

Probabilistik Durasi Proyek Konstruksi Menggunakan Integrasi Critical Path Method dan Simulasi Monte Carlo pada Pembangunan Gedung Ruang Kelas Belajar MAN 4 Kampar

Herianto Siahaan, Mardiaman*

Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Tama Jagakarsa Institusi, Jakarta Selatan, 12530, Indonesia

ARTICLE INFO

Kata Kunci:

Critical Path Method, simulasi Monte Carlo, ketidakpastian durasi proyek, *probabilistic scheduling*, manajemen waktu proyek

***Correspondence email:**

mardi240967@gmail.com

Submitted: 07 Maret 2026

Revised: 03 Mei 2026

Accepted: 19 Juli 2026

Published: 01 Agustus 2026

ABSTRAK

Perencanaan waktu proyek konstruksi umumnya menggunakan pendekatan deterministik melalui metode Critical Path Method (CPM) untuk menentukan lintasan kritis dan durasi proyek. Namun, pendekatan ini belum mampu menggambarkan ketidakpastian durasi aktivitas yang sering terjadi selama pelaksanaan proyek konstruksi. Ketidakpastian tersebut dapat menyebabkan deviasi terhadap jadwal proyek sehingga meningkatkan risiko keterlambatan penyelesaian proyek. Oleh karena itu diperlukan pendekatan probabilistik untuk menganalisis variasi durasi proyek secara lebih realistis. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis probabilitas durasi penyelesaian proyek konstruksi dengan mengintegrasikan metode Critical Path Method dan simulasi Monte Carlo. Objek penelitian adalah proyek pembangunan gedung ruang kelas belajar MAN 4 Kampar dengan durasi rencana proyek sebesar 244 hari. Analisis dilakukan dengan menyusun jaringan kerja proyek dan mengidentifikasi lintasan kritis menggunakan metode CPM. Selanjutnya, variasi durasi aktivitas pada lintasan kritis dimodelkan menggunakan distribusi triangular dan dianalisis melalui simulasi Monte Carlo menggunakan perangkat lunak Oracle Crystal Ball dengan 1000 iterasi simulasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa durasi proyek memiliki distribusi probabilitas dengan rentang antara 199,13 hari hingga 214,99 hari. Nilai durasi proyek pada tingkat probabilitas P50 diperoleh sebesar 207,58 hari, sedangkan pada tingkat probabilitas P80 dan P90 masing-masing diperoleh sebesar 209,76 hari dan 210,76 hari. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan probabilistik mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai variasi durasi proyek dibandingkan dengan pendekatan deterministik. Oleh karena itu, pendekatan integrasi CPM dan simulasi Monte Carlo direkomendasikan sebagai metode analisis probabilistik dalam perencanaan dan pengendalian jadwal proyek konstruksi untuk mengantisipasi ketidakpastian durasi proyek

ABSTRACT

Keywords:

Critical Path Method, Monte Carlo Simulation, project duration uncertainty, *probabilistic scheduling*, construction project management

Construction project scheduling commonly applies a deterministic approach using the Critical Path Method (CPM) to determine critical activities and project duration. However, this approach often fails to represent the uncertainty of activity durations that frequently occur during project implementation. Such uncertainty may cause deviations from the planned schedule and increase the risk of project delays. Therefore, a probabilistic approach is required to analyze project duration variability more realistically. This study aims to analyze the probability of construction project completion time by integrating the Critical Path Method and Monte Carlo simulation. The case study was conducted on the construction project of the MAN 4 Kampar classroom building with a planned duration of 244 days. The analysis began with developing a project network and identifying the critical path using CPM. The variability of activity durations on the critical path was then modeled using a triangular probability distribution and analyzed through Monte Carlo simulation using Oracle Crystal Ball with 1000 iterations. The simulation results indicate that the project duration follows a probabilistic distribution ranging from 199.13 days to 214.99 days. The project duration at the P50 probability level is 207.58 days, while the P80 and P90 levels are 209.76 days and 210.76 days, respectively. These findings demonstrate that the probabilistic approach provides a more comprehensive representation of project duration variability compared with the deterministic approach. Therefore, the integration of CPM and Monte Carlo simulation is recommended as a probabilistic analysis method in the planning and control of construction project schedules to anticipate project duration uncertainty.

PENDAHULUAN

Proyek konstruksi merupakan kegiatan yang kompleks karena melibatkan berbagai aktivitas pekerjaan yang saling berkaitan, penggunaan sumber daya yang terbatas, serta adanya ketidakpastian dalam pelaksanaan di lapangan (Mardiaman & Siregar, 2023). Kompleksitas tersebut menyebabkan pengelolaan waktu menjadi salah satu aspek yang sangat penting dalam manajemen proyek konstruksi. Berbagai faktor dapat menyebabkan keterlambatan proyek sehingga kinerja pelaksanaan proyek cenderung mengalami penurunan akibat keterlambatan (Roberta & Mardiaman, 2025). Ketepatan waktu penyelesaian proyek menjadi indikator utama keberhasilan pelaksanaan proyek karena

keterlambatan proyek dapat menimbulkan berbagai dampak negatif seperti peningkatan biaya proyek, penurunan produktivitas, serta potensi konflik antara pihak-pihak yang terlibat dalam proyek. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa keterlambatan proyek konstruksi masih menjadi permasalahan yang umum terjadi di banyak negara, terutama pada proyek bangunan gedung dan infrastruktur (Durdyev, 2020; Sweis et al., 2008).

Dalam praktik perencanaan proyek konstruksi, metode yang paling umum digunakan untuk menyusun jadwal proyek adalah Critical Path Method (CPM). Metode ini digunakan untuk menentukan urutan aktivitas pekerjaan serta mengidentifikasi lintasan kritis yang menentukan durasi minimum penyelesaian proyek. Aktivitas yang berada pada lintasan kritis memiliki nilai kelonggaran waktu (float) sebesar nol sehingga setiap keterlambatan pada aktivitas tersebut akan secara langsung mempengaruhi waktu penyelesaian proyek secara keseluruhan. Oleh karena itu, identifikasi lintasan kritis menjadi langkah penting dalam proses perencanaan dan pengendalian jadwal proyek konstruksi (Saputra et al., 2021; Sari et al., 2025; Utari et al., 2025).

