

Penjadwalan Berbasis Risiko dengan *Program Evaluation and Review Technique* untuk Mendukung Implementasi BIM 4D pada Proyek Jembatan

Imelda Febrianti^a, Lila Ayu R. Winanda^{a*}, Nenny Roostianawaty^a, Deviany Kartika^a dan Krisna F. Anugerahputra^a

^aProgram Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Malang, Malang, Indonesia 65145

* Corresponding author's e-mail: lilawinanda@lecturer.itn.ac.id

Received: 6 January 2026; revised: 8 January 2026; accepted: 11 January 2026

Abstract: The construction industry plays strategic role in national infrastructure development, particularly in bridge projects that are characterized by high complexity and significant implementation uncertainty. Bridges function not only as physical connections between regions but also as critical infrastructure supporting public mobility and economic growth. Therefore, accurate scheduling methods that are capable of accommodating the risk of time delays are required. This study to analyze the total project duration of bridge project risk-based approach through the integration of three-dimensional *Building Information Modeling* (BIM 3D) and the *Program Evaluation and Review Technique* (PERT). The analysis begins with the development of three-dimensional bridge structural model using Tekla Structures to generate *bill of quantity* that includes structural material volumes. These quantity data basis for probabilistic duration estimation using PERT method through expert judgment, which involves optimistic time, most likely time, and pessimistic time. The BIM 3D modeling results indicate total reinforcement steel volume of 24,343.4 kg and concrete volume of 274.1 m³. Furthermore, risk-based scheduling using the PERT method analyzed with the *Precedence Diagram Method* (PDM) produces total project duration of 190 days with completion probability of 50%. This result indicates potential risk of delay that should carefully project time control.

Keywords: BIM 3D, bridge construction, PERT, project duration, risk-based scheduling

Abstrak: Industri konstruksi memiliki peran strategis dalam pembangunan infrastruktur nasional, khususnya pada proyek jembatan yang memiliki tingkat kompleksitas tinggi dan ketidakpastian pelaksanaan yang signifikan. Jembatan berfungsi tidak hanya sebagai prasarana penghubung antarwilayah, tetapi juga sebagai elemen penting dalam mendukung mobilitas masyarakat dan pertumbuhan ekonomi. Oleh karena itu, diperlukan metode penjadwalan yang akurat dan mampu mengakomodasi risiko keterlambatan waktu pelaksanaan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis estimasi total durasi proyek jembatan berbasis risiko melalui integrasi *Building Information Modeling* (BIM) 3D dan metode *Program Evaluation and Review Technique* (PERT). Analisis diawali dengan pemodelan tiga dimensi struktur jembatan menggunakan perangkat lunak Tekla Structures untuk menghasilkan *bill of quantity* berupa volume material struktur. Data tersebut digunakan sebagai dasar perhitungan durasi pekerjaan secara probabilistik dengan metode PERT melalui penilaian *expert judgment*, yang mencakup waktu optimis, waktu paling mungkin, dan waktu pesimis. Hasil pemodelan BIM 3D menunjukkan volume tulangan baja sebesar 24.343,4 kg dan volume beton sebesar 274,1 m³. Selanjutnya, analisis penjadwalan berbasis PERT dengan *Precedence Diagram Method* (PDM) menghasilkan durasi proyek selama 190 hari dengan probabilitas penyelesaian sebesar 50%. Hasil ini menunjukkan adanya potensi risiko keterlambatan yang perlu diperhatikan dalam pengendalian proyek.

Kata kunci: BIM 3D, Proyek Jembatan, PERT, durasi proyek, penjadwalan berbasis risiko

1. Pendahuluan

Pada masa sekarang, industri konstruksi merupakan salah satu sektor strategis yang berperan penting dalam mendukung pertumbuhan perekonomian nasional. Selain itu, industri konstruksi juga berperan dalam meningkatkan kualitas lingkungan binaan melalui penerapan teknologi, metode kerja, dan standar keselamatan yang semakin berkembang. Perkembangan sektor ini berkontribusi langsung terhadap penyediaan infrastruktur, peningkatan kualitas lingkungan binaan, serta penciptaan lapangan kerja, sehingga keberhasilan pelaksanaan proyek konstruksi menjadi faktor penting dalam menunjang pembangunan berkelanjutan.

Keberadaan jembatan tidak hanya berfungsi sebagai prasarana fisik, tetapi juga sebagai penghubung utama dalam mendukung kelancaran distribusi barang dan jasa, mobilitas penduduk, serta akses terhadap pusat-pusat

kegiatan ekonomi, pendidikan, dan pelayanan publik. Jembatan yang andal dan berfungsi dengan baik berkontribusi langsung terhadap peningkatan konektivitas antarwilayah, pengurangan waktu tempuh, serta efisiensi biaya transportasi, yang pada akhirnya mendorong pertumbuhan ekonomi regional dan pemerataan pembangunan [1]. Oleh karena itu, pembangunan jembatan memerlukan perencanaan dan pengelolaan proyek yang matang, mulai dari tahap perencanaan teknis, pengendalian waktu dan biaya, hingga pengelolaan risiko konstruksi, agar infrastruktur yang dihasilkan mampu memenuhi aspek keselamatan, keberlanjutan, dan kinerja layanan jangka panjang.

Dalam pelaksanaan proyek jembatan, pengendalian biaya dan waktu menjadi aspek krusial karena kesalahan dalam perencanaan dapat menyebabkan keterlambatan penyelesaian proyek dan pembengkakan biaya [2]. Kondisi tersebut tidak hanya berdampak pada kerugian finansial,

tetapi juga dapat mengganggu fungsi layanan infrastruktur, sehingga diperlukan analisis yang cermat dalam perencanaan waktu dan biaya proyek. Oleh karena itu, diperlukan analisis perencanaan waktu dan biaya yang cermat, sistematis, dan berbasis data agar setiap aktivitas pekerjaan dapat dikendalikan secara optimal, risiko keterlambatan dapat diminimalkan, serta target kinerja proyek dapat tercapai sesuai dengan rencana yang telah ditetapkan.

Secara umum, penjadwalan proyek konstruksi masih banyak menggunakan pendekatan linier seperti *bar chart* serta metode deterministik, antara lain *Critical Path Method* (CPM) dan *Precedence Diagram Method* (PDM) [3]. Metode-metode tersebut mampu menggambarkan urutan pekerjaan dan hubungan antaraktivitas, namun belum sepenuhnya mempertimbangkan ketidakpastian durasi yang sering terjadi pada proyek konstruksi [4]. Faktor-faktor seperti cuaca, ketersediaan material, produktivitas tenaga kerja, kondisi alat, serta perubahan metode pelaksanaan sering kali menyebabkan deviasi durasi dari rencana awal. Akibatnya, penggunaan metode penjadwalan konvensional tanpa mempertimbangkan ketidakpastian waktu berpotensi menghasilkan estimasi durasi yang kurang realistis dan meningkatkan risiko keterlambatan proyek [5].

