

Pendekatan Probabilistik Berbasis PERT dengan Visualisasi *TFN* pada Penjadwalan Proyek Konstruksi

Ismatul Khasanah, Lila Ayu Ratna Winanda*, Munasih, Annur Ma'ruf

Institut Teknologi Nasional Malang, Malang-65145, Indonesia

ARTICLE INFO

Kata Kunci:

Penjadwalan Proyek, Probabilitas, Program Evaluation and Review Technique, Triangular Fuzzy Number

***Correspondence email:**

lilawinanda@lecturer.itn.ac.id

Submitted: 15 Desember 2025

Revised: 30 Desember 2025

Accepted: 17 Januari 2026

Published: 03 Februari 2026

ABSTRAK

Ketidakpastian durasi aktivitas merupakan faktor utama yang mempengaruhi keandalan jadwal proyek konstruksi. Variabilitas sumber daya, kondisi lapangan, pasokan material serta kondisi teknis lainnya sering menyebabkan penyimpangan antara rencana dan durasi aktual. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan menganalisis durasi proyek dengan menggunakan metode *Program Evaluation and Review Technique* (PERT) berbasis estimasi tiga titik, yaitu optimis (a), paling mungkin (m), dan pesimis (b), serta memvisualisasikan rentang durasi melalui representasi *Triangular Fuzzy Number* untuk memperjelas variasi estimasi tiap aktivitas. Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi pengumpulan data estimasi durasi (a, m, b) melalui wawancara terstruktur, perhitungan nilai *Expected Time* (te) setiap aktivitas, dan penyusunan jaringan kerja menggunakan *Precedence Diagram Method* (PDM) dengan alat bantu *Microsoft Project* untuk menentukan lintasan kritis dan durasi total proyek. Hasil penelitian menunjukkan bahwa durasi total proyek adalah 170 hari, dengan beberapa aktivitas berada pada jalur kritis sebagai penentu waktu penyelesaian proyek, sedangkan analisis probabilistik menghasilkan peluang penyelesaian proyek sebesar 70% terhadap durasi target. Ketidakpastian analisis penjadwalan dapat diselesaikan dengan pendekatan visualisasi *triangular fuzzy number* untuk memperluas batas waktu optimis, paling mungkin, dan pesimis setiap aktivitas. Berdasarkan hasil tersebut, penelitian ini diharapkan dapat mendorong penerapan analisis PERT berdasarkan estimasi tiga titik yang divisualisasikan dalam bentuk distribusi segitiga pada setiap aktivitas sebagai dasar penetapan durasi target dan pengambilan keputusan percepatan proyek yang lebih realistis.

ABSTRACT

Keywords:

Probability, Program Evaluation and Review Technique, Project Scheduling, Triangular Fuzzy Number

Uncertainty regarding the duration of activities is a major factor affecting the reliability of construction project schedules. Variability in resources, field conditions, material supplies, and other technical conditions often cause deviations between planned and actual durations. Therefore, this study aims to analyze project duration using the Program Evaluation and Review Technique (PERT) based on three-point estimates, namely optimistic (a), most likely (m), and pessimistic (b), and to visualize the duration range through Triangular Fuzzy Number representation to clarify the variation in estimates for each activity. The methods used in this study include collecting duration estimates (a, m, b) through structured interviews, calculating the Expected Time (te) for each activity, and compiling a work network using the Precedence Diagram Method (PDM) with Microsoft Project to determine the critical path and total project duration. The results of the study show that the total project duration is 170 days, with several activities on the critical path determining the project completion time, while probabilistic analysis results in a 70% chance of project completion within the target duration. The uncertainty of scheduling analysis can be resolved with a triangular fuzzy number visualization approach to extend the optimistic, most likely, and pessimistic time limits for each activity. Based on these results, this study is expected to encourage the application of PERT analysis based on three-point estimates visualized in the form of triangular distributions for each activity as a basis for setting target durations and making more realistic project acceleration decisions.

PENDAHULUAN

Penjadwalan proyek konstruksi merupakan kunci dalam manajemen proyek konstruksi karena menentukan urutan pekerjaan, alokasi sumber daya, serta waktu penyelesaian proyek. Ketepatan jadwal berpengaruh langsung terhadap kinerja biaya dan mutu sehingga keterlambatan pelaksanaan dapat menimbulkan konsekuensi finansial dan operasional bagi pemilik maupun kontraktor (Rolobessy, Djakfar and Negara, 2025). Namun dalam praktiknya, estimasi durasi aktivitas sering dipengaruhi ketidakpastian yang bersumber dari variabilitas produktivitas tenaga kerja, kondisi cuaca,

pasokan material, dan faktor teknis lainnya. Ketidakpastian tersebut menyebabkan deviasi antara durasi rencana dan durasi aktual sehingga menurunkan keandalan jadwal proyek (Made Asna and Gede Angga Diputera, 2021).

