tracking, yang disesuaikan dengan tingkat risiko dan kemungkinan penyelesaian proyek. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya bersifat analitis, tetapi juga aplikatif dalam memberikan

rekomendasi pengambilan keputusan yang lebih terukur, adaptif, dan berbasis data dalam manajemen waktu proyek konstruksi.

Penelitian ini dilakukan pada proyek pembangunan Rumah Susun TNI Kogabwilhan II di Balikpapan, Kalimantan Timur, yang merupakan proyek dengan tingkat kompleksitas tinggi dan tuntutan ketepatan waktu penyelesaian. Oleh karena itu, diperlukan analisis penjadwalan yang mampu mengakomodasi ketidakpastian durasi pekerjaan serta mempertimbangkan kinerja proyek berdasarkan progress aktual secara lebih komprehensif.

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis keterlambatan proyek dengan mengidentifikasi pekerjaan kritis menggunakan *Critical Path Method* (CPM), mengevaluasi kinerja jadwal dan estimasi durasi sisa menggunakan *Earned Value Management* (EVM), serta menentukan estimasi durasi berdasarkan deviasi progress dan probabilitas penyelesaian proyek melalui simulasi Monte Carlo, yang dilanjutkan dengan penyusunan strategi mitigasi menggunakan *schedule compression*.

Metode

Metodologi penelitian ini Adalah penelitian kuantitatif berbasis probabilistik. Metode ini dipilih karena penelitian bertujuan untuk menganalisis risiko keterlambatan pada proyek pembangunan rusun TNI Kogabwilhan II di Balikpapan menggunakan metode CPM, EVM, simulasi monte carlo, dan *schedule compression* sebagai pendekatan untuk menentukan rekomendasi mitigasi. Metode CPM digunakan untuk menentukan pekerjaan kritis, EVM digunakan untuk menghitung kinerja proyek dan sisa durasi pekerjaan, Monte Carlo digunakan untuk menganalisis keterlambatan yang terjadi pada proyek dan memberikan hasil distribusi probabilitas durasi proyek berdasarkan kondisi actual.

Lokasi Dan Waktu Penelitian

Adapun detail Lokasi dan waktu penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut:

- 1 Lokasi : Mako Dodikjur, Jalan Penelitian : Mulawarman, Kelurahan Manggar Baru, Kecamatan Balikpapan Timur, Kota Balikpapan, Kalimantan Timur
- 2 Waktu : Penelitian dilaksanakan Penelitian : selama 14 hari dimulai dari 1 April 2026 – 14 April 2026

Data Penelitian

Data Penelitian yang digunakan pada penelitian ini antar lain: Data Sekunder: Rincian Anggaran Biaya, Time Schedule, Rincian Pekerjaan, Kurva S rencana dan aktual.

Teknik Analisis Data

Teknik Analisis Data yang dilakukan dalam penelitian ini bertujuan mengetahui bagaimana ketidakpastian durasi pekerjaan pada proyek konstruksi dapat memengaruhi total durasi penyelesaian proyek dan memberikan rekomendasi terhadap Hasil Analisis sensitivitas dari hasil simulasi. Dan penentuan rekomendasi mitigasi dengan pendekatan *schedule compression*. Langkah - langkah analisa yang dilakukan dijelaskan sebagai berikut:

1. Analisa Deterministik

Pada Tahap ini dilakukan analisis CPM rencana sampai dengan level 4 dan level 5 untuk mendapatkan nilai ES,EF,LF,LS,dan Float. CPM, yang juga dikenal sebagai metode jalur kritis, menggunakan pendekatan estimasi waktu yang bersifat deterministic (Aulady & Orleans, 2016). Penentuan Level 4 dan Level 5 didasarkan pada *A Guide to the Project Management Body of Knowledge* (PMBOK Guide) oleh Project Management Institute. Berdasarkan *A Guide to the Project Management Body of Knowledge* (PMBOK Guide) oleh Project Management Institute, aktivitas harus memiliki tingkat detail yang memadai untuk estimasi durasi dan pengendalian proyek. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan tingkat detail menengah hingga tinggi yang dioperasionalkan sebagai level 3–5, karena pada level tersebut aktivitas sudah cukup rinci untuk analisis Monte Carlo namun tetap efisien untuk diolah. Dimana:

1. ES (*Early Start*) = waktu paling awal pekerjaan bisa dimulai
2. EF (*Early Finish*) = waktu paling awal pekerjaan bisa selesai
3. LS (*Latest Start*) = waktu paling akhir pekerjaan boleh dimulai tanpa menunda proyek
4. LF (*Latest Finish*) = waktu paling akhir pekerjaan selesai tanpa menunda proyek
5. Float = kelonggaran waktu suatu pekerjaan, yaitu berapa lama pekerjaan itu boleh ditunda tanpa mengganggu jadwal proyek.

Kemudian menentukan *Actual Time* (AT) proyek yang sedang berjalan berdasarkan *time schedule*,

Menghitung nilai Earned Schedule yang merupakan turunan dari metode Earned Value yang dikembangkan oleh Walter Pike pada tahun 2003. Efisiensi kinerja dalam penyelesaian pekerjaan dapat ditunjukkan melalui perbandingan antara nilai pekerjaan yang telah diselesaikan secara fisik (Rahmanto & Janizar, 2022). Earned Schedule dapat menggunakan nilai progress untuk EV dan PV, dalam Earned Schedule Langkah-Langkah analisisnya yaitu dengan menghitung:

1. *Earned Schedule (ES)*

$$ES = t + \frac{(EV - PV_T)}{(PV_{t+1} - PV_1)} \quad (1)$$

2. *Schedule Variance (SV(t))*

$$SV(t) = ES - AT \quad (2)$$

3. *Schedule Performance Index (SPI(t))*

$$SPI(t) = ES / AT \quad (3)$$

4. *Estimate At Completion (EAC(t))*

$$EAC(t) = \frac{PD}{SPI(t)} \quad (4)$$

5. *Estimate To Complete (ETC(t))*

$$ETC = EAC(t) - AT \quad (5)$$

Rumus tersebut digunakan untuk analisis EVM pada level global atau keseluruhan proyek. Pada Rumus untuk analisis level pekerjaan untuk menghitung sisa durasi, rumus yang digunakan dalam penelitian ini bukan merupakan rumus baku yang secara eksplisit tercantum dalam literatur atau jurnal, melainkan merupakan pendekatan yang dikembangkan oleh peneliti berdasarkan konsep dasar *Earned Value Management (EVM)*, khususnya indikator kinerja waktu.