Meskipun metode CPM telah banyak digunakan dalam perencanaan proyek konstruksi, pendekatan ini pada umumnya masih menggunakan estimasi durasi aktivitas secara deterministik. Pendekatan deterministik mengasumsikan bahwa durasi setiap aktivitas pekerjaan diketahui secara pasti dan tidak mengalami perubahan selama pelaksanaan proyek. Dalam kenyataannya, durasi aktivitas proyek konstruksi sering dipengaruhi oleh berbagai faktor ketidakpastian seperti produktivitas tenaga kerja, ketersediaan material, kondisi cuaca, serta koordinasi antar pihak proyek (Hartmann et al., 2017; Lee et al., 2009). Ketidakpastian tersebut dapat menyebabkan deviasi antara jadwal rencana dan jadwal aktual proyek sehingga meningkatkan risiko keterlambatan proyek.

Untuk mengatasi keterbatasan pendekatan deterministik tersebut, berbagai penelitian telah mengembangkan pendekatan probabilistik dalam analisis jadwal proyek konstruksi. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk menganalisis ketidakpastian durasi proyek adalah simulasi Monte Carlo. Metode ini memungkinkan pemodelan variasi durasi aktivitas menggunakan distribusi probabilitas sehingga menghasilkan estimasi durasi proyek dalam bentuk distribusi probabilitas (Xiao et al., 2018). Dengan pendekatan ini, durasi proyek tidak lagi direpresentasikan oleh satu nilai tunggal, tetapi oleh berbagai kemungkinan durasi yang dapat terjadi selama pelaksanaan proyek (Vanhoucke, 2015).

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa simulasi Monte Carlo dapat memberikan estimasi durasi proyek yang lebih realistis dibandingkan dengan pendekatan deterministik (Setiawan & Labombang, 2024). Simulasi Monte Carlo mampu memodelkan ketidakpastian durasi aktivitas proyek sehingga menghasilkan distribusi probabilitas durasi proyek yang dapat digunakan untuk mengevaluasi risiko keterlambatan proyek. Penelitian lain yang dilakukan oleh Sadeghi et al. (2010) menunjukkan bahwa pendekatan probabilistik dapat membantu manajer proyek dalam memahami tingkat risiko proyek serta menentukan strategi mitigasi yang lebih efektif.

Penelitian yang lebih baru juga menunjukkan bahwa pendekatan probabilistik dalam penjadwalan proyek dapat meningkatkan akurasi perencanaan waktu proyek dan membantu proses pengambilan keputusan dalam manajemen proyek konstruksi (Jian-wen & Xing-xia, 2009; Kim & Reinschmidt, 2009). Integrasi metode probabilistik dengan metode penjadwalan proyek juga semakin banyak digunakan untuk mendukung sistem pengendalian proyek yang lebih adaptif terhadap ketidakpastian (Setiawan & Labombang, 2024; Shinde, 2021).

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya memodelkan variasi durasi pada seluruh aktivitas proyek sehingga menghasilkan model simulasi yang kompleks. Dalam praktik manajemen proyek konstruksi, aktivitas yang memiliki pengaruh paling signifikan terhadap durasi proyek adalah aktivitas yang berada pada lintasan kritis proyek. Oleh karena itu, analisis ketidakpastian durasi aktivitas pada lintasan kritis menjadi sangat penting karena variasi durasi pada aktivitas tersebut akan secara langsung mempengaruhi waktu penyelesaian proyek secara keseluruhan (Acebes et al., 2014).

Selain itu, penerapan pendekatan probabilistik dalam analisis jadwal proyek konstruksi di Indonesia masih relatif terbatas, khususnya pada proyek pembangunan gedung pendidikan. Sebagian besar proyek konstruksi masih menggunakan pendekatan deterministik dalam penyusunan jadwal proyek tanpa mempertimbangkan variasi durasi aktivitas yang mungkin terjadi selama pelaksanaan proyek (El-dash et al., 2019).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketidakpastian durasi penyelesaian proyek konstruksi melalui integrasi metode Critical Path Method (CPM) dan simulasi Monte Carlo pada proyek pembangunan gedung ruang kelas belajar MAN 4 Kampar.

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji penerapan simulasi Monte Carlo dalam analisis jadwal proyek konstruksi, sebagian besar penelitian tersebut memodelkan variasi durasi pada seluruh aktivitas proyek sehingga menghasilkan model simulasi yang kompleks. Selain itu, penerapan pendekatan probabilistik dalam analisis jadwal proyek konstruksi di Indonesia masih relatif terbatas, khususnya pada proyek pembangunan gedung pendidikan. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pendekatan yang memfokuskan analisis simulasi Monte Carlo pada aktivitas lintasan kritis proyek yang diperoleh melalui metode Critical Path Method. Pendekatan ini memungkinkan analisis ketidakpastian durasi proyek dilakukan secara lebih terfokus pada aktivitas yang memiliki pengaruh langsung terhadap durasi penyelesaian proyek.

Kontribusi utama penelitian ini adalah mengintegrasikan metode Critical Path Method dan simulasi Monte Carlo untuk menganalisis probabilitas penyelesaian proyek konstruksi berdasarkan variasi durasi aktivitas pada lintasan kritis. Pendekatan ini tidak hanya memberikan estimasi durasi proyek secara deterministik, tetapi juga menghasilkan distribusi probabilitas durasi proyek yang dapat digunakan untuk mengevaluasi risiko keterlambatan proyek. Dengan demikian, penelitian ini memberikan pendekatan analisis yang lebih realistis dalam perencanaan dan pengendalian jadwal proyek konstruksi, khususnya pada proyek pembangunan gedung.

METODE

Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode analisis probabilistik untuk mengevaluasi ketidakpastian durasi proyek konstruksi. Pendekatan kuantitatif digunakan karena penelitian ini memanfaatkan data numerik berupa durasi aktivitas proyek, hubungan ketergantungan antar aktivitas, serta parameter distribusi probabilitas yang dianalisis menggunakan metode simulasi.

Metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah integrasi antara Critical Path Method (CPM) dan simulasi Monte Carlo. Metode CPM digunakan untuk mengidentifikasi lintasan kritis proyek yang menentukan durasi minimum penyelesaian proyek, sedangkan simulasi Monte Carlo digunakan untuk memodelkan ketidakpastian durasi aktivitas pada lintasan kritis sehingga dapat diperoleh distribusi probabilitas durasi penyelesaian proyek.

Pendekatan ini memungkinkan analisis jadwal proyek tidak hanya berdasarkan estimasi deterministik, tetapi juga mempertimbangkan variasi durasi aktivitas yang mungkin terjadi selama pelaksanaan proyek konstruksi.

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada proyek pembangunan gedung ruang kelas belajar MAN 4 Kampar. Proyek tersebut dipilih sebagai objek penelitian karena memiliki struktur pekerjaan yang kompleks serta hubungan ketergantungan aktivitas yang cukup banyak sehingga memungkinkan dilakukan analisis jaringan kerja proyek secara komprehensif.

Proses pengumpulan data penelitian dilakukan pada periode September 2025 hingga Desember 2025. Pada periode tersebut dilakukan pengumpulan dokumen proyek, identifikasi aktivitas pekerjaan, serta pengolahan data durasi aktivitas yang digunakan dalam analisis jaringan kerja proyek dan simulasi probabilistik.

Sumber dan Jenis Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data sekunder dan data primer. Data sekunder diperoleh dari dokumen perencanaan proyek yang disediakan oleh pihak kontraktor pelaksana proyek pembangunan gedung ruang kelas belajar MAN 4 Kampar. Data tersebut meliputi:

- Daftar aktivitas pekerjaan proyek
- Durasi rencana setiap aktivitas
- Hubungan ketergantungan antar aktivitas pekerjaan
- Jadwal rencana proyek

Dokumen tersebut digunakan sebagai dasar dalam penyusunan jaringan kerja proyek serta identifikasi lintasan kritis menggunakan metode Critical Path Method. Sementara itu, data primer dalam penelitian ini merupakan hasil pengolahan dan analisis data yang dilakukan oleh peneliti berdasarkan data sekunder yang diperoleh dari kontraktor. Data primer berupa hasil analisis jaringan kerja proyek, hasil identifikasi lintasan kritis, serta hasil simulasi Monte Carlo yang menghasilkan distribusi probabilitas durasi proyek.

Analisis Jaringan Kerja Proyek (*Critical Path Method*)

Tahap awal analisis penelitian adalah menyusun network planning proyek berdasarkan hubungan ketergantungan antar aktivitas pekerjaan. Penyusunan jaringan kerja proyek dilakukan menggunakan metode *Critical Path Method* (CPM).

Langkah-langkah analisis CPM dalam penelitian ini meliputi:

- Mengidentifikasi seluruh aktivitas pekerjaan proyek.
- Menentukan durasi setiap aktivitas pekerjaan.
- Menentukan hubungan ketergantungan antar aktivitas (*precedence relationship*).
- Menyusun diagram jaringan proyek (*network diagram*).
- Menghitung parameter waktu proyek yaitu Early Start (ES), Early Finish (EF), Late Start (LS), dan Late Finish (LF).
- Menghitung nilai kelonggaran waktu (*Total Float*) untuk setiap aktivitas.

Perhitungan parameter waktu dalam metode CPM dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$EF = ES + D$$

$$LS = LF - D$$

$$TF = LS - ES$$

di mana:

ES = Early Start

EF = Early Finish

LS = Late Start

LF = Late Finish

D = Durasi aktivitas

TF = Total Float

Aktivitas yang memiliki nilai Total Float sama dengan nol dikategorikan sebagai aktivitas yang berada pada lintasan kritis proyek.

Pemodelan Distribusi Durasi Aktivitas

Dalam simulasi Monte Carlo, durasi aktivitas proyek tidak diperlakukan sebagai nilai tunggal, tetapi dimodelkan sebagai variabel acak yang mengikuti distribusi probabilitas tertentu. Dalam penelitian ini digunakan distribusi triangular karena distribusi ini umum digunakan dalam analisis risiko proyek konstruksi ketika data historis terbatas.

Distribusi triangular terdiri dari tiga parameter utama yaitu:

- durasi optimis (a)
- durasi paling mungkin (m)
- durasi pesimis (b)

Distribusi ini memungkinkan pemodelan variasi durasi aktivitas proyek secara sederhana namun cukup representatif dalam menggambarkan ketidakpastian durasi pekerjaan.

Simulasi Monte Carlo

Simulasi Monte Carlo digunakan untuk menghasilkan berbagai kemungkinan durasi penyelesaian proyek berdasarkan variasi durasi aktivitas pada lintasan kritis. Prinsip dasar metode ini adalah melakukan proses pengulangan simulasi secara acak dalam jumlah besar untuk menghasilkan distribusi probabilitas dari durasi proyek.

Tahapan simulasi Monte Carlo dalam penelitian ini meliputi:

1. Menentukan aktivitas yang berada pada lintasan kritis proyek.
2. Menentukan distribusi probabilitas durasi aktivitas kritis.
3. Menghasilkan nilai acak (random number) untuk setiap aktivitas kritis.
4. Menghitung durasi proyek untuk setiap iterasi simulasi.
5. Mengulangi proses simulasi dalam jumlah iterasi tertentu hingga diperoleh distribusi durasi proyek.

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Oracle Crystal Ball yang terintegrasi dengan Microsoft Excel. Jumlah iterasi simulasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1000 iterasi untuk memperoleh distribusi probabilitas durasi proyek yang stabil.