Sebagai alternatif, *Program Evaluation and Review Technique* (PERT) dikembangkan sebagai metode penjadwalan berbasis risiko yang mengakomodasi ketidakpastian durasi pekerjaan melalui pendekatan probabilistik [6]. Metode PERT menggunakan tiga estimasi waktu, yaitu optimis, paling mungkin, dan pesimis, sehingga mampu memberikan gambaran peluang penyelesaian proyek secara lebih realistis [7]. Selain itu, PERT mampu memberikan informasi mengenai peluang penyelesaian proyek dalam rentang waktu tertentu, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat dalam perencanaan, pengendalian, dan mitigasi risiko waktu pada proyek konstruksi yang kompleks seperti pembangunan jembatan.

Di sisi lain, penerapan *Building Information Modeling* (BIM) terus berkembang sebagai bagian dari transformasi digital dalam industri konstruksi yang menekankan integrasi data, kolaborasi, dan efisiensi proses proyek [8]. BIM memungkinkan integrasi informasi desain, volume pekerjaan, jadwal, dan biaya dalam satu model terkoordinasi, sehingga meningkatkan akurasi perencanaan dan efisiensi pengelolaan proyek. Selain itu, BIM mendukung proses visualisasi yang lebih komprehensif, deteksi konflik (*clash detection*), serta pengambilan keputusan yang lebih cepat dan berbasis data [9]. Dengan kemampuan tersebut, BIM tidak hanya berperan sebagai alat pemodelan, tetapi juga sebagai pendekatan manajemen proyek yang mampu meningkatkan efisiensi, transparansi, dan kinerja proyek konstruksi secara keseluruhan [10].

Pada proyek jembatan yang memiliki tingkat kompleksitas tinggi, diperlukan analisis penjadwalan yang tidak hanya cepat dan akurat, tetapi juga mampu mempertimbangkan risiko ketidakpastian waktu. Kompleksitas pekerjaan jembatan, mulai dari struktur bawah hingga struktur atas, serta keterlibatan berbagai sumber daya dan kondisi lapangan yang dinamis, menuntut

metode penjadwalan yang adaptif terhadap potensi deviasi waktu. Hal ini mendorong munculnya berbagai penelitian yang mengintegrasikan BIM dengan metode PERT, meskipun kajian mengenai integrasi tersebut, khususnya pada proyek jembatan, masih relatif terbatas [11]. Keterbatasan tersebut menunjukkan adanya peluang penelitian untuk mengembangkan pendekatan penjadwalan yang lebih komprehensif, realistis, dan aplikatif pada proyek konstruksi jembatan.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengintegrasikan analisis penjadwalan berbasis risiko menggunakan metode *Program Evaluation and Review Technique* (PERT) berbasis pemodelan berbasis *Building Information Modeling* (BIM) 3D guna mendukung penerapan BIM 4D dengan dimensi waktu yang lebih efektif dan efisien karena mempertimbangkan unsur risiko dalam analisisnya. Penelitian menunjukkan bahwa integrasi antara BIM 3D dengan PERT dapat mengakomodasi ketidakpastian waktu pelaksanaan. Hasil yang sama juga ditunjukkan pada hasil penelitian [12]. Pendekatan perencanaan dan pengendalian waktu berbasis risiko lebih efektif, realistis, dan aplikatif [13]. Masih minimnya hasil-hasil penelitian terkait integrasi kedua metode ini dalam perencanaan dan pengendalian proyek, menunjukkan masih pentingnya penelitian ini untuk dilaksanakan, sehingga akan memberikan khasanah keilmuan yang lebih lengkap guna mendukung transformasi digitalisasi pada industri konstruksi di Indonesia.

2. Metode Penelitian

2.1. Objek dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada tahap perencanaan proyek pembangunan Jembatan yang berlokasi di wilayah penghubung Kabupaten Bondowoso dan Situbondo, Jawa Timur. Objek penelitian adalah penerapan integrasi *Building Information Modeling* BIM dengan metode *Program Evaluation and Review Technique* (PERT) dalam menganalisis durasi pekerjaan konstruksi. Pemilihan proyek ini didasarkan pada kebutuhan akurasi perencanaan waktu dan kompleksitas pekerjaan struktur yang sesuai untuk dianalisis dengan pendekatan penjadwalan berbasis risiko.

2.2. Pemodelan BIM dan Rekapitulasi Volume

Data penelitian yang diperlukan untuk pemodelan 3D (BIM 3D) adalah gambar detail sistem struktur jembatan yang berisikan komponen geometrik dari bentuk, ukuran, lokasi dan spesifikasi teknis. Model tiga dimensi (3D modeling) menggunakan alat bantu perangkat lunak *Tekla Structures* untuk menghasilkan *Bill of Quantity* (BOQ) yaitu berupa volume masing-masing komponen yang akan digunakan sebagai dasar analisis penjadwalan dengan menggunakan pendekatan produktivitas tenaga kerja dan acuan metode pelaksanaan konstruksi, sehingga diperoleh estimasi durasi secara deterministik (satu durasi waktu proyek) untuk setiap jenis pekerjaan tanpa mempertimbangkan ketidakpastian waktu.

2.3. Penentuan Parameter a , m , b dan Analisis Durasi Menggunakan Metode PERT

Durasi awal yang telah diperoleh dari hasil perhitungan berbasis volume dari BIM 3D kemudian divalidasi melalui wawancara dengan pelaksana dan pengawas lapangan untuk mendapatkan pertimbangan tiga parameter waktu sesuai ketentuan metode *Program Evaluation and Review Technique* (PERT). Pada tahap ini, estimasi durasi pekerjaan dihitung berdasarkan tiga skenario : optimis (a), paling mungkin (m), dan pesimistik (b). Tiga nilai parameter a , m , b digunakan untuk memperoleh waktu yang diharapkan, standar deviasi, dan varians. Analisis untuk menghitung waktu perkiraan (TE) disajikan dalam formulasi sebagai berikut:

$$te = \frac{(a + 4m + b)}{6} \quad (1)$$

dengan:

te = *expected duration* (hari)

a = waktu optimis (hari)

m = waktu realistis (hari)

b = waktu pesimis (hari)