Estimasi durasi sisa pekerjaan dalam penelitian ini dihitung pada tingkat aktivitas berdasarkan proporsi sisa progres (1-progress) yang merepresentasikan pekerjaan yang belum diselesaikan, kemudian disesuaikan menggunakan *Schedule Performance Index (SPI)* pada tingkat proyek untuk mengakomodasi deviasi kinerja jadwal. Pendekatan ini didasarkan pada prinsip Earned Value Management yang menyatakan bahwa estimasi ke depan (*forecasting*) dapat diturunkan dari kinerja aktual proyek, di mana SPI berfungsi sebagai indikator efisiensi waktu pelaksanaan (Project Management Institute, 2017).

Penggunaan SPI sebagai dasar penyesuaian estimasi durasi juga didukung oleh temuan empiris

yang menunjukkan bahwa indikator tersebut efektif dalam mengevaluasi kinerja jadwal serta memprediksi waktu penyelesaian proyek berdasarkan kondisi aktual (Sidiq & Johari, 2022). Dengan demikian, metode ini merepresentasikan integrasi antara pendekatan berbasis progres aktivitas dan koreksi kinerja proyek secara agregat, sehingga menghasilkan estimasi durasi sisa yang lebih konsisten, adaptif, dan representatif terhadap dinamika pelaksanaan proyek. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Progress Pekerjaan Berjalan.

$$\frac{Bobot\ Total - Bobot\ Tersisa}{Bobot\ Total} \quad (6)$$

2. Sisa Durasi Pekerjaan Sedang Berjalan

$$\frac{Durasi\ Rencana \times (1 - Progress\ berjalan)}{SPIt} \quad (7)$$

3. Durasi Sisa Pekerjaan Belum Berjalan

$$\frac{Durasi\ Rencana\ Aktivitas}{SPIt} \quad (8)$$

2. Transformasi Ke Bentuk Probabilistik

Durasi hasil analisis EVM dilakan pembaruan CPM sesuai kondisi aktual dan diubah menjadi tiga estimasi *Optimistic (O)*, *Most Likely (M)*, dan *Pessimistic (P)* menggunakan scenario deviasi progress -0,05346%, -4,99720%, dan -9,94094%. Dyrasi Most likely diambil dari durasi hasil analisis EVM sedangkan untuk durasi Optimistic dan Pessimistic menggunakan rumus sebagai berikut:

1. Durasi Optimistic

$$Durasi\ Most\ Likely \times (1 - Deviasi\ Progress) \quad (9)$$

2. Durasi Pessimistic

$$Durasi\ Most\ Likely \times (1 + Deviasi\ Progress) \quad (10)$$

Hasil Perhitungan akan dimasukkan kedalam Distribusi Triangular yang ada pada fitur dari perangkat lunak Oracle Crystall Ball secara otomatis yang nantinya akan dilakukan simulasi monte carlo. Distribusi triangular menggunakan tiga parameter, yaitu nilai minimum, maksimum, dan nilai paling mungkin. Probabilitas terbesar berada di sekitar nilai paling mungkin, sedangkan nilai yang mendekati batas minimum dan maksimum memiliki probabilitas lebih kecil (Titarsole & Camerling, 2017).

3. Simulasi Monte Carlo

Simulasi dilakukan sebanyak 10.000 kali dengan perangkat lunak Oracle Crystall Ball. Simulasi dilakukan sebanyak 10.000 kali untuk mengurangi error relatif yang ada pada hasil simulasi.

Dengan menetapkan target error relatif $\pm 1\%$, diperoleh jumlah iterasi:

$$N = \frac{1}{(Error_{rel})^2} = \frac{1}{(0,01)^2} = 10.000 \quad (11)$$

Artinya, semakin besar jumlah iterasi N , semakin kecil error relatif terhadap fluktuasi hasil simulasi, dengan laju pengecilan sebanding dengan invers akar kuadrat dari N .

4. Pengolahan Hasil Simulasi

Simulasi Monte Carlo menghasilkan distribusi durasi proyek dalam bentuk histogram, nilai percentile atau Tingkat kepercayaan penyelesaian proyek dari P0 hingga P100, Analisis Sensitivitas untuk melihat 10 pekerjaan yang paling berpengaruh terhadap variasi total durasi proyek, hasil analisis sensitivitas tersebut akan dilakukan interpretasi korelasi berdasarkan korelasi Spearman:

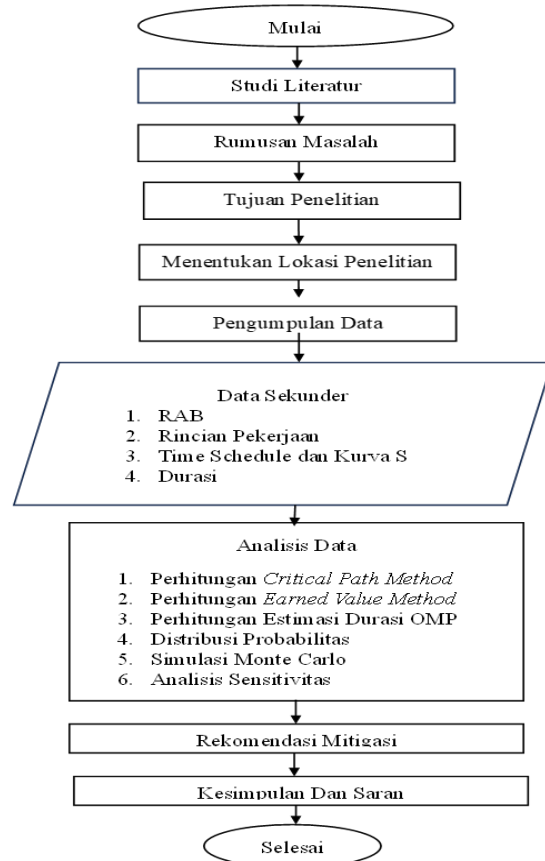
Tabel 1. Interpretasi Korelasi Spearman	
Spearman ρ	Correlation
$\geq 0,70$	Very strong relationship
0,40 – 0,69	Strong relationship
0,30 – 0,39	Moderate relationship
0,20 – 0,29	Weak relationship
0,01 – 0,19	No or negligible relationship

Sumber : Dancey dan Reidy (2004) dikutip dalam (Leclezio et al., 2015)

Rekomendasi mitigasi keterlambatan proyek dilakukan dengan menggunakan pendekatan *schedule compression*. Pendekatan ini dipilih mengacu pada PMBOK Guide edisi ke-6 (Project Management Institute, 2017) yang menyebutkan bahwa *schedule compression* merupakan teknik dalam proses Develop Schedule yang digunakan untuk mempercepat durasi proyek tanpa mengubah ruang lingkup pekerjaan. Teknik yang digunakan dalam pendekatan ini meliputi *crashing* dan *fast tracking*, yang diterapkan berdasarkan karakteristik aktivitas pada lintasan kritis..10 Pekerjaan yang paling berpengaruh terhadap variasi durasi total penyelesaian proyek akan dilakukan analisis untuk

menentukan rekomendasi mitigasi. Pada pendekatan *Schedule Compression* terdapat dua mitigasi yaitu *Crashing* dan *Fast Tracking*.

Bagan Alir Penelitian Adalah Sebagai Berikut:



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

Hasil dan Pembahasan

Pada Hasil Analisis CPM rencana terdapat 67 Pekerjaan dari 446 Pekerjaan yang merupakan pekerjaan kritis dengan durasi total adalah 271 hari kalender. Perhitungan EVM kemudian dilakukan berdasarkan time schedule proyek untuk menentukan keterlambatan dan durasi waktu tersisa pada level global dan level pekerjaan. Time schedule proyek berupa time schedule per minggu. Pada Minggu ke-20 Progress yang telah tercapai adalah 24,368% sedangkan pada rencana proyek yang harus tercapai adalah 32,641%. Pada level global atau keseluruhan proyek didapatkan hasil EVM sebagai berikut:

Dilakukan perhitungan untuk mengetahui nilai ES dengan menggunakan nilai PV pada periode tertentu diantara nilai EV. PV minggu ke 19 = 29,558%, PV minggu ke 17 = 23,554%, dan EV pada Actual Time (AT) pada minggu ke 20 = 24,368%

$$\begin{aligned}
 \text{Earned Schedule (ES)} & & \text{EACt} &= \frac{271 \text{ hari}}{0,86356} = 313,802 \text{ Hari} & (15) \\
 \text{ES} &= 17 + \frac{(24,368-23,554)}{(29,558-23,554)} \times (19-17) = 17,2712 & & & \\
 \text{Minggu} & & \text{Estimate To Complete (ETC(t))} & & \\
 & & \text{ETCt} &= 313,802 \text{ Hari} - \text{AT (Minggu ke-20)} & (16) \\
 & & & = 313,802 \text{ Hari} - 136 \text{ Hari} = 177,802 \text{ Hari} & (17) \\
 \text{Schedule Variance (SV(t))} & & & & \\
 \text{SV (t)} &= 17,2712 - 20 = 2,73 \text{ Minggu} & (13) & & \\
 \text{Schedule performance Index (SPI(t))} & & & & \\
 \text{SPI(t)} &= \frac{17,2712}{20} = 0,86356 & (14) & & \\
 \text{Estimate At Completion ((EAC(t))} & & & & \\
 \end{aligned}$$

Nilai SPI yang kurang dari 1 menunjukkan bahwa kinerja waktu proyek berada di bawah rencana, sehingga proyek mengalami keterlambatan. Pada level pekerjaan perhitungan *Earned Schedule* untuk mengetahui durasi sisa tiap pekerjaan dilakukan berdasarkan time schedule proyek.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Durasi Sisa Pekerjaan

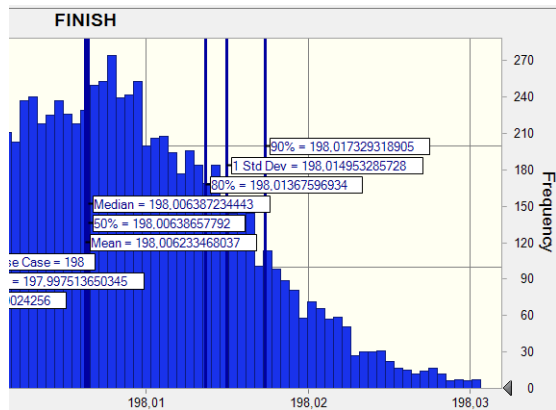
Pekerjaan	Bobot Total (%)	Bobot Tersisa (%)	Durasi Rencana (Hari)	Durasi Sisa Pekerjaan (Hari)
Pekerjaan Persiapan	2,138	1,346	271	198
Pekerjaan Arsitektur dan Struktur Lantai 1	24,549	14,161	147	99
Pekerjaan Arsitektur dan Struktur Lantai 2	19,535	16,062	196	187
Pekerjaan Arsitektur Dan Struktur Lantai 3	19,189	16,481	147	147
Pekerjaan Arsitektur dan Struktur Lantai Atap	6,242	6,242	105	122
Pekerjaan Pemasangan Lift Kapasitas 800 Kg	2,567	2,567	28	33
Pekerjaan Bor Sumur 2 Unit	0,555	0	14	0
Pekerjaan Ground Tank	0,474	0,2108	14	8
Pekerjaan Jalan Dan Parkir	9,677	4,123	56	28
Pekerjaan Saluran Air Beton	0,200	0	0	0
Pekerjaan Taman	0,237	0,237	14	17
Pekerjaan Dinding Pagar Batas Rusun	1,773	1,335	21	19
Pekerjaan BPPLN	1,809	1,809	21	25
Pekerjaan Alsatri Rumah	11,056	11,056	112	130