Adapun lintasan kritis meliputi: 1) Pekerjaan Pendahuluan, 2) Pekerjaan Pondasi, 3) Pekerjaan Beton Struktur Kolom Balok, 4) Pekerjaan Pelat Lantai 1, 5) Pekerjaan Struktur kolom balok lantai 2, 6) Pekerjaan Pelat Lantai 2, 7) Pekerjaan Pasangan Atap, 8) Pekerjaan pengecatan Dinding dan 9) Pekerjaan Finishing. Setiap kegiatan bersifat tidak pasti sehingga mempunyai 3 (tiga) angka penting optimistik (a), most likely (m) dan pesimistik (b). Dalam simulasi maka setiap kegiatan yang ada pada lintasan kritis diasumsikan triangular yang nilainya secara berturut-turut (16,18,20), (19,21,23), (19, 21,23), (19,21,23), (33,35,37), (19,21,23), (33,35,37), (19,21,23), (12,14,16).

Analisis Hasil Simulasi

Hasil simulasi Monte Carlo dianalisis menggunakan pendekatan statistik probabilistik untuk mengetahui kemungkinan penyelesaian proyek pada berbagai tingkat probabilitas. Parameter analisis yang digunakan meliputi:

- distribusi probabilitas durasi proyek
- nilai minimum dan maksimum durasi proyek
- nilai persentil durasi proyek (P50, P80, dan P90)

Nilai persentil digunakan untuk menunjukkan tingkat keyakinan penyelesaian proyek pada berbagai probabilitas. Nilai P50 menunjukkan durasi proyek dengan kemungkinan penyelesaian sebesar 50%, sedangkan nilai P80 dan P90 menunjukkan durasi proyek dengan tingkat keyakinan yang lebih tinggi.

HASIL

Analisis Jaringan Kerja Proyek

Analisis jaringan kerja proyek dilakukan untuk mengetahui hubungan ketergantungan antar aktivitas pekerjaan serta untuk menentukan lintasan kritis yang mempengaruhi durasi penyelesaian proyek secara keseluruhan. Penyusunan jaringan kerja proyek dilakukan berdasarkan data aktivitas pekerjaan yang diperoleh dari dokumen perencanaan proyek pembangunan gedung ruang kelas belajar MAN 4 Kampar.

Berdasarkan hasil penyusunan jaringan kerja menggunakan metode *Critical Path Method* (CPM), diperoleh durasi rencana proyek sebesar 244 hari. Perhitungan CPM dilakukan dengan menentukan hubungan ketergantungan antar aktivitas pekerjaan serta menghitung parameter waktu proyek yang meliputi *Early Start* (ES), *Early Finish* (EF), *Late Start* (LS), *Late Finish* (LF), dan Total Float (TF).

Aktivitas yang memiliki nilai Total Float sama dengan nol dikategorikan sebagai aktivitas yang berada pada lintasan kritis proyek karena keterlambatan pada aktivitas tersebut akan secara langsung mempengaruhi durasi penyelesaian proyek secara keseluruhan. Hasil analisis jaringan kerja proyek menunjukkan bahwa proyek pembangunan gedung ruang kelas belajar MAN 4 Kampar terdiri dari beberapa kelompok pekerjaan utama yang meliputi pekerjaan pendahuluan, pekerjaan struktur, pekerjaan arsitektur, pekerjaan mekanikal dan elektrik, serta pekerjaan finishing.

Hasil identifikasi aktivitas pada lintasan kritis proyek berdasarkan analisis CPM ditunjukkan pada Tabel 1

Tabel 1. Lintasan Kritis Pembangunan Gedung Sekolah 2 Lantai MAN 4 Kampar

ID	Task Name	Durasi (hari)	Slack (hari)
1	Pekerjaan Pendahuluan	18	0
2	Pekerjaan Pondasi	21	0
3	Pekerjaan Beton Struktur Kolom Dan Balok	21	0
4	Pekerjaan Pelat Lantai 1	21	0
5	Pekerjaan Struktur Kolom Balok Lt 2	35	0
6	Pekerjaan Pelat Lantai 2	21	0
7	Pekerjaan Pasangan Atap	35	0
8	Pekerjaan Pengecatan Dinding	21	0
9	Pekerjaan Finishing	14	0
Total		207	

Sumber: olahan data, 2026

Tabel 1 menyajikan hasil identifikasi lintasan kritis proyek pembangunan gedung ruang kelas belajar MAN 4 Kampar berdasarkan analisis Critical Path Method (CPM). Lintasan kritis merupakan rangkaian aktivitas yang memiliki nilai total float sama dengan nol, sehingga setiap keterlambatan pada aktivitas tersebut akan secara langsung mempengaruhi durasi penyelesaian proyek secara keseluruhan.

Berdasarkan hasil analisis, lintasan kritis proyek terdiri dari sembilan aktivitas utama yang meliputi pekerjaan pendahuluan, pekerjaan pondasi, pekerjaan beton struktur kolom dan balok, pekerjaan pelat lantai, pekerjaan struktur kolom dan balok lantai dua, pekerjaan pelat lantai dua, pekerjaan pasangan atap, pekerjaan pengecatan dinding, serta pekerjaan finishing. Aktivitas-aktivitas tersebut tersusun secara berurutan dan saling bergantung, sehingga membentuk jalur terpanjang dalam jaringan kerja proyek.

Durasi masing-masing aktivitas pada lintasan kritis bervariasi, dengan durasi terbesar terdapat pada pekerjaan struktur kolom dan balok lantai dua serta pekerjaan pasangan atap, masing-masing sebesar 35 hari. Hal ini menunjukkan bahwa pekerjaan struktur memiliki kontribusi dominan terhadap durasi proyek dan menjadi faktor kunci dalam pengendalian waktu pelaksanaan.

Total durasi proyek yang diperoleh dari lintasan kritis adalah sebesar 207 hari. Nilai ini merepresentasikan durasi minimum penyelesaian proyek berdasarkan hubungan ketergantungan antar aktivitas. Dengan demikian, fokus pengendalian proyek sebaiknya diarahkan pada aktivitas-aktivitas dalam lintasan kritis untuk meminimalkan risiko keterlambatan.

Hasil analisis jaringan kerja proyek ini memberikan gambaran mengenai aktivitas-aktivitas yang memerlukan pengendalian yang lebih ketat selama pelaksanaan proyek. Informasi mengenai lintasan kritis proyek selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam proses analisis ketidakpastian durasi proyek menggunakan simulasi Monte Carlo.