Setelah tiga angka estimasi tersebut diperoleh, maka langkah selanjutnya adalah merumuskan hubungan ketiga angka tersebut menjadi satu angka yang disebut dengan waktu yang diharapkan *expected duration time* (Rozy & W.g.r, n.d.). Sesuai tiga parameter waktu ini juga, dapat dianalisis nilai standar deviasi (s) dan nilai varians (v) sebagaimana formulasi berikut ini:

$$S = \left(\frac{1}{6}\right)(b - a) \quad (2)$$

dengan:

s = Standar Deviasi

a = Waktu Optimis

b = Waktu Pesimis

$$V_{(te)} = S^2 = \left[\left(\frac{1}{6}\right)(b - a)\right]^2 \quad (3)$$

dengan:

V = Nilai Varians

s = Standar Deviasi

a = Waktu Optimis

b = Waktu Pesimis

2.4. Penyusunan Penjadwalan dengan Metode Precedence Diagram Method (PDM)

Setelah nilai *expected duration time* (te) diperoleh, maka tahap berikutnya adalah penyusunan jadwal proyek menggunakan pendekatan *Precedence Diagram Method* (PDM) dengan menggunakan alat bantu penjadwalan *Microsoft Project*. Penyusunan jaringan kerja dilakukan dengan menentukan hubungan ketergantungan antar aktivitas sesuai dengan metode konstruksi dan tahapan pelaksanaan jembatan di lapangan. Hubungan ketergantungan yang digunakan terdiri atas: *Finish to Start* (FS), *Start to Start* (SS), *Finish to Finish* (FF), dan *Start to Finish* (SF) sesuai masing-masing aktivitas. Penyusunan jaringan kerja bertujuan untuk menampilkan struktur logis alur pekerjaan dengan lebih jelas, sehingga aktivitas kritis

dan non-kritis dapat diidentifikasi secara tepat melalui pembentukan *network diagram* dari seluruh rangkaian aktivitas proyek.

2.5. Evaluasi Lintasan Kritis dan Probabilitas Penyelesaian Proyek

Evaluasi lintasan kritis dilakukan untuk menentukan urutan aktivitas yang memiliki pengaruh langsung terhadap durasi total proyek. Analisis ini menggunakan hasil penyusunan jaringan kerja berbasis *Precedence Diagram Method* (PDM) sehingga aktivitas-aktivitas yang berada pada jalur kritis dapat diidentifikasi dari keterhubungan aktivitas tanpa adanya kelonggaran waktu (*float*). Aktivitas pada lintasan kritis menjadi fokus utama dalam pengendalian jadwal, karena keterlambatan pada salah satu aktivitas tersebut akan menyebabkan keterlambatan pada keseluruhan proyek.

Selanjutnya dilakukan analisis probabilitas penyelesaian proyek dengan memanfaatkan hasil perhitungan durasi ekspektasi dan standar deviasi dari metode *Program Evaluation and Review Technique* (PERT). Probabilitas diperoleh dengan menghitung nilai Z melalui pendekatan distribusi normal menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Z = \frac{T(d) - TE}{S} \quad (4)$$

dengan:

Z = Probabilitas

Td = Target Durasi

Te = Target Ekspektasi

s = Standart Deviasi

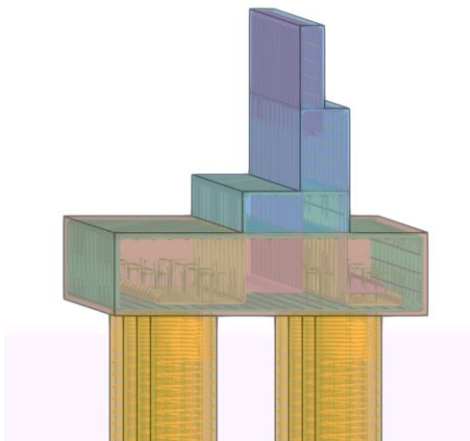
Evaluasi ini menjadi dasar pengambilan keputusan dalam perencanaan percepatan, pengaturan ulang prioritas pekerjaan, serta strategi mitigasi risiko waktu sehingga penjadwalan yang dihasilkan memiliki tingkat reliabilitas yang lebih tinggi dibandingkan pendekatan deterministik konvensional.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pemodelan 3D sebagai Implementasi BIM 3D

Pemodelan 3D untuk proyek Jembatan Besuk dilakukan menggunakan aplikasi *Tekla Structures*, dengan fokus pada pemodelan elemen struktur seperti girder, slab, tulangan, dan komponen pendukung lainnya. *Tekla Structures* memungkinkan visualisasi detail yang presisi sehingga setiap bagian struktur dapat dianalisis dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Hasil pemodelan 3D ini menjadi dasar utama dalam proses analisis penjadwalan proyek. Contoh hasil pemodelan secara detail dengan alat bantu *Tekla Structure* pada *abutment* dan pemodelan seluruh struktur jembatan seperti pada (Gambar 1 dan Gambar 2).

Hasil pemodelan struktur Jembatan Besuk menggunakan perangkat lunak *Tekla Structures* menghasilkan data *quantity take-off* (QTO) berupa volume beton dan berat tulangan untuk setiap elemen struktur. Data kuantitas tersebut tidak ditampilkan secara rinci per elemen pemodelan, melainkan direkapitulasi dalam bentuk tabel rekap volume sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

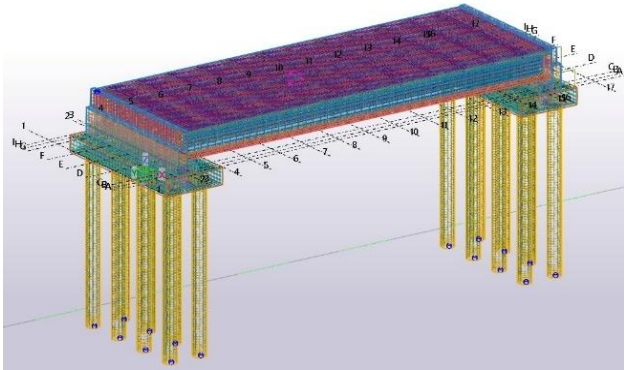


Gambar 1. Hasil detail pemodelan komponen struktur abutment

Rekapitulasi hasil *running* volume pekerjaan ini bertujuan untuk menyederhanakan penyajian hasil pemodelan sekaligus memfokuskan analisis pada pemanfaatan data volume sebagai dasar perhitungan selanjutnya.