Hasil EVM tersebut digunakan untuk pembaruan CPM untuk pekerjaan yang belum berjalan dan sedang berjalan. Hasil Analisis Pembaruan CPM menghasilkan 37 Pekerjaan Kritis. Hasil Pembaruan CPM akan digunakan untuk menentukan Estimasi Durasi *Optimistic* (P), *Most Likely* (M), dan *Pessimistic* (P) dengan Skenario Deviasi Progress - 0,05346%, -4,99720%, -9,94094% berdasarkan Time Schedule Proyek yang kemudian dimasukkan

kedalam distribusi triangular pada perangkat lunak Oracle Crystall Ball dan dilakukan simulasi sebanyak 10.000 kali untuk masing-masing skenario deviasi progress. Analisis dilakukan menggunakan metode Monte Carlo simulation untuk mengetahui pengaruh variasi durasi terhadap ketidakpastian waktu penyelesaian proyek. Pekerjaan dokumentasi, listrik kerja, dan air kerja dimulai dari awal proyek dan durasinya sama dengan durasi total proyek yang digunakan untuk simulasi monte carlo dari hasil analisis pembaruan

CPM (198 hari). Pekerjaan ini independen, artinya tidak tergantung pada pekerjaan lain dan tidak memengaruhi pekerjaan jalur kritis hal ini adalah penyerdehanaan model yang dilakukan agar hasil probabilistik bisa fokus kepada jalur kritis pekerjaan, akan tetapi hal ini membuat pekerjaan-pekerjaan tersebut tidak masuk kedalam simulasi. Oleh karena itu, dalam perhitungan CPM, durasi proyek ditentukan oleh pekerjaan jalur kritis yang saling tergantung, sementara pekerjaan independen tidak tergantung oleh pekerjaan lain dan tidak masuk untuk simulasi Monte Carlo serta perubahan durasinya tidak memengaruhi total durasi proyek. akan tetapi sisa durasi untuk hasil perhitungan SPI dari pekerjaan tersebut adalah durasi terpanjang, jadi akan tetap dipakai sebagai patokan selesainya proyek konstruksi sebelum simulasi

Hasil Simulasi Monte Carlo Skenario Deviasi - 0,05346%



Gambar 2. Histogram Skenario -0,05346%

Histogram menunjukkan hasil durasi dengan iterasi terbanyak adalah jarak diantara 198 hari sampai 198,01 hari dengan jumlah iterasi (*Frequency*) tertinggi mencapai lebih dari 270 iterasi dari total 10.000 iterasi. dengan puncaknya adalah 198,04 hari. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi relatif homogen dan tidak berbeda jauh dari durasi awal yaitu 198 hari

Statistic	Forecast values
Trials	10.000
Base Case	198
Mean	198,006233468037
Median	198,006387234443
Mode	---
Standard Deviation	0,00871981769145055
Variance	7,6035220572134e-05
Skewness	0,0107
Kurtosis	2,94
Coeff. of Variation	4,4038E-05
Minimum	197,977340539064
Maximum	198,0432358477
Mean Std. Error	8,71981769145055e-05

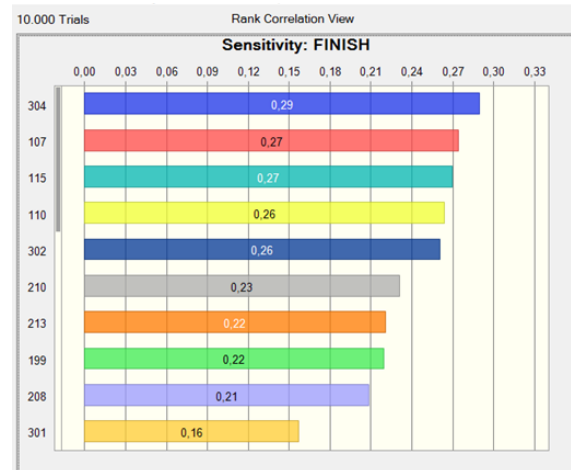
Gambar 3. Hasil Statistik Skenario -0,05346%

Hasil statistik menunjukkan nilai Mean 198,006 hari yang artinya dari 10.000 iterasi nilai rata2 hasil iterasi tersebut adalah 198,006 hari. Kesamaan nilai mean dan median menunjukkan distribusi yang simetris, sementara standar deviasi yang sangat kecil (0,008) mengindikasikan tingkat ketidakpastian yang rendah. Nilai percentile yang tidak berbeda signifikan juga memperkuat bahwa durasi proyek cenderung stabil pada berbagai tingkat kepercayaan.