Metode *Program Evaluation and Review Technique* (PERT) dikembangkan untuk mengakomodasi ketidakpastian melalui pendekatan probabilistik dengan menggunakan tiga estimasi waktu, yaitu optimis (a), paling mungkin (m), dan pesimis (b). Estimasi tiga titik ini memungkinkan perhitungan nilai ekspektasi dan varians durasi sehingga memberikan gambaran probabilitas penyelesaian proyek dalam waktu rentang waktu tertentu. Pendekatan ini lebih adaptif dibandingkan metode deterministik seperti *Critical Path Method* (CPM) yang hanya menggunakan satu nilai estimasi dan tidak mempertimbangkan variasi durasi, sehingga sering menyebabkan keterlambatan rata-rata 10-30% pada proyek konstruksi global dan hingga 27,8% pada kasus Indonesia (Wahyudiono and Utari, 2022; Dwiretnani, Handayani and Saputra, 2023; Kurniawan and Mulyono, 2024; Faisal, Ingsih and Aasniari, 2025; Musyafir, Irawan and Aditya, 2025).

Meskipun demikian, beberapa penelitian menunjukkan bahwa PERT klasik memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan bentuk sebaran durasi aktivitas secara realistis. Estimasi pakar yang menjadi basis penentuan nilai a-m-b sering kali bersifat subjektif dan tidak sepenuhnya mencerminkan kondisi lapangan, sedangkan bentuk distribusi beta yang diasumsikan PERT tidak selalu sesuai dengan karakteristik durasi aktivitas konstruksi. Untuk meningkatkan kejelasan interpretasi, beberapa kajian modern menggunakan representasi segitiga (*triangular fuzzy number*) sebagai visualisasi rentang durasi berdasarkan nilai minimum, modus, dan maksimum. Representasi *triangular fuzzy number* ini tidak dimaksudkan sebagai penerapan teori fuzzy, akan tetapi sebagai alat bantu grafis untuk menunjukkan rentang ketidakpastian yang mudah dipahami oleh praktisi (Hajdu and Bokor, 2014; Roos and Hertog, 2021; Santoso, Handayani and Setiono, 2025).

Pendekatan *triangular fuzzy number* merepresentasikan nilai dalam bentuk tiga parameter (a, m, b) melalui fungsi keanggotaan berbentuk segitiga. Literatur TFN menunjukkan bahwa grafik segitiga efektif untuk merepresentasikan variasi data apabila terdapat ketidakpastian dalam selang nilai tertentu. Konsep ini relevan untuk memperjelas visualisasi rentang estimasi durasi, meskipun penelitian ini tidak menerapkan logika fuzzy secara penuh (Ayu Ratna Winanda, Wahyu Adi and Anwar, 2019; Ma'ruf and Marianti, 2022; Ma'ruf, Kartika and Yuwono, 2023; Ayu Ratna Winanda *et al.*, 2024).

Penelitian terdahulu banyak menerapkan PERT pada proyek bangunan gedung, jalan, maupun infrastruktur lainnya, akan tetapi sebagian besar masih terbatas pada perhitungan numerik tanpa penyajian visual rentang durasi aktivitas. Selain itu penelitian yang secara spesifik menggabungkan estimasi tiga titik PERT dengan representasi *triangular fuzzy number* manual untuk menganalisis ketidakpastian durasi pada proyek konstruksi nyata masih relatif sedikit. Kondisi ini menimbulkan kebutuhan akan kajian yang tidak hanya menghitung durasi ekspektasi dan lintasan kritis, tetapi juga memberikan pemahaman visual mengenai rentang ketidakpastian setiap aktivitas (Made Asna and Gede Angga Diputera, 2021; Nanda, Kurniawati and Riswanto, 2023; Rosalinda *et al.*, 2023; Firdaus and Hermawan, 2025)

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan menerapkan metode PERT berbasis estimasi tiga titik (a,m,b) dengan visualisasi *triangular fuzzy number* untuk menganalisis ketidakpastian durasi pada aktivitas proyek konstruksi. Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan estimasi durasi yang lebih informatif, meningkatkan pemahaman terhadap potensi keterlambatan, serta memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih adaptif dalam pengendalian waktu proyek. Selain itu, penelitian ini juga berupaya memberikan gambaran visual melalui representasi *triangular fuzzy number* sehingga variasi durasi aktivitas dapat dipahami secara intuitif.