Tabel 1. Rekapitulasi hasil volume

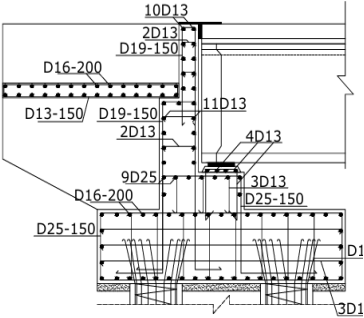
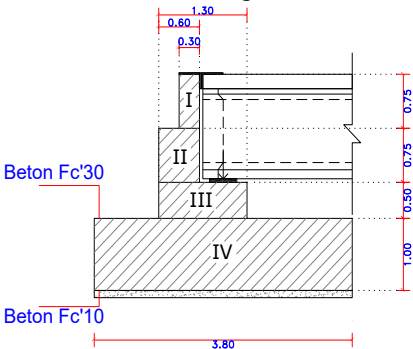
Nama	Total Volume
Tulangan Baja	24343.4 kg
Beton	274.1 m ³



Gambar 2. Hasil pemodelan struktur jembatan

Selanjutnya, volume pekerjaan hasil pemodelan BIM digunakan sebagai input dalam penentuan estimasi durasi awal setiap aktivitas konstruksi. Estimasi durasi dihitung dengan mengaitkan volume pekerjaan terhadap produktivitas pelaksanaan yang umum diterapkan di lapangan. Dengan pendekatan ini, volume beton dan berat tulangan yang diperoleh dari BIM 3D dapat dikonversi menjadi durasi deterministik awal, yang mencerminkan waktu penyelesaian pekerjaan dalam kondisi normal. Estimasi durasi awal tersebut kemudian digunakan sebagai acuan dalam penyusunan kuesioner dan divalidasi oleh responden ahli untuk menentukan nilai waktu optimis (a), paling mungkin (m), dan pesimis (b) dengan salah satu contoh hasil pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pertimbangan durasi secara probabilistik dari penilaian *expert*

Uraian Pekerjaan	Volume Pek.	Sat	Durasi Awal	(a) Durasi Optimis	(b) Durasi Pesimis	(m) Durasi Paling Mungkin
DIVISI VI. STRUKTUR - Struktur Atas						
Baja Tulangan Sirip BjTS 420A						
	7568	kg	60	30	57	43
Beton struktur, fc'30 Mpa						
	179,2	m3	5	9	18	13

3.2. Analisis Penjadwalan Berbasis Program Evaluation and Review Technique (PERT)

Setelah diperoleh estimasi awal durasi pekerjaan berdasarkan perhitungan volume dan produktivitas tenaga kerja, tahap selanjutnya adalah penyusunan kuesioner sebagai instrumen pengumpulan data primer yang ditujukan kepada responden dengan kompetensi, pengalaman, serta keterlibatan langsung dalam pelaksanaan proyek konstruksi. Kuesioner memuat daftar aktivitas pekerjaan pada jadwal proyek, di mana setiap responden diminta memberikan tiga estimasi durasi untuk setiap aktivitas, yaitu durasi optimis (a), durasi paling mungkin (*most likely*) (m), dan durasi pesimis (b). Durasi optimis merepresentasikan waktu tercepat apabila pekerjaan berlangsung tanpa hambatan, durasi paling mungkin menggambarkan kondisi normal yang umum terjadi, sedangkan durasi pesimis menunjukkan waktu terlama yang mungkin terjadi akibat berbagai kendala, sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Nilai rata-rata a, m, dan b tersebut digunakan sebagai dasar perhitungan metode PERT untuk menentukan durasi harapan (*expected time*) sebagaimana dicontohkan pada pekerjaan beton struktur $f_c' 30$ Mpa (Tabel 3) sebagai berikut:

$$te = \frac{(a + 4m + b)}{6} = \frac{(5 + 4 \cdot 13 + 18)}{6} = 4.5 \text{ hari}$$

hasil diakumulasikan pada kebutuhan secara keseluruhan pada komponen struktur yang sejenis, sehingga untuk pekerjaan beton struktur $f_c' 30$ Mpa diperoleh total durasi harapan (te) = 18 hari. Demikian selanjutnya dianalisis yang sama untuk keseluruhan aktivitas proyek jembatan. Seluruh hasil perhitungan durasi untuk setiap aktivitas kemudian dirangkum dan disajikan dalam Tabel 3, yang berfungsi sebagai acuan dalam evaluasi durasi pelaksanaan serta sebagai input utama dalam penyusunan diagram jaringan kerja dan analisis penjadwalan proyek.

Tabel 3. Perhitungan waktu yang diharapkan (te)

No.	Uraian Pekerjaan	Waktu Optimum (a)	Waktu Paling Mungkin (m)	Waktu Pesimis (b)	Waktu di Harapkan (te)
I Divisi I. Umum					
1	Mobilasi	4	4	7	5
2	Papan Nama Jembatan	3	3	5	4
3	Pengamanan Lingkungan Hidup	4	5	7	6
4	Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi (SMKK)	8	10	16	11
5	Pengujian Tanah	7	9	13	10
II Divisi II. Struktur - Pembongkaran Struktur Lama					
1	Pembongkaran Pasangan Batu	10	19	31	20
2	Pembongkaran Beton	4	5	8	6
3	Pembongkaran Balok Baja (Steel Stingers)	7	12	22	13
III Divisi III. Pekerjaan Tanah - Persiapan Lokasi					
1	Galian Biasa	15	25	38	26
2	Galian Struktur dengan kedalaman 0 - 2 meter	2	5	10	6
3	Timbunan pilihan dari sumber galian	5	6	13	7
4	Penyiapan badan jalan	1	2	4	3
5	Pemotongan pohon pilihan diameter > 30 - 50 cm	1	1	2	2
6	Pemotongan pohon pilihan diameter > 50 - 75 cm	1	1	2	2
7	Pemotongan pohon pilihan diameter > 75 cm	2	2	5	3
IV Divisi IV. Drainase - Drainase Pengamana Area					
1	Galian untuk Selokan Drainase dan Saluran Air	7	10	13	10
	Pasangan Batu Kali dengan Mortar	14	25	32	25

Lanjutan Tabel 3

No.	Uraian Pekerjaan	Waktu Optimum (a)	Waktu Paling Mungkin (m)	Waktu Pesimis (b)	Waktu di Harapkan (te)
V	Divisi V. Struktur - Pondasi dan Struktur Bawah				
11	Fondasi Cerucuk, Penyediaan dan Pemasangan	5	10	15	10
12	Tiang Bor Beton, diameter 800 mm	10	15	21	16
13	Pengujian Keutuhan Tiang dengan Pile Integrated Test (PIT)	1	1	3	2
14	Pasangan Batu	30	45	54	44
15	Bronjong dengan kawat yang dilapisi PVC	20	26	31	26
VI	Divisi VI. Struktur - Struktur Atas				
1	Baja Tulangan Polos-BjTP 280	10	17	22	17
2	Baja Tulangan Sirip BjTS 420A	30	70	88	67
3	Beton struktur, fc'30 Mpa	14	17	24	18
4	Beton struktur, fc'20 Mpa	14	17	24	18
5	Beton, fc'10 Mpa	1	3	4	3
6	Penyediaan Unit Pracetak Gelagar Tipe I Bentang 24,6 meter	3	4	7	5
7	Pemasangan Unit Pracetak Gelagar Tipe I Bentang 24,6 meter	7	10	13	10
8	Beton Pratekan untuk Diafragma fc' 45 MPa termasuk Pekerjaan pasca-tarik (post-tension)	5	8	11	8
9	Penyediaan Panel Full Depth slab	5	6	8	7
10	Pemasangan Panel Full Depth slab	5	8	11	8
11	Sambungan Siar Muai Tipe Asphaltic Plug, Fixed	3	4	6	5
12	Landasan Elastomerik Karet Alam Berlapis Baja Ukuran 450 Mm x 450 Mm x 45 Mm	3	6	9	6
13	Sandaran (Railing)	7	12	16	12
14	Pipa Penyalur PVC	3	6	10	7