Percentile	Forecast values
0%	197,977340539064
10%	197,994900024256
20%	197,99886215984
30%	198,001598983343
40%	198,004006672405
50%	198,00638657792
60%	198,00845524518
70%	198,010827764336
80%	198,01367596934
90%	198,017329318905
100%	198,0432358477

Gambar 4. Hasil Percentile -0,05346%

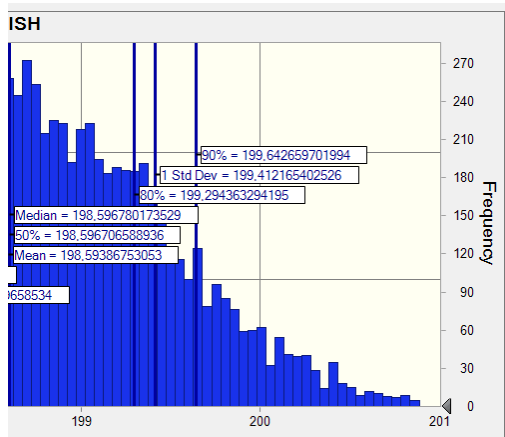
Hasil simulasi monte carlo menunjukkan nilai P50 adalah 198,006 hari dan P90 adalah 198,01 hari, hasilnya menunjukkan bahwa pada tingkat kepercayaan yang lebih tinggi, durasi proyek hampir tidak berubah.



Gambar 5. Analisis Sensitivitas Skenario -0,05346%

Hasil *sensitivity analysis* menunjukkan bahwa pekerjaan pelat dak atap (ID 304) memiliki korelasi tertinggi terhadap durasi proyek, namun masih dalam kategori lemah. Hal ini menunjukkan bahwa tidak ada satu pekerjaan yang dominan mempengaruhi durasi, melainkan pengaruhnya tersebar di beberapa pekerjaan dalam jalur kritis.

Hasil Simulasi Monte Carlo Skenario Deviasi - 4,99720%



Gambar 6. Histogram Skenario -4,99720%

Histogram menunjukkan hasil durasi dengan iterasi terbanyak adalah jarak diantara 198 hari sampai 199 hari dengan jumlah iterasi (*Frequency*) tertinggi mencapai lebih dari 270 iterasi dari total 10.000 iterasi. dengan puncaknya adalah 201,60 hari.

Forecast: FINISH	
10.000 Trials	
Statistic	Forecast values
Trials	10.000
Base Case	198
Mean	198,59386753053
Median	198,596780173529
Mode	---
Standard Deviation	0,818297871995903
Variance	0,669611407313023
Skewness	-0,0128
Kurtosis	2,96
Coeff. of Variation	0,0041
Minimum	195,276482386283
Maximum	201,606379438444
Mean Std. Error	0,00818297871995903

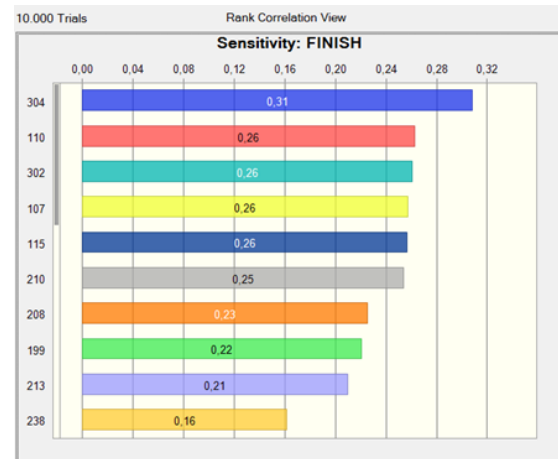
Gambar 7. Hasil Statistik Skenario -4,99720%

nilai mean dan median yang hampir sama, menunjukkan distribusi yang relatif tetap simetris. Standar deviasi sebesar 0,81 mengindikasikan adanya peningkatan variasi durasi proyek, meskipun tingkat ketidakpastian masih tergolong rendah.

Forecast: FINISH	
10.000 Trials	
Percentile	Forecast values
0%	195,276482386283
10%	197,539819321759
20%	197,896889514547
30%	198,160240858276
40%	198,391462711366
50%	198,596706588936
60%	198,797475219106
70%	199,03238908295
80%	199,294363294195
90%	199,642659701994
100%	201,606379438444

Gambar 8. Hasil Percentile Skenario -4,99720%

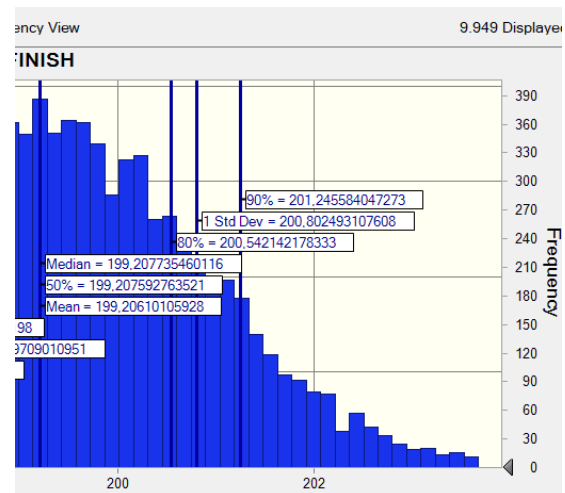
Hasil percentile menunjukkan nilai P50 sebesar 198,59 hari dan P90 sebesar 199,64 hari, dengan selisih 1,05 hari yang menandakan distribusi masih relatif sempit. Pada tingkat kepercayaan yang tinggi, durasi proyek hanya berbeda 1 hari.



Gambar 9. Analisis Sensitivitas Skenario - 4,99720%

Sensitivity analysis menunjukkan bahwa pekerjaan pelat dak atap (ID 304) tetap menjadi pekerjaan dengan korelasi tertinggi terhadap durasi proyek, meskipun hubungannya masih dalam kategori lemah. Dengan nilai korelasinya 0,31.

Hasil Simulasi Monte Carlo Skenario Deviasi - 9,94094%



Gambar 10. Histogram Skenario -9,94094%

Histogram menunjukkan distribusi durasi yang semakin lebar dibandingkan simulasi sebelumnya, dengan puncak yang terpusat pada sekitar 204,83 hari. dengan iterasi terbanyak adalah jarak diantara 199 hari sampai 202 hari dengan jumlah iterasi (*Frequency*) tertinggi mencapai lebih dari 390 iterasi dari total 10.000 iterasi.