METODE

Objek penelitian ini dilakukan pada proyek Pembangunan Jembatan Besuk Ruas BTS Kota Bondowoso-BTS Kab Situbondo (Link.35.034) yang merupakan akses penghubung utama antara perbatasan Kota Bondowoso dan Kab Situbondo. Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif untuk menyajikan, mengolah, dan menganalisis data durasi aktivitas secara numerik untuk menggambarkan ketidakpastian durasi aktual dibandingkan dengan durasi rencana proyek.

Data penelitian yang digunakan terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui wawancara terstruktur kepada pihak yang berpengalaman dan terlibat langsung dalam pelaksanaan proyek untuk memperoleh tiga estimasi durasi PERT, yaitu waktu optimis (a), waktu paling mungkin (m), dan waktu pesimis (b) pada setiap aktivitas proyek. Sedangkan data sekunder diperoleh dari dokumen jadwal resmi proyek (*time schedule*) yang digunakan sebagai acuan durasi rencana dan sebagai dasar dalam penyusunan urutan aktivitas serta validasi umum terhadap hasil estimasi waktu.

Prosedur pengumpulan data dilakukan melalui tiga tahap utama, yaitu; (1) pengamatan kondisi proyek untuk memahami kondisi aktual pelaksanaan pekerjaan, identifikasi urutan aktivitas, serta memverifikasi kesesuaian estimasi durasi yang diberikan narasumber terhadap kondisi riil di lapangan, (2) wawancara terstruktur untuk mengumpulkan nilai durasi optimis (a), paling mungkin (m) dan pesimis (b) dengan panduan pertanyaan yang sama untuk setiap

narasumber, dan (3) studi dokumen untuk menyusun jaringan kerja dan memastikan ketepatan urutan aktivitas serta hubungan ketergantungan antarpekerjaan.

Analisis data dilakukan secara bertahap untuk memastikan hasil penelitian yang akurat dan relevan. Tahap pertama adalah rekapitulasi nilai estimasi durasi optimis (a), paling mungkin (m), dan pesimis (b) untuk setiap aktivitas proyek. Nilai-nilai tersebut diperoleh melalui wawancara dan observasi lapangan, kemudian dirata-ratakan untuk memperoleh estimasi yang representatif. Rekapitulasi ini menjadi dasar dalam perhitungan durasi ekspektasi, varians, dan standar deviasi pada tahap penerapan metode PERT. Tahapan kedua adalah penyusunan jaringan kerja proyek menggunakan metode *Precedence Diagram Method* (PDM) berdasarkan hubungan ketergantungan antar aktivitas. Hasil penyusunan jaringan kerja menghasilkan lintasan kritis dan durasi total proyek yang diperlukan dalam analisis probabilistik. Tahapan ketiga adalah analisis probabilitas penyelesaian proyek. Analisis ini dilakukan dengan menghitung durasi ekspektasi lintasan kritis, menghitung standar deviasi lintasan kritis sebagai ukuran dispersi durasi, menentukan nilai Z berdasarkan target durasi proyek, serta mengonversi nilai Z ke dalam probabilitas melalui distribusi normal baku. Tahapan keempat adalah memvisualisasikan rentang estimasi durasi menggunakan representasi segitiga (*Triangular Fuzzy Number*). Representasi ini dibentuk dari nilai a, m, dan b untuk memperlihatkan batas bawah durasi, nilai paling mungkin, dan batas atas durasi.

HASIL

Rekapitulasi Data

Data hasil wawancara terstruktur menunjukkan bahwa setiap aktivitas pada proyek memiliki rentang ketidakpastian durasi yang berbeda, dipengaruhi oleh kondisi lapangan, produktivitas tenaga kerja, dan ketersediaan material. Nilai optimis (a), paling mungkin (m), dan pesimis (b) yang diperoleh kemudian dirata-ratakan untuk memperoleh parameter representatif bagi setiap aktivitas. Nilai tersebut menjadi input utama perhitungan PERT dan pembentukan *triangular fuzzy number* yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Data Durasi Pekerjaan Berbasis PERT