Analisis penjadwalan berbasis PERT dilanjutkan dengan perhitungan standar deviasi dan varian pekerjaan. Standar deviasi digunakan untuk mengukur besar penyimpangan atau ketidakpastian dari estimasi waktu yang diberikan akan mempengaruhi penyelesaian akhir pekerjaan. Hasil analisis nilai standar deviasi dan varians dari seluruh aktivitas proyek tercantum pada Tabel 4.

Salah satu contoh perhitungan nilai standar deviasi dan varian pada pekerjaan mobilisasi adalah sebagai berikut:

$$s = \frac{(b-a)}{6} = \frac{(7-4)}{6} = 0.5 \text{ hari}$$

$$v = s^2 = (0.5)^2 = 0.25$$

Tabel 4. Perhitungan standar deviasi dan varian kegiatan

No.	Uraian Pekerjaan	Standar Deviasi (s)	Varian (v)
I	Divisi I. Umum		
1	Mobilasi	0.50	0.25
2	Papan Nama Jembatan	0.33	0.11
3	Pengamanan Lingkungan Hidup	0.50	0.25
4	Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi (SMKK)	1.33	1.78
5	Pengujian Tanah	1.00	1.00

Lanjutan **Tabel 4**

No.	Uraian Pekerjaan	Standar Deviasi (s)	Varian (v)
II	Divisi II. Struktur - Pembongkaran Struktur Lama		
1	Pembongkaran Pasangan Batu	3.50	12.25
2	Pembongkaran Beton	0.67	0.44
3	Pembongkaran Balok Baja (Steel Stingers)	2.50	6.25
III	Divisi III. Pekerjaan Tanah - Persiapan Lokasi		
1	Galian Biasa	3.83	14.69
2	Galian Struktur dengan kedalaman 0 - 2 meter	1.33	1.78
3	Timbunan pilihan dari sumber galian	1.33	1.78
4	Penyiapan badan jalan	0.50	0.25
5	Pemotongan pohon pilihan diameter > 30 - 50 cm	0.17	0.03
6	Pemotongan pohon pilihan diameter > 50 - 75 cm	0.17	0.03
7	Pemotongan pohon pilihan diameter > 75 cm	0.50	0.25
IV	Divisi IV. Drainase - Drainase Pengamana Area		
1	Galian untuk Selokan Drainase dan Saluran Air	1.00	1.00
2	Pasangan Batu Kali dengan Mortar	3.00	9.00
V	Divisi V. Struktur - Pondasi dan Struktur Bawah		
1	Fondasi Cerucuk, Penyediaan dan Pemancangan	1.67	2.78
2	Tiang Bor Beton, diameter 800 mm	1.83	3.36
3	Pengujian Keutuhan Tiang dengan Pile Integrated Test (PIT)	0.33	0.11
4	Pasangan Batu	4.00	16.00
5	Bronjong dengan kawat yang dilapisi PVC	1.83	3.36
VI	Divisi VI. Struktur - Struktur Atas		
1	Baja Tulangan Polos-BjTP 280	2.00	4.00
2	Baja Tulangan Sirip BjTS 420A	9.67	93.44
3	Beton struktur, fc'30 Mpa	1.67	2.78
4	Beton struktur, fc'20 Mpa	1.67	2.78
5	Beton, fc'10 Mpa	0.50	0.25
6	Penyediaan Unit Pracetak Gelagar Tipe I Bentang 24,6 meter	0.67	0.44

3.3. Penyusunan Penjadwalan Menggunakan Software Penjadwalan

Penentuan hubungan antar aktivitas merupakan tahapan penting dalam penyusunan jaringan kerja proyek karena berfungsi untuk menggambarkan keterkaitan logis dan urutan pelaksanaan setiap pekerjaan. Hubungan ini ditetapkan berdasarkan tahapan konstruksi jembatan, karakteristik teknis pekerjaan, serta ketergantungan fisik antar aktivitas dilapangan. Hubungan ketergantungan dikaitkan antar aktivitas sesuai dengan pekerjaan yang mendahului (*predecessor*) dan atau pekerjaan yang mengikuti (*successor*) [14]. Dengan hubungan aktivitas yang tepat, alur mencerminkan kondisi pelaksanaan proyek yang sebenarnya. Hubungan aktivitas yang telah ditetapkan kemudian diintegrasikan dengan durasi hasil analisis metode PERT. Dengan mengombinasikan estimasi durasi probabilistik dan hubungan aktivitas yang realistis, jaringan kerja proyek dapat menggambarkan lintasan kritis secara lebih akurat. Aktivitas-aktivitas yang berada pada lintasan