Statistic	Forecast values
Trials	10.000
Base Case	198
Mean	199,20610105928
Median	199,207735460116
Mode	---
Standard Deviation	1,5963920483286
Variance	2,54846757196679
Skewness	0,0192
Kurtosis	2,98
Coeff. of Variation	0,0080
Minimum	193,097949084147
Maximum	204,835334277871
Mean Std. Error	0,015963920483286

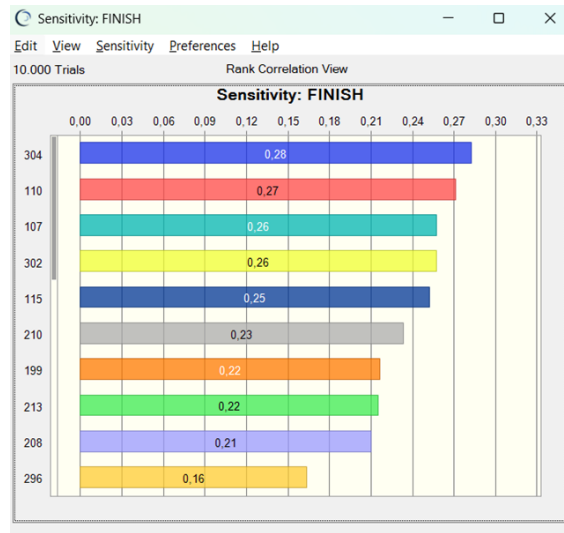
Gambar 11. Hasil Statistik Skenario -9,94094%

nilai mean dan median yang hampir sama, yaitu 199,20 hari, menunjukkan bahwa distribusi tetap bersifat simetris tanpa penyimpangan yang signifikan. Standar deviasi sebesar 1,59 menandakan bahwa variasi durasi proyek semakin meningkat dibandingkan skenario sebelumnya, sehingga tingkat ketidakpastian proyek juga bertambah.

Percentile	Forecast values
0%	193,097949084147
10%	197,186942516086
20%	197,864983244289
30%	198,367065496149
40%	198,780919625569
50%	199,207592763521
60%	199,601518382273
70%	200,051910150561
80%	200,542142178333
90%	201,245584047273
100%	204,835334277871

Gambar 12. Hasil Percentile Skenario -9,94094%

Hasil analisis percentile menunjukkan nilai P50 sebesar 199,20 hari dan P90 sebesar 201,24 hari, yang berarti terdapat kemungkinan 50% proyek selesai dalam 199,19 hari dan 90% selesai dalam 201,24 hari, akan tetapi pada P100 yaitu dengan tingkat kepercayaan 100% nilai durasi adalah 204,83 hari. Rentang antara P50 dan P90 menunjukkan bahwa meskipun terjadi peningkatan variasi, distribusi durasi masih tergolong cukup terkendali.



Gambar 13. Analisis Sensitivitas Skenario - 9,94094%

Sementara itu, hasil sensitivity analysis menunjukkan bahwa pekerjaan pelat dak atap (ID 304) tetap menjadi pekerjaan dengan pengaruh terbesar terhadap perubahan durasi total proyek, dengan nilai korelasi sebesar 0,28 yang termasuk dalam kategori hubungan lemah (weak relationship). Hal ini menunjukkan bahwa pada setiap skenario pekerjaan dengan ID 304 memiliki nilai korelasi terbesar.

Perbandingan Hasil Simulasi Monte Carlo

Tabel 3. Perbandingan Hasil Simulasi

Deviations (%)	Mean	Std Dev	P50	P80	P90
-0,0534	198,06	0,008	198,06	198,13	198,17
-4,9972	198,93	0,18	198,96	199,94	199,42
-9,9409	199,06	1,596	199,07	200,42	201,45

Sumber: Hasil Analisis Penelitian

Tabel 3 menyajikan hasil simulasi Monte Carlo terhadap durasi proyek pada tiga skenario deviasi, yaitu -0,05346%, -4,99720%, dan -9,94094%, dengan parameter mean, standar deviasi, serta nilai probabilistik P50, P80, dan P90.

Pada deviasi -0,05346%, diperoleh mean sebesar 198,006 hari dengan standar deviasi 0,008, serta nilai P50, P80, dan P90 yang hampir sama (198,006–198,017 hari). Hal ini menunjukkan

bahwa variasi durasi sangat kecil dan tingkat ketidakpastian relatif rendah.

Pada deviasi -4,99720%, mean meningkat menjadi 198,593 hari dengan standar deviasi 0,818. Nilai P50, P80, dan P90 masing-masing sebesar 198,596 hari, 199,294 hari, dan 199,642 hari, yang mengindikasikan mulai meningkatnya variasi dan ketidakpastian durasi proyek.

Pada deviasi -9,94094%, mean kembali meningkat menjadi 199,206 hari dengan standar deviasi 1,596. Nilai P80 dan P90 mencapai 200,542 hari dan 201,245 hari, menunjukkan bahwa ketidakpastian semakin tinggi dan rentang durasi semakin lebar.

Secara keseluruhan, peningkatan deviasi dari 0,05346% ke 9,94094% menyebabkan:

1. Peningkatan durasi rata-rata proyek

2. Peningkatan variasi durasi
3. Peningkatan risiko keterlambatan

Hal ini menunjukkan bahwa proyek memiliki sensitivitas terhadap ketidakpastian durasi pekerjaan. Oleh karena itu, dalam perencanaan proyek, penggunaan nilai P80 atau P90 lebih disarankan untuk mengantisipasi risiko keterlambatan.

Rekomendasi Mitigasi Dengan Schedule Compression

Upaya schedule compression dilakukan sebagai langkah untuk mengatasi keterlambatan proyek berdasarkan hasil analisis sensitivitas dari simulasi Monte Carlo sebelumnya. Metode ini difokuskan pada skenario dengan deviasi terbesar, yaitu sebesar -9,94094%, yang mencerminkan kondisi keterlambatan paling kritis dalam proyek.