Hasil Simulasi Monte Carlo Durasi Proyek

Setelah lintasan kritis proyek diidentifikasi menggunakan metode CPM, tahap selanjutnya adalah melakukan analisis ketidakpastian durasi proyek menggunakan simulasi Monte Carlo. Simulasi ini bertujuan untuk memodelkan variasi durasi aktivitas pada lintasan kritis sehingga dapat diperoleh distribusi probabilitas durasi penyelesaian proyek secara lebih realistis.

Dalam penelitian ini, durasi aktivitas pada lintasan kritis dimodelkan menggunakan distribusi probabilitas triangular yang terdiri dari tiga parameter yaitu durasi optimis, durasi paling mungkin, dan durasi pesimis. Parameter distribusi tersebut kemudian digunakan sebagai input dalam proses simulasi Monte Carlo menggunakan perangkat lunak Oracle Crystal Ball yang terintegrasi dengan Microsoft Excel.

Proses simulasi dilakukan sebanyak 1000 iterasi untuk menghasilkan distribusi probabilitas durasi proyek yang stabil. Struktur hubungan aktivitas yang digunakan dalam simulasi tetap mengacu pada jaringan kerja proyek yang telah diperoleh dari analisis CPM. Dengan demikian hubungan ketergantungan antar aktivitas proyek tetap dipertahankan sesuai dengan model jaringan kerja proyek sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Aktivitas yang ditandai dengan warna hijau pada Tabel 2 menunjukkan aktivitas yang berada pada lintasan kritis proyek dengan nilai slack sama dengan nol. Aktivitas tersebut memiliki pengaruh langsung terhadap durasi penyelesaian proyek sehingga menjadi fokus utama dalam proses simulasi Monte Carlo.

Tabel 2. Simulasi Lintasan Kritis Pembangunan Gedung Sekolah 2 Lantai menggunakan Monte Carlo

ID	Task Name	Durasi (hari)	Predecessors	Successors	Slack Hari
Pembangunan Gedung Ruang Kelas Belajar MAN 4 Kampar					
I	Pekerjaan Lantai I (Satu)	244 d			
1	Pekerjaan Pendahuluan	18	-	3	0
2	Pekerjaan Pondasi	21	2	4	0
3	Pekerjaan Beton Struktur Kolom Balok	21	3	5FF+21 d	0
4	Pekerjaan Dinding	18	4FF+21 d	6FF+21 d 7;9FF+21 d;10FF+21 d;11FF+21 d;12FF+21 d;13FF+21 d;14FF+21 d	56
5	Kusen Pintu dan Jendela	18	5FF+21 d	8FF+21 d;16FS+63 d	56
6	Pekerjaan Lantai	21	6		0
7	Pekerjaan Plafon	18	7FF+21 d	16	42
8	Pekerjaan Pengunci Dan Penggantung	14	6FF+21 d	27	63
9	Pekerjaan Mekanikal	18	6FF+21 d	27	70
10	Pekerjaan Elektrikal	21	6FF+21 d	27	70
11	Pekerjaan Hand Railing	14	6FF+21 d	27	42
12	Pekerjaan Pengecatan Dinding	21	6FF+21 d	27	70
13	Pekerjaan Luar Bangunan	21	6FF+21 d	27	154
II	Pekerjaan Lantai II (Dua)	238 d			
1	Pekerjaan Struktur Kolom Balok	35	7	19;17	0
2	Pekerjaan Dinding	18	16	22;23;24;21	0
3	Pekerjaan Kusen Pintu Dan Jendela	18	21	26	0
4	Pekerjaan Lantai	21	16	25;20	0
5	Pekerjaan Plafon	19	19	25;26;27	14
6	Pekerjaan Pengunci Dan Penggantung	14	17	18	0
7	Pekerjaan Mekanikal	18	17	27	35
8	Pekerjaan Elektrikal	18	17	27	35
9	Pekerjaan Hand Railing	7	17	27	49
10	Pekerjaan Pasangan Atap	35	19;6;9;8;12;20	27	0
11	Pekerjaan Pengecatan Dinding	21	6;8;9;12;18;20	27	0
12	Pekerjaan Finishing	14	25;10;11;6;26;8;9;12 ;13;14;20;22;23;24		0