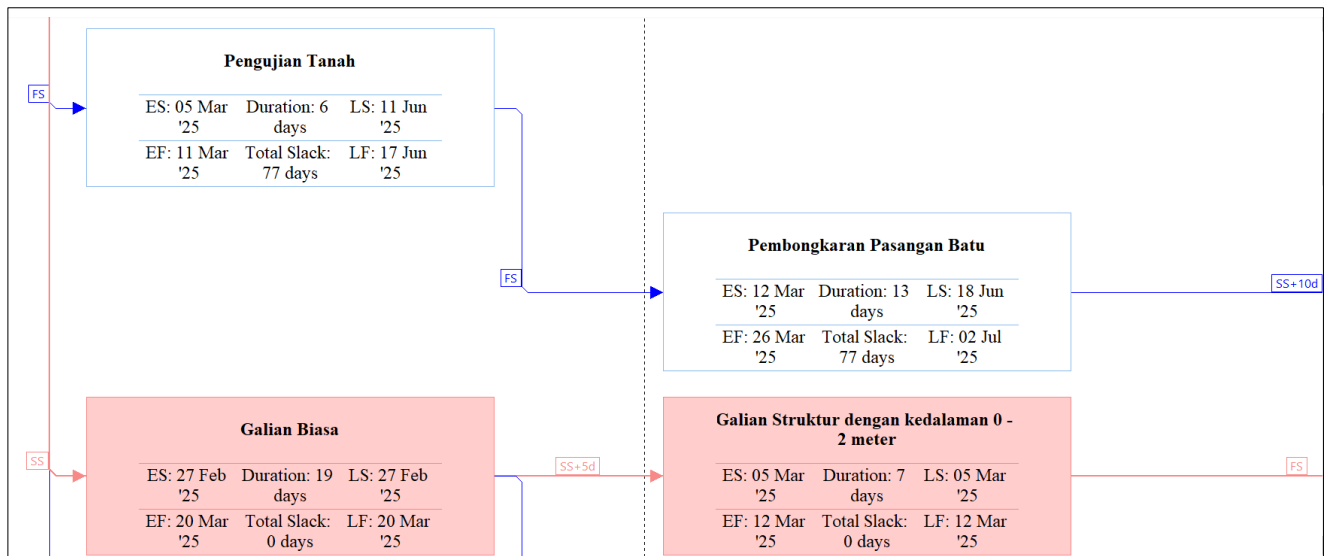
kritis selanjutnya menjadi fokus utama dalam pengendalian proyek, karena keterlambatan pada aktivitas tersebut akan berdampak langsung terhadap waktu penyelesaian proyek secara keseluruhan. Hasil perhitungannya seperti pada Tabel 5.

Setelah dilakukan pemodelan hubungan antar pekerjaan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5, *network diagram* dapat terbentuk berdasarkan keterkaitan antar aktivitas melalui alat bantu penjadwalan dengan perangkat lunak *Microsoft Project*. Berdasarkan hasil *network diagram* maka dapat diidentifikasi lintasan kritis proyek berdasarkan hubungan antar aktivitas yang telah ditetapkan pada kolom *predecessor*. Menurut [15] hubungan antar setiap pekerjaan diperlukan identifikasi yang jelas, agar pendefinisian pekerjaan berjalan jelas. Untuk memudahkan identifikasi selanjutnya, maka penjadwalan berbasis aplikasi ditampilkan dalam bentuk *network diagram* yang merepresentasikan pendekatan metode *Precedence Diagram Method* (PDM) dimana metode PDM lebih mudah untuk pembacaan setiap aktivitas, sehingga apabila

diperlukan analisis tiap pekerjaan mengalami PERT, maka tampilan hasil sesuai pendekatan metode PDM penyimpangan seberapa besar dalam analisis berbasis adalah yang terbaik (*Gambar 3*).

Tabel 5. Hubungan ketergantungan aktivitas

No	Uraian Pekerjaan	Predecessor	Successor
I	Divisi I. Umum		
1	Mobilisasi	Start	2,3,4,5
2	Papan Nama Jembatan	1	6
3	Pengamanan Lingkungan Hidup	1	6
4	Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi (Smkk)	1	6
5	Pengujian Tanah	1	6
II	Divisi II. Struktur - Pembongkaran Struktur Lama		
6	Pembongkaran Pasangan Batu	2,3,4,5	7
7	Pembongkaran Beton	6	8
8	Pembongkaran Balok Baja (Steel Stingers)	7	9
III	Divisi III. Pekerjaan Tanah - Persiapan Lokasi		
9	Galian Biasa	1	10
10	Galian Struktur Dengan Kedalaman 0 - 2 Meter	9	11
11	Timbunan Pilihan Dari Sumber Galian	10	12
12	Penyiapan Badan Jalan	11	13
13	Pemotongan Pohon Pilihan Diameter > 30 - 50 Cm	12	14
IV	Divisi IV. Drainase - Drainase Pengamana Area		
14	Galian Untuk Selokan Drainase Dan Saluran Air	10	15
15	Pasangan Batu Kali Dengan Mortar	14	16
V	Divisi V. Struktur - Pondasi dan Struktur Bawah		
16	Fondasi Cerucuk, Penyediaan Dan Pemasangan	11	17
17	Tiang Bor Beton, Diameter 800 Mm	16	18
18	Pengujian Keutuhan Tiang Dengan Pile Integrated Test (Pit)	17	19
19	Pasangan Batu	18	20
20	Bronjong Dengan Kawat Yang Dilapisi Pvc	19	21
VI	Divisi VI. Struktur - Struktur Atas		
21	Penyediaan Unit Pracetak Gelagar Tipe I Bentang 24,6 Meter	18	22
22	Pemasangan Unit Pracetak Gelagar Tipe I Bentang 24,6 Meter	21	23
23	Baja Tulangan Polos-Bjtp 280	22	24
24	Baja Tulangan Sirip Bjts 420a	23	25
25	Beton Struktur, Fc'30 Mpa	24	26
26	Beton Struktur, Fc'20 Mpa	25	27
27	Beton, Fc'10 Mpa	26	28
28	Beton Pratekan Untuk Diafragma Fc' 45 Mpa Termasuk Pekerjaan Pasca-Tarik (Post-Tension)	22	29
29	Penyediaan Panel Full Depth Slab	22	30



Gambar 3. Hasil penjadwalan berbasis PERT dengan *Precedence Diagram Method*

Tabel 6. Aktivitas-aktivitas kritis dan nilai standar deviasi

Item Pekerjaan	Lintasan Kritis
	LK (hari)
Divisi I. Umum	
Mobilisasi	0.50
Divisi III. Pekerjaan Tanah - Persiapan Lokasi	
Galian Biasa	5.00
Galian Struktur dengan kedalaman 0 - 2 meter	2.00
Timbunan pilihan dari sumber galian	2.50
Penyiapan badan jalan	0.67
Divisi V. Struktur - Pondasi dan Struktur Bawah	
Fondasi Cerucuk, Penyediaan dan Pemancangan	1.50
Tiang Bor Beton, diameter 800 mm	1.83
Pengujian Keutuhan Tiang dengan Pile Integrated Test (PIT)	0.33
Penyediaan Unit Pracetak Gelagar Tipe I Bentang 24,6 meter	1.17
Penyediaan Panel Full Depth slab	0.83
Pemasangan Panel Full Depth slab	0.83
Baja Tulangan Polos-BjTP 280	1.67
Baja Tulangan Sirip BjTS 420A	8.33
Beton struktur, fc'30 Mpa	2.67
Beton struktur, fc'20 Mpa	2.67
Beton, fc'10 Mpa	0.33
Pipa Penyalur PVC	1.17

Hasil penjadwalan menunjukkan aktivitas kritis dan lintasan kritis Pada proyek pembangunan Jembatan yang menunjukkan aktivitas yang tidak boleh terlambat dan mempengaruhi keseluruhan durasi proyek. Tabel 6 menunjukkan aktivitas kritis yang teridentifikasi, dan sekaligus nilai standar deviasi masing-masing aktivitas.