Tabel 4. Rekomendasi Mitigasi Dengan Pendekatan Schedule Compression

ID	Pekerjaan	Sensitivity	Klasifikasi Pekerjaan	Korelasi	Metode Mitigasi
304	Pekerjaan pelat dak atap t:10 cm	0,28	Pekerjaan Kritis	Weak Relationship	Crashing (Merupakan Pekerjaan Struktur Dan Berurutan, tidak bisa dilakukan Overlapping)
110	Pembuatan pelat lantai (12 cm) LT.2	0,27	Pekerjaan Kritis	Weak Relationship	Crashing (Merupakan Pekerjaan Struktur Dan Berurutan, tidak bisa dilakukan Overlapping)
107	Pembuatan beton balok BY.6 (25x40) cm LT.2	0,26	Pekerjaan Kritis	Weak Relationship	Crashing (Merupakan Pekerjaan Struktur Dan Berurutan, tidak bisa dilakukan Overlapping)
302	Pembuatan beton balok BA.1 (25x40) cm LT.Atap	0,26	Pekerjaan Kritis	Weak Relationship	Crashing (Merupakan Pekerjaan Struktur Dan Berurutan, tidak bisa dilakukan Overlapping)
115	Pekerjaan beton kolom praktis (12x12 cm) LT.2	0,25	Pekerjaan Kritis	Weak Relationship	Fast Tracking (Pelaksanaannya dapat dilakukan secara bertahap mengikuti progres pekerjaan dinding, dapat dilakukan overlapping)
210	Pekerjaan beton kolom 30x50 (K2) LT.3	0,23	Pekerjaan Kritis	Weak Relationship	Crashing (Merupakan Pekerjaan Struktur Dan Berurutan, tidak bisa dilakukan Overlapping)
199	Pembuatan beton balok BY.1 (30x50) cm LT.3	0,22	Pekerjaan Kritis	Weak Relationship	Crashing (Merupakan Pekerjaan Struktur Dan Berurutan, tidak bisa dilakukan Overlapping)
213	Pekerjaan beton kolom praktis (12x12 cm) LT.3	0,22	Pekerjaan Kritis	Weak Relationship	Fast Tracking (Pelaksanaannya dapat dilakukan secara bertahap mengikuti progres pekerjaan dinding, dapat dilakukan overlapping)

208	Pembuatan pelat lantai (12 cm) LT.3	0,21	Pekerjaan Kritis	Weak Relationship	Fast Tracking (Pelaksanaannya dapat mengikuti pekerjaan dinding, dapat dilakukan overlapping)
296	Pembuatan beton balok BX.2 (25x40) cm LT. Atap	0,16	Pekerjaan Kritis	Weak Relationship	Crashing (Merupakan Pekerjaan Struktur Dan Berurutan, tidak bisa dilakukan Overlapping)

Sumber: Hasil Analisis Penelitian

Pada Tabel 4 berisi tentang hasil penentuan rekomendasi mitigasi menggunakan pendekatan *schedule compression*. Pemilihan metode *schedule compression* didasarkan pada karakteristik dan hubungan ketergantungan antar pekerjaan. Pada pekerjaan struktur, metode yang digunakan adalah *crashing* karena aktivitasnya bersifat berurutan (*finish-to-start*) dan berada pada lintasan kritis, sehingga tidak memungkinkan pelaksanaan secara paralel tanpa meningkatkan risiko terhadap mutu dan keselamatan. Pada pekerjaan kolom praktis, metode yang digunakan adalah *fast tracking* karena memiliki fleksibilitas pelaksanaan yang lebih tinggi dan tidak sepenuhnya bergantung pada urutan pekerjaan struktur utama. Kondisi ini memungkinkan beberapa aktivitas dilakukan secara tumpang tindih dengan pekerjaan lain tanpa mengganggu alur konstruksi secara signifikan.

Perbandingan dengan penelitian terdahulu. Temuan penelitian ini sejalan dengan (Azmi et al., 2025) yang menunjukkan bahwa *Monte Carlo Simulation* mampu menghasilkan estimasi durasi proyek yang lebih realistis, namun pendekatan dalam penelitian ini lebih komprehensif karena telah mempertimbangkan progress aktual proyek melalui Earned Value Management (EVM).

Pendekatan yang digunakan juga menguatkan (Putra dan Sekarsari, 2020) bahwa metode probabilistik memiliki tingkat akurasi yang lebih baik dibandingkan metode deterministik, sekaligus menunjukkan kemampuan Monte Carlo Simulation dalam menggambarkan variasi durasi akibat deviasi progress proyek.

Dalam hal penentuan pekerjaan kritis, analisis yang dilakukan mendukung temuan (Setiawan et al., 2021) melalui penggunaan CPM, namun menunjukkan bahwa pekerjaan kritis bersifat dinamis ketika mempertimbangkan progress aktual, yang ditunjukkan oleh perubahan jumlah pekerjaan kritis dari 67 menjadi 37.

Sejalan dengan (Hudoyo et al., 2023), pekerjaan kritis dapat diidentifikasi menggunakan CPM, tetapi penelitian ini memberikan pengembangan melalui analisis sensitivitas yang menunjukkan bahwa tidak semua pekerjaan kritis memiliki

tingkat pengaruh yang sama, dengan pekerjaan pelat dak atap sebagai pekerjaan paling dominan.

Selain itu, temuan ini juga mengonfirmasi (Abolghasemian et al., 2024) bahwa pendekatan probabilistik mampu menggambarkan ketidakpastian durasi proyek, serta melengkapinya dengan strategi mitigasi melalui *schedule compression* yang menunjukkan bahwa percepatan hanya efektif pada pekerjaan non-struktur.