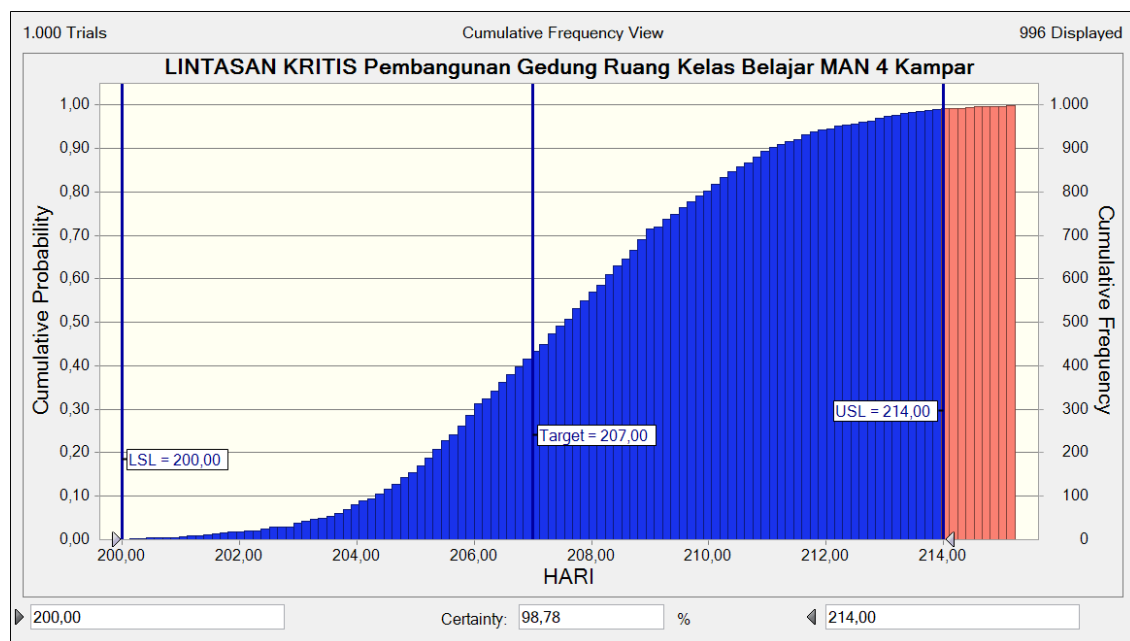
Sumber: Olahan data, 2026

Tabel 2 menyajikan struktur jaringan kerja proyek yang digunakan dalam analisis simulasi Monte Carlo berdasarkan hasil penyusunan Critical Path Method (CPM). Nilai durasi sebesar 244 hari pada pekerjaan lantai satu merupakan akumulasi total durasi seluruh aktivitas pada lantai satu yang terdiri dari 13 kegiatan, sedangkan nilai 238 hari pada pekerjaan lantai dua merupakan total durasi dari 12 kegiatan pada lantai dua. Nilai tersebut tidak merepresentasikan durasi penyelesaian proyek secara keseluruhan, melainkan durasi kumulatif masing-masing kelompok pekerjaan tanpa mempertimbangkan hubungan tumpang tindih (overlapping) antar aktivitas.

Durasi penyelesaian proyek secara keseluruhan ditentukan oleh lintasan kritis yang memiliki nilai slack sama dengan nol, yaitu sebesar 207 hari sebagaimana diperoleh dari hasil analisis CPM pada Tabel 1. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun total durasi aktivitas pada masing-masing lintasan relatif besar, hubungan ketergantungan dan pelaksanaan aktivitas secara paralel menyebabkan durasi proyek aktual menjadi lebih pendek.

Struktur jaringan kerja pada Tabel 2 tetap mempertahankan hubungan ketergantungan antar aktivitas sehingga digunakan sebagai dasar dalam simulasi Monte Carlo. Aktivitas pada lintasan kritis selanjutnya dimodelkan menggunakan distribusi probabilitas untuk menganalisis ketidakpastian durasi proyek secara lebih realistis. Hal ini mengindikasikan bahwa pendekatan penjumlahan durasi aktivitas tanpa mempertimbangkan dependensi dapat menghasilkan estimasi durasi yang overestimate dibandingkan dengan pendekatan berbasis lintasan kritis.

Hasil simulasi Monte Carlo kemudian divisualisasikan dalam bentuk kurva probabilitas kumulatif yang menggambarkan kemungkinan penyelesaian proyek pada berbagai nilai durasi proyek. Gambar 1 menunjukkan kurva distribusi probabilitas kumulatif durasi proyek yang diperoleh dari hasil simulasi Monte Carlo dengan 1000 iterasi.



Gambar 1. Distribusi probabilitas kumulatif durasi proyek hasil simulasi Monte Carlo
Sumber: Hasil olahan data, 2026

Berdasarkan kurva probabilitas kumulatif tersebut dapat diketahui bahwa durasi proyek tidak lagi direpresentasikan oleh satu nilai deterministik, melainkan membentuk distribusi probabilitas yang menggambarkan berbagai kemungkinan durasi penyelesaian proyek. Sebagian besar hasil simulasi berada pada rentang durasi proyek sekitar 205 hingga 210 hari, yang menunjukkan bahwa durasi proyek memiliki variasi akibat ketidakpastian durasi aktivitas pada lintasan kritis.

Untuk memperoleh gambaran yang lebih jelas mengenai probabilitas penyelesaian proyek, hasil simulasi Monte Carlo dianalisis menggunakan pendekatan persentil (percentile forecast). Hasil analisis persentil durasi proyek ditunjukkan pada Tabel 3.

Percentile (%)	Forecast values
0%	199,13
10%	204,25
20%	205,39
30%	206,17
40%	206,91
50%	207,58
60%	208,34
70%	209,05
80%	209,76
90%	210,76
100%	214,99

Sumber: Hasil olahan data, 2026

Berdasarkan hasil analisis tersebut diperoleh bahwa durasi proyek pada tingkat probabilitas 50% (P50) adalah sebesar 207,58 hari. Nilai ini menunjukkan bahwa terdapat kemungkinan sebesar 50% proyek dapat diselesaikan dalam waktu sekitar 207,58 hari. Selanjutnya pada tingkat probabilitas P80, durasi proyek diperoleh sebesar 209,76 hari, yang berarti terdapat tingkat keyakinan sebesar 80% bahwa proyek dapat diselesaikan dalam durasi tersebut atau lebih cepat. Sementara itu, pada tingkat probabilitas P90, durasi proyek diperoleh sebesar 210,76 hari, yang menunjukkan bahwa untuk mencapai tingkat keyakinan sebesar 90% diperlukan durasi proyek yang sedikit lebih panjang.

Selain nilai persentil tersebut, hasil simulasi juga menunjukkan bahwa durasi minimum proyek yang mungkin terjadi adalah sekitar 199,13 hari, sedangkan durasi maksimum proyek yang diperoleh dari hasil simulasi mencapai sekitar 214,99 hari. Rentang nilai ini menggambarkan tingkat variasi durasi proyek yang mungkin terjadi selama pelaksanaan proyek akibat ketidakpastian pada aktivitas lintasan kritis.

Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa pendekatan probabilistik mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kemungkinan variasi durasi proyek dibandingkan dengan pendekatan deterministik yang hanya menggunakan satu nilai estimasi durasi proyek.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode Critical Path Method (CPM) mampu mengidentifikasi aktivitas yang memiliki pengaruh langsung terhadap durasi penyelesaian proyek pembangunan gedung ruang kelas belajar MAN 4 Kampar. Aktivitas yang memiliki nilai slack sama dengan nol dikategorikan sebagai aktivitas kritis karena keterlambatan pada aktivitas tersebut akan secara langsung mempengaruhi durasi keseluruhan proyek. Temuan ini sejalan dengan konsep manajemen proyek yang menyatakan bahwa lintasan kritis merupakan rangkaian aktivitas yang menentukan waktu minimum penyelesaian proyek (Khamooshi & Golafshani, 2014).