No	Aktivitas	a (hari)	m (hari)	b (hari)
1	Mobilisasi	45	50	56
2	Jembatan Sementara	28	33	52
3	SMKK	16	20	24
4	Galian Biasa	60	66	71
5	Galian Struktur	32	40	49
6	Timbunan Pilihan	57	63	69
7	Pemotongan Pohon Pilihan > 75 cm	27	32	37
8	Lapis Resap Pengikat	17	22	25
9	Lapis Perekat	17	22	25
10	Laston Lapis Antara (AC-BC)	13	21	27
11	Beton fc 30 Mpa	11	14	17
12	Beton fc 20 Mpa	34	39	44
13	Beton fc 10 Mpa	34	39	43
14	Penyediaan Pracetak Gelagar	30	35	40
15	Pemasangan Pracetak Gelagar	27	32	37
16	Beton Pratekan	9	13	17
17	Penyediaan Planel	11	14	18
18	Pemasangan Planel	10	14	17
19	Baja Tulangan Polos	64	71	78
20	Baja Tulangan Sirip	64	71	79
21	Fondasi Cerucuk	28	74	87
22	Tiang Bor Beton	24	28	32
23	Pengujian PIT	5	7	9

Sumber : Hasil Penelitian (2025)

Perhitungan Durasi Ekspektasi (te)

Penentuan durasi ekspektasi setiap aktivitas dilakukan menggunakan pendekatan tiga estimasi waktu, yaitu optimis (a), paling mungkin (m), dan pesimis (b). Ketiga nilai tersebut digunakan untuk menghitung durasi ekspektasi (te) dengan metode *Program Evaluation and Review Technique* (PERT), sehingga diperoleh nilai durasi yang lebih representatif dibandingkan pendekatan deterministik. Pada persamaan (1) diberikan rumus durasi ekspektasi yang menjadi dasar dalam penyusunan jaringan kerja.

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

Sebagai salah satu contoh Perhitungan kurun waktu ekspektasi (t_e) pada pekerjaan galian struktur. Kurun waktu optimis (a) = 32 hari, kurun waktu paling mungkin (m) = 40 hari, dan kurun waktu pesimis (b) = 49 hari, maka didapatkan nilai t_e sebagai berikut.

$$T_e = \frac{32+4(40)+49}{6} = 40 \text{ hari}$$

Tabel 2 Rekapitulasi Waktu Ekspektasi Setiap Aktivitas

No	Aktivitas	t_e (hari)
1	Mobilisasi	50
2	Jembatan Sementara	35
3	SMKK	20
4	Galian Biasa	66
5	Galian Struktur	40
6	Timbunan Pilihan	63
7	Pemotongan Pohon Pilihan > 75 cm	32
8	Lapis Resap Pengikat	21
9	Lapis Perekat	21
10	Laston Lapis Antara (AC-BC)	21
11	Beton fc 30 Mpa	13
12	Beton fc 20 Mpa	39
13	Beton fc 10 Mpa	38
14	Penyediaan Pracetak Gelagar	35
15	Pemasangan Pracetak Gelagar	32
16	Beton Pratekan	13
17	Penyediaan Planel	14
18	Pemasangan Planel	13
19	Baja Tulangan Polos	71
20	Baja Tulangan Sirip	71
21	Fondasi Cerucuk	68
22	Tiang Bor Beton	28
23	Pengujian PIT	7

Sumber : Hasil Penelitian (2025)

Penyusunan Jaringan Kerja (PDM)

Durasi ekspektasi (t_e) setiap aktivitas yang diperoleh pada perhitungan PERT selanjutnya digunakan untuk menyusun jaringan kerja proyek. Identifikasi urutan kerja dilakukan berdasarkan *time schedule* proyek Pembangunan Jembatan Besuk Ruas BTS Kota Bondowoso – Kab Situbondo. Penyusunan jaringan dilakukan menggunakan metode *Precedence Diagram Method* (PDM) melalui alat bantu *Microsoft Project* dengan memasukkan durasi aktivitas dan hubungan predecessor sesuai urutan pekerjaan di lapangan.