Sejalan dengan (Teguh et al., 2022), simulasi Monte Carlo mampu menganalisis durasi proyek secara probabilistik dan menggambarkan ketidakpastian. Namun, penelitian tersebut masih terbatas pada tahap analisis dan belum dikembangkan ke arah mitigasi keterlambatan dengan penerapan *schedule compression*.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis CPM, EVM, dan simulasi Monte Carlo, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil analisis CPM menunjukkan Jumlah pekerjaan kritis pada jadwal rencana adalah 67 dari total 446 pekerjaan, sedangkan pada kondisi aktual tersisa 37 pekerjaan kritis karena sebagian pekerjaan telah selesai. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi aktual CPM bersifat dinamis dan bisa berubah
2. Hasil analisis EVM menunjukkan durasi sisa proyek adalah 198 hari. Pekerjaan persiapan berlangsung selama 198 hari (dari awal hingga akhir proyek), sedangkan durasi pekerjaan lain bervariasi, seperti LT.1 (99 hari), LT.2 (187 hari), LT.3 (147 hari), atap (122 hari), lift (33 hari), dan beberapa pekerjaan dengan durasi lebih singkat hingga 0 hari.
3. Simulasi Monte Carlo menunjukkan probabilitas durasi penyelesaian proyek berdasarkan simulasi Monte Carlo dipengaruhi oleh deviasi. Pada deviasi - 9,94%, diperoleh durasi P50 = 199,207 hari, P80 = 200,542 hari, dan P90 = 201,245 hari. Pekerjaan paling

berpengaruh adalah LT. dak atap dengan korelasi 0,28 (*weak*).

4. Hasil rekomendasi mitigasi dengan pendekatan *schedule compression* menunjukkan pekerjaan struktur tidak dapat di-*fast track* karena bersifat berurutan, sedangkan pekerjaan non-struktur memungkinkan overlapping. Pekerjaan yang dapat di-*fast track* adalah kolom praktis karena dapat dikerjakan bersamaan dengan dinding.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pihak Proyek Pembangunan Rumah Susun 3 Lantai Kogabwilhan II Kota Balikpapan, Pihak TNI di Komando Gabungan Wilayah Pertahanan II selaku pengawas yang sudah memberikan izin dan kemudahan dalam memperoleh data.

Daftar Pustaka

- Abolghasemian, M., Nasiri, M. R., Agha, J., Vaseei, M., Chobar, A. P., Modibbo, U. M. & Abolghasemian, M. (2024). A Monte Carlo simulation to identify the effect of delays in construction project scheduling. *International Journal of Applied Operational Research*, 12(2), 1–23.
- Aulady, M. F. N. & Orleans, C. (2016). Perbandingan durasi waktu proyek konstruksi antara metode critical path method (CPM) dengan metode critical chain project management (studi kasus: proyek pembangunan apartemen Menara Rungkut). *Jurnal IPTEK*, 20(1), 13–25.
- Azmi, Y., Prasetyo, Y. W. & Purnomo, D. A. (2025). Penerapan metode Monte Carlo pada penjadwalan proyek untuk pengelolaan risiko dan optimasi waktu proyek (studi kasus: renovasi kantor depo mekanik Daop IX Jember). *Media Konstruksi*, 10(2), 201–214.
- Baponzel, A. R., Puspasari, V. H. & Waluyo, R. (2025). Analisis tingkat risiko bahaya K3 pada pemanfaatan bangunan dengan metode hazard operability study (HAZOP) (studi kasus: hotel Z Palangka Raya). *Jurnal Basement*, 3(1), 68–79.
- Hudoyo, C. P., Rustendi, I. & Handayani, I. (2023). Risk analysis of Pemalang district road and bridge construction delays. *Applied Research on Civil Engineering and Environment (ARCEE)*, 4(2), 84–94.
- Leclezio, L., Jansen, A., Whittemore, V. H. & de Vries, P. J. (2015). Pilot validation of the tuberous sclerosis-associated neuropsychiatric disorders (TAND) checklist. *Pediatric Neurology*, 52(1), 16–24.
- Project Management Institute (2017). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide)* (6th ed.). Newtown Square, PA: Project Management Institute.
- Putra, J. G. & Sekarsari, J. (2020). Analisis penjadwalan proyek gedung bertingkat dengan metode PERT dan M-PERT menggunakan simulasi Monte Carlo. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 3(3), 533–546.
- Rahmanto, T. & Janizar, S. (2022). Pengendalian biaya dan waktu dengan metode earned value proyek Fmilia Urban Bekasi. *Jurnal Teknik Sipil Cendekia*, 3(2), 331–342.
- Setiawan, D. C., Ridwan, A. & Suwarno, S. (2021). Optimalisasi penjadwalan proyek pembangunan gedung Puskesmas Badas menggunakan critical path method–project evaluation and review technique (CPM–PERT). *Jurnal Manajemen Teknologi & Teknik Sipil*, 4(2), 71–79.
- Sidiq, A. P. & Johari, G. J. (2022). Analisis penerapan earned value terhadap manajemen waktu dan biaya pada proyek Jembatan Cibuni. *Jurnal Konstruksi*, 20(1), 139–150.
- Teguh, V. P., Budiman, J. & Nugraha, P. (2022). Analisis penjadwalan proyek konstruksi menggunakan simulasi Monte Carlo studi kasus: pembangunan rumah tinggal di Surabaya. *Dimensi Utama Teknik Sipil*, 9(2), 156–167.
- Titarsole, J. & Camerling, B. J. (2017). Analisis sistem antrian pada area parkir mobil tangki ke filling shed dengan menggunakan Promodel (studi kasus di PT Pertamina Terminal BBM Wayame Ambon). *Arika*, 11(1), 67–82.
- Wijaya, F. S. & Sulisto, H. (2019). Manajemen proyek garden apartment. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 2(3), 189–198.
- Winoto, M. C., Guwinarto, K. & Limanto, S. (2023). Faktor penyebab dan dampak keterlambatan pelaksanaan proyek konstruksi menurut kontraktor terhadap indikator performa proyek. *Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 12(1), 57–63.