Berdasarkan pada Tabel 6, aktivitas dengan standar deviasi yang besar menunjukkan tingkat ketidakpastian durasi yang tinggi sehingga memerlukan perhatian dan pengendalian yang lebih intensif. Nilai tertinggi standar deviasi pada pekerjaan baja tulangan sirip BjTS 420A sebesar 8.33, hal ini berarti bahwa diantara keseluruhan

aktivitas kritis yang tidak boleh terlambat, maka potensi risiko keterlambatan terbesar yang mungkin terjadi adalah pada pekerjaan baja tulangan sirip BjTS 420A.

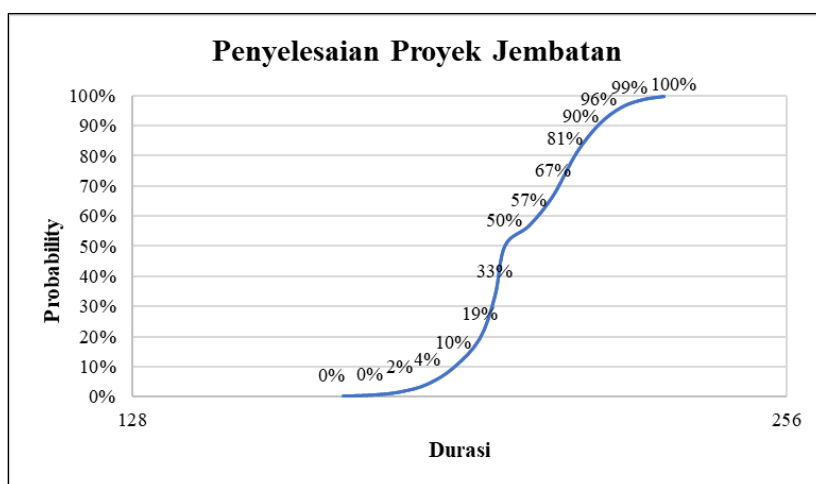
Analisis selanjutnya adalah perhitungan probabilitas z. Hasil dari penjadwalan dengan metode PERT sampai dengan durasi probabilitas pada masing-masing durasi hari. Rekapitulasi perhitungan probabilitas disajikan pada Tabel 7.

$$z1 = \frac{T_d - T_e}{sLK} = \frac{190 - 190}{11.5} = 0$$

Mengacu pada tabel kumulatif probabilitas dari *normal probability distribution*, untuk nilai $z_1 = 0$, diperoleh nilai probabilitas penyelesaian proyek sebesar 50.00%. Dengan menggunakan analisis yang sama, dapat diperoleh hasil beberapa probabilitas penyelesaian pekerjaan dan risiko ketidaktepatan penyelesaian yang harus ditanggung, sehingga dapat digunakan sebagai acuan bagi pengambil keputusan sebagaimana pada Tabel 7 yang kemudian disusun dalam bentuk grafik probabilitas untuk memudahkan pembacaan keterkaitannya hubungan antara durasi penyelesaian proyek dengan tingkat peluang ketercapaian waktu pelaksanaan. Grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin besar nilai durasi rencana (T_e), maka nilai Z akan semakin menurun, yang berdampak pada menurunnya probabilitas proyek dapat diselesaikan sebelum atau pada waktu yang direncanakan. Pada saat nilai Z mendekati nol, probabilitas penyelesaian proyek berada pada kisaran 50%, yang menunjukkan bahwa peluang proyek selesai tepat waktu dan mengalami keterlambatan berada dalam kondisi seimbang. Grafik probabilitas ini digunakan sebagai dasar dalam menentukan target durasi proyek yang paling realistis dengan mempertimbangkan tingkat risiko keterlambatan yang dapat diterima (Gambar 4).

Tabel 7. Perhitungan Probabilitas Z

Probabilitas waktu Pelaksanaan		
T_e	$Z=(T_d-T_e)/vLK$	Probabilitas
160	-3.04	0%
165	-2.61	0%
170	-2.17	2%
175	-1.74	4%
180	-1.30	10%
185	-0.87	19%
188	-0.43	33%
190	0	50%
195	0.17	57%
200	0.43	67%
205	0.87	81%
210	1.3	90%
215	1.74	96%
220	2.17	99%
225	2.61	100%



Gambar 4. Grafik probabilitas penyelesaian proyek jembatan

Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa pelaksana mempunyai banyak pilihan keputusan dalam melaksanakan kegiatan konstruksi sesuai dengan kemampuan menanggung peringatan risiko ketidaktepatan penyelesaian waktunya. Sebagai contoh pada durasi pekerjaan sepanjang 180 hari, maka risiko penyelesaian pekerjaan adalah 10 % yang artinya, risiko proyek mengalami keterlambatan penyelesaian adalah 90% atau kemungkinan penyelesaian tepat waktu kecil sekali. Demikian sebaliknya apabila pelaksana tidak mempunyai cukup pengalaman sehingga hanya berani menanggung risiko sebesar 1%, maka pekerjaan bisa diselesaikan dalam durasi 220 hari, dimana selisih waktu ini harus menjadi perhatian bagi pelaksana karena pasti akan mempengaruhi nilai biaya yang dikeluarkan selama pelaksanaan pekerjaan. Berdasarkan keseluruhan analisis berbasis PERT, maka pelaksana akan lebih mudah untuk mengendalikan pelaksanaan pekerjaan. Integrasi antara implementasi BIM 3D dengan analisis

PERT mampu menghasilkan waktu proyek yang lebih realistis karena mempertimbangkan risiko secara cepat dan akurat.

Penjadwalan dengan PERT pada beberapa penelitian terdahulu mampu memberikan durasi yang lebih akurat, sebagaimana juga dihasilkan pada penelitian ini [4], [16]. saat ini lebih banyak diterapkan pada proyek gedung, sehingga penerapannya pada proyek jembatan masih memerlukan kajian dan analisis yang lebih mendalam. Sesuai hasil penelitian terdahulu menunjukkan implementasi BIM 3D yang diintegrasikan dengan metode PERT pada proyek gedung menunjukkan optimalisasi waktu pelaksanaan proyek, hal ini sejalan dengan hasil penelitian ini meskipun pada jenis proyek yang berbeda yaitu proyek jembatan [6]. BIM 3D masih merupakan implementasi secara dasar dalam digitalisasi pekerjaan konstruksi, sebagaimana keterbatasan pada penelitian ini

sehingga diperlukan dimensi lanjutan dari implementasi BIM sampai dengan BIM 5D.