Sebagian besar aktivitas yang berada pada lintasan kritis dalam penelitian ini merupakan pekerjaan yang berkaitan dengan tahapan struktur bangunan. Hal ini menunjukkan bahwa pekerjaan struktur memiliki pengaruh yang dominan terhadap durasi proyek konstruksi bangunan gedung. Kondisi ini juga ditemukan dalam beberapa penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa pekerjaan struktur sering menjadi faktor utama yang mempengaruhi durasi proyek konstruksi (Xie et al., 2022).

Namun demikian, metode CPM pada dasarnya masih menggunakan estimasi durasi aktivitas yang bersifat deterministik. Pendekatan ini tidak sepenuhnya mampu menggambarkan variasi durasi aktivitas yang terjadi selama pelaksanaan proyek. Oleh karena itu diperlukan pendekatan probabilistik untuk memodelkan ketidakpastian durasi aktivitas proyek (Ichsan et al., 2025).

Dalam penelitian ini, pendekatan probabilistik dilakukan menggunakan simulasi Monte Carlo untuk memodelkan variasi durasi aktivitas pada lintasan kritis proyek. Hasil simulasi menunjukkan bahwa durasi proyek memiliki rentang nilai antara 199,13 hari dan 214,99 hari dengan nilai persentil P50 sebesar 207,58 hari, P80 sebesar 209,76 hari, dan P90 sebesar 210,76 hari. Rentang nilai ini menunjukkan adanya variasi durasi proyek yang disebabkan oleh ketidakpastian durasi aktivitas pada lintasan kritis.

Temuan ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Koulinas et al., (2020) yang menunjukkan bahwa simulasi Monte Carlo dapat memberikan estimasi durasi proyek yang lebih realistis dibandingkan pendekatan deterministik. Selain itu, penelitian Jian-wen & Xing-xia (2009) juga menunjukkan bahwa analisis probabilistik dalam penjadwalan proyek dapat membantu manajer proyek dalam memahami tingkat risiko keterlambatan proyek.

Nilai persentil yang dihasilkan dari simulasi Monte Carlo memiliki peranan penting dalam proses pengambilan keputusan dalam manajemen proyek konstruksi. Nilai P50 umumnya digunakan sebagai estimasi durasi proyek yang paling mungkin terjadi, sedangkan nilai P80 dan P90 digunakan sebagai dasar dalam perencanaan jadwal proyek yang lebih konservatif dengan mempertimbangkan cadangan waktu (*schedule contingency*) (Acebes et al., 2014).

Dengan mengetahui distribusi probabilitas durasi proyek, manajer proyek dapat mengidentifikasi potensi keterlambatan proyek sejak tahap perencanaan serta menyusun strategi pengendalian proyek yang lebih efektif. Pendekatan probabilistik juga memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih rasional karena mempertimbangkan berbagai kemungkinan hasil yang dapat terjadi selama pelaksanaan proyek (Kim & Pinto, 2019).

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi metode Critical Path Method dan simulasi Monte Carlo dapat memberikan pendekatan yang lebih realistis dalam analisis risiko jadwal proyek konstruksi. Pendekatan ini tidak hanya membantu dalam memahami variasi durasi proyek yang mungkin terjadi, tetapi juga memberikan dasar yang lebih kuat bagi manajer proyek dalam merencanakan dan mengendalikan jadwal proyek konstruksi.

SIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketidakpastian durasi proyek konstruksi melalui integrasi metode Critical Path Method (CPM) dan simulasi Monte Carlo pada aktivitas lintasan kritis proyek pembangunan gedung ruang kelas belajar MAN 4 Kampar. Berdasarkan hasil analisis jaringan kerja menggunakan CPM, diperoleh beberapa

aktivitas yang berada pada lintasan kritis dan memiliki nilai kelonggaran waktu (total float) sebesar nol sehingga aktivitas tersebut memiliki pengaruh langsung terhadap durasi penyelesaian proyek.

Hasil simulasi Monte Carlo menunjukkan bahwa durasi proyek tidak hanya memiliki satu nilai deterministik, tetapi membentuk distribusi probabilitas yang menggambarkan berbagai kemungkinan durasi penyelesaian proyek. Durasi proyek yang semula direncanakan sebesar 244 hari memiliki variasi hasil simulasi dengan durasi minimum sekitar 199,13 hari dan durasi maksimum sekitar 214,99 hari. Nilai durasi yang paling mungkin terjadi berada pada sekitar 207,58 hari (P50). Hasil ini menunjukkan bahwa estimasi durasi proyek berdasarkan pendekatan deterministik memiliki tingkat ketidakpastian yang cukup tinggi.

Analisis probabilitas penyelesaian proyek menunjukkan bahwa durasi proyek pada tingkat probabilitas P50 sebesar 207,58 hari, sedangkan untuk tingkat keyakinan yang lebih tinggi diperoleh P80 sebesar 209,76 hari dan P90 sebesar 210,76 hari. Hal ini menunjukkan bahwa estimasi durasi proyek yang lebih konservatif diperlukan untuk meningkatkan tingkat keberhasilan penyelesaian proyek sesuai jadwal.

Berdasarkan hasil penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa integrasi metode CPM dan simulasi Monte Carlo mampu memberikan pendekatan yang lebih realistis dalam menganalisis ketidakpastian durasi proyek konstruksi. Pendekatan probabilistik ini dapat membantu manajer proyek dalam memahami tingkat risiko keterlambatan proyek serta dalam menentukan strategi pengendalian jadwal yang lebih efektif.

Berdasarkan hasil penelitian, pendekatan probabilistik melalui integrasi CPM dan simulasi Monte Carlo dapat diterapkan dengan menjadikan nilai persentil sebagai dasar penjadwalan proyek. Nilai P50 dapat digunakan sebagai baseline schedule, sedangkan P80 atau P90 digunakan sebagai acuan jadwal yang lebih konservatif dalam kontrak. Pengendalian proyek sebaiknya difokuskan pada aktivitas lintasan kritis dengan melakukan monitoring intensif, penyesuaian sumber daya, serta penyediaan buffer waktu berdasarkan selisih antara durasi deterministik dan probabilistik. Pendekatan ini juga dapat digunakan sejak tahap perencanaan untuk meningkatkan akurasi jadwal dan mengantisipasi risiko keterlambatan proyek.