4. Kesimpulan

Implementasi BIM 3D telah berhasil memberikan nilai *bill of quantity* berupa volume tulangan baja sebesar 24.343,4 kg dan volume beton sebesar 274,1 m³ secara otomatis dari hasil running menggunakan aplikasi *Tekla Structure*. Hasil ini menunjukkan efisiensi waktu pada kegiatan perencanaan secara lebih optimal. Hasil analisis risiko berbasis PERT menunjukkan probabilitas penyelesaian proyek sebesar 50% untuk durasi pekerjaan selama 190 hari. Hasil ini bisa memberikan simulasi durasi dan tingkat kemungkinan risiko penyelesaiannya untuk dasar pertimbangan keputusan pengendalian proyek. Efisiensi waktu dengan penerapan metode PERT 20,833%. Penelitian selanjutnya akan lebih berfokus pada implementasi BIM 4D dengan dimensi waktu berbasis PERT efektifitas waktu perencanaan dan pelaksanaan akan dapat dicapai.

Daftar Pustaka

- [1] Y. Santi, N.A. Muhammad, and W.M.L. Ulwiyah, "Alternatif Perencanaan Jembatan Rangka Baja Dengan Menggunakan Metode LRFD di Jembatan Gelatik Kota Samarinda", *Rang Teknik Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 282-294, 2021. <https://doi.org/10.31869/rtj.v4i2.2518>
- [2] D. Hadicara and A. Rochim, "Penggunaan Metode PERT dan CPM dalam Proyek Pembangunan Jalan", *Pondasi*, vol. 28, no. 1, pp. 32-44, 2023. <https://dx.doi.org/10.30659/pondasi.v28i1.30148>
- [3] R.A. Husna, N.F. Ilmiyah, and N.C. Resti, "Implementasi CPM dan PERT dalam Memprediksi Durasi serta Biaya Pembangunan Musala Al-Ikhlas di Kotawaringin Barat", *Journal Focus Action of Research Mathematic (Factor M)*, vol. 5, no. 1, pp. 97-109, 2022. https://doi.org/10.30762/f_m.v5i1.633
- [4] R.D.P. Ngestiaji, L.A.R. Winanda, and V. Aditama, "Penerapan Metode PERT Pada Penjadwalan Pembangunan Tugu Alun-Alun Kota Mojokerto", vol. 3, no. 1, pp. 275-284, 2025. <https://doi.org/10.56071/sintesi.v3i1.1579>
- [5] R.R.P. Yudiyanto, L.A.R. Winanda, H.S.W. Sunarwadi, and D.K. Kartika, "Pemodelan 3D pada Bangunan Gedung Guna Mendukung Implementasi Bim 5D pada Proyek Konstruksi", *Jurnal Talenta Sipil*, vol. 8, no. 2, pp. 555-562, 2025. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v8i2.877>
- [6] S. Wahyudiono, F. R. Andardi, Y. Rusdianto, and R. Awalludiensyah, "Penerapan Metode Program Evaluation and Review Technique (PERT) Pada Proyek Malang Creative Center (MCC) Berdasarkan Building Information Modelling (BIM)", *Jurnal Media Teknik Sipil*, vol. 21, no. 2, pp. 66-76, 2023, <https://doi.org/10.22219/jmts.v21i2.28969>
- [7] A. Sholichan and A.E. Husin, "Optimization of M-PERT & BIM 5D to Minimize the Risk of Time Delay & Overrun in Stadium Project Structure Works : Key Success Factors," *International Journal of Research and Review*, vol. 8, no. 7, pp. 491-498. <https://doi.org/10.52403/ijrr.20210770>
- [8] M.Y. Ramawan, L.A.R. Winanda, V. Aditama, M. Wijayaningtyas, and D. Kartika, "The effectiveness of BIM implementation in high-rise building", *AIP Conferrence Proceeding*, vol. 3110, no. 1, p. 1-14, 2024. doi: 10.1063/5.0205185. <https://doi.org/10.1063/5.0205185>
- [9] D. Sabil and Erizal, "Penerapan Buidling Information Modeling (BIM) 5D pada Proyek Gedung Simpang Temu Dukuh Atas, Jakarta Pusat", *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 8, no. 2, pp. 95-104, 2023. <https://doi.org/10.29244/jsil.8.02.95-104>
- [10] D. Maula Al Farizi and K. Hapsari, "Evaluasi Metode Perhitungan Tulangan Kolom Dengan Software Tekla Structures Dan Autodesk Revit", *Construction Material Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 45-50, 2025. <https://doi.org/10.32722/cmj.v7i1.7066>
- [11] A.T. Handayani, E. Budiman, and T. Rahman, "Penerapan Building Information Modelling (BIM) dalam Menghitung Quantity Take Off Material Struktur (Studi Kasus: Proyek Gedung Rumah Sakit Mata di Jl. M. Yamin, Kota Samarinda, Kalimantan Timur)", *Teknologi Sipil: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, vol. 8, no. 1, pp. 48, 2024. <http://dx.doi.org/10.30872/ts.v8i1.16024>
- [12] A.M.A. Hafiz, A. Firmansyah, and N. Lastriana, "Application of Building Information Modeling in the Construction of the Parakan Lima Bridge in Purwakarta Regency", *Potensi: Jurnal Sipil Politeknik*, vol. 27, no. 2, pp. 64-71, 2025. <https://doi.org/10.35313/potensi.v27i2.4024>
- [13] F.A. Rozy and R.G.W. Ode, "Manajemen Waktu, Biaya dan Sdm Proyek Konstruksi pada Pembangunan Gedung Ruang Kuliah Fia Universitas Brawijaya Malang dengan Menggunakan Metode PERT dan PDM", *Media Teknik Sipil*, vol. 12, no. 1, pp. 1-10, 2014.
- [14] Y. Ambalinggi, L. Sriwahyuni, S. Norhidayanti, and F. Oktavia, "Analysis Use of PERT/CPM : Optimizing Manufacturing Production Process Resources for Building Construction Projects on Kunjang River Region , East Kalimantan", *Jurnal Teknik*, vol. 2, no. 03, pp. 1283-1291, 2024.
- [15] M.R.A. Simanjuntak, "Rekomendasi Hasil Analisis Waktu Pelaksanaan Lingkungan Kota Serang Provinsi Banten", *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 219-228, 2014.
- [16] F.R. Andardi, "Analisis Penerapan Sistem Penjadwalan dengan Metode PERT pada Proyek Konstruksi (Studi Kasus : Rehabilitasi dan Peningkatan Infrastruktur Pasar Tradisional Kota Malang)", *Prokons Jurusan Teknik Sipil*, vol. 14, no. 2, pp. 19-24, 2021.

This page is intentionally left blank