DAFTAR PUSTAKA

- Acebes, F., Pajares, J., Manuel, J., & López-paredes, A. (2014). A new approach for project control under uncertainty Going back to the basics. *International Journal of Project Management*, 32(1), 423–434. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.08.003>
- Durdyev, S. (2020). Review of construction journals on causes of project cost overruns. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2(2017), 1–10. <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2020-0137>
- El-dash, K. M. M., Ramadan, O. M. O., & Youssef, W. M. M. A. (2019). Duration Prediction Models for Construction Projects in Middle East. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9(2), 3924–3932.
- Hartmann, V., Lahmer, T., & Smarsly, K. (2017). Project scheduling under uncertainty and resource constraints. *Proc. Appl. Math. Mech.*, 840, 839–840. <https://doi.org/10.1002/pamm.201710387>
- Ichsan, M., Isvara, W., & Karim, S. (2025). Monte Carlo Simulation for Enhancing the Schedule Completion Forecast of Jakarta Central Railway Station Construction Project. *Applied Science*, 15(13), 1–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app15137464>
- Jian-wen, H., & Xing-xia, W. (2009). Risk Analysis of Construction Schedule Based on PERT and MC Simulation. *International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, 1(2), 150–153. <https://doi.org/10.1109/ICIMI.2009.195>
- Khamooshi, H., & Golafshani, H. (2014). EDM: Earned Duration Management, a new approach to schedule performance management and measurement. *International Journal of Project Management*, 32(6), 1019–1041. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.11.002>
- Kim, B., & Pinto, J. K. (2019). What CPI = 0.85 Really Means: A Probabilistic Extension of the Estimate at Completion. *Journal of Management in Engineering*, 35(2), 1–30. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000671](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000671)
- Kim, B., & Reinschmidt, K. F. (2009). Probabilistic Forecasting of Project Duration Using Bayesian Inference and the Beta Distribution. *Journal Of Construction Engineering And Management*, 1(March), 178–186.
- Koulinas, G. K., Xanthopoulos, A. S., Tsilipiras, T. T., & Koulouriotis, D. E. (2020). Schedule Delay Risk Analysis in Construction Projects with a Simulation-Based Expert System. *Buildings*, 10(134), 1–19. <https://doi.org/doi:10.3390/buildings10080134>
- Lee, H., Shin, J., Park, M., & Ryu, H. (2009). Probabilistic Duration Estimation Model for High-Rise Structural Work. *Journal Of Construction Engineering And Management*, 2(December), 1289–1298. <https://doi.org/10.1061/ASCE/CO.1943-7862.0000105>
- Mardiaman, & Siregar, J. (2023). Analisis Deviasi Kemajuan Pekerjaan Berdasarkan Persentase Durasi Waktu Pada Pekerjaan Konstruksi Bangunan. *Menara : Jurnal Teknik Sipil*, 18(152), 59–65.
- Roberta, I., & Mardiaman. (2025). Evaluasi Perbandingan Kinerja Proyek Konstruksi Pabrik Kelapa Sawit

- Menggunakan Metode Earned Value : Studi Kasus Dua Proyek Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil Dan Perencanaan (JARSP)*, 8(3), 242–249. <https://doi.org/https://doi.org/10.24815/jarsp.v8i3.46033>
- Sadeghi, N., Fayek, A. R., & Pedrycz, W. (2010). Fuzzy Monte Carlo Simulation and Risk Assessment in Construction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 25(4), 238–252. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2009.00632.x>
- Saputra, N., Handayani, E., & Dwiretnani, A. (2021). Analisa Penjadwalan Proyek dengan Metode Critical Path Method (CPM) Studi Kasus Pembangunan Gedung Rawat Inap RSUD Abdul Manap Kota Jambi. *Jurnal Talenta Sipil*, 4(1), 44. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v4i1.48>
- Sari, D. M., Agustappraja, H. R., Arif, S., & Hepiyanto, R. (2025). Biaya dan Waktu Proyek Gedung Satnarkoba dengan Metode CPM dan Metode PERT. *Jurnal Talenta Sipil Vol*, 8(2), 900–906. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v8i2.969>
- Setiawan, A., & Labombang, M. (2024). Scheduling The Construction of Low-Income Community Houses in Palu City Using the Probabilistic Duration Method Scheduling The Construction of Low-Income Community Houses in Palu City Using the Probabilistic Duration Method. *IICSSD-2023*, 1–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1355/1/012013>
- Shinde, R. (2021). Probabilistic Integration of Cost and Schedule Risk Management in Construction Engineering : A Monte Carlo Framework for Enhanced Owner Decision-Making. *Journal of Informatics Education and Research*, 1(3), 67–72.
- Sweis, G., Sweis, R., Abu Hammad, A., & Shboul, A. (2008). Delays in construction projects: The case of Jordan. *International Journal of Project Management*, 26(6), 665–674. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.09.009>
- Utari, R. P., Wahyudiono, S., Amal, A. S., & Ardian, L. (2025). G-Tech : Jurnal Teknologi Terapan Cost and Time Control Using The Earned Value Concept (EVM) Method : *G-Tech : Jurnal Teknologi Terapan*, 9(4), 2229–2239.
- Vanhoucke, M. (2015). On The Use Of Schedule Risk Analysis For Project Management. *The Journal Of Modern Project Management*, 1(April), 109–117.
- Xiao, X., Wang, F., Li, H., & Skitmore, M. (2018). Modelling The Stochastic Dependence Underlying Construction Cost And Duration. *Journal of Civil Engineering and Management*, 24(6), 444–456.
- Xie, W., Deng, B.-C., Yin, Y., Lv, X., & Deng, Z. (2022). Critical Factors Influencing Cost Overrun in Construction Projects: A Fuzzy Synthetic Evaluation. *Buildings*, 12(11), 2028. <https://doi.org/10.3390/buildings12112028>