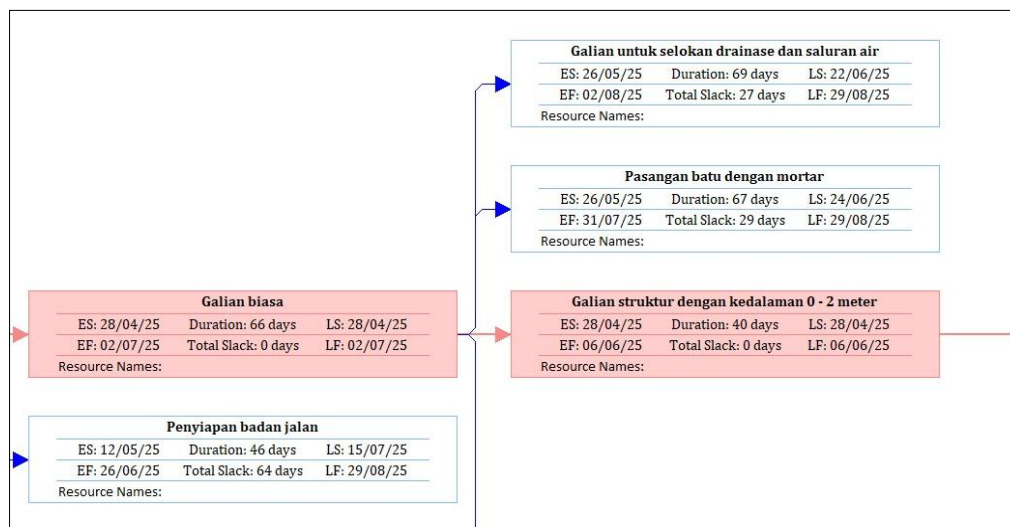
Hasil pengolahan menghasilkan diagram jaringan yang menunjukkan hubungan logis antar aktivitas dan nilai kelonggaran (*slack*). Aktivitas dengan total *slack* sama dengan nol diidentifikasi sebagai aktivitas kritis. Aktivitas kritis yang berada di jalur kritis merupakan dasar dalam analisis probabilistik pada tahap selanjutnya. Daftar aktivitas kritis yang terbentuk ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Hubungan Ketergantungan Antar Aktivitas Kritis

Kode	Aktivitas	Predecessor
1	Mobilisasi	-
2	SMKK	1SS
3	Pemotongan Pohon > 75cm	2
4	Jembatan Sementara	3
5	Galian Biasa	4SS
6	Galian Struktur	5SS
7	Timbunan Pilihan	6
8	Lapis Resap Pengikat	7
9	Lapis Perekat	7
10	Laston Antara (AC-BC)	7

Sumber : Hasil Penelitian (2025)

Aktivitas-aktivitas pada jalur kritis menjadi penentu durasi total proyek karena setiap keterlambatan pada aktivitas tersebut langsung mempengaruhi waktu penyelesaian proyek. Visualisasi jaringan kerja proyek yang dihasilkan melalui PDM ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Contoh Hasil Precedence Diagram Method (PDM)

Sumber : Hasil Penelitian (2025)

Gambar 1 memperlihatkan alur aktivitas proyek beserta hubungan ketergantungannya sehingga urutan pekerjaan, waktu mulai, waktu selesai, dan kelonggaran tiap aktivitas dapat terlihat secara jelas. Setelah jalur kritis diperoleh pada aktivitas kritis, analisis dilanjutkan dengan menghitung standar deviasi dan varians total proyek berdasarkan aktivitas-aktivitas pada jalur kritis. Nilai varians dan standar deviasi tersebut digunakan untuk menentukan probabilitas proyek dapat diselesaikan dalam waktu target melalui perhitungan nilai Z pada distribusi normal baku.

Perhitungan Standar Deviasi dan Varians

Setelah jalur kritis ditentukan, analisis dilanjutkan dengan menghitung standar deviasi dan varians untuk setiap aktivitas yang berada pada jalur kritis. Perhitungan ini dilakukan berdasarkan selang waktu dari masing-masing aktivitas. Varians menunjukkan tingkat penyebaran estimasi durasi, sedangkan standar deviasi memberikan ukuran ketidakpastian yang lebih mudah diinterpretasikan. Nilai-nilai ini diperlukan untuk menentukan disperse durasi jalur kritis dalam analisis probabilistik. Rumus perhitungan standar deviasi dan varians ditunjukkan pada persamaan (2) dan (3).

$$S = \frac{b - a}{6} \tag{2}$$

$$V = S^2 \tag{3}$$

Salah satu contoh perhitungan nilai standar deviasi dan varians pada pekerjaan galian struktur. Waktu optimis (a) = 32 hari, waktu paling mungkin (m) = 40 hari, dan waktu pesimis (b) = 49 hari.

$$S = \frac{49 - 32}{6} = 2,8$$

$$V = (2,8)^2 = 7,8$$

Tabel 4 Rekapitulasi Nilai Varians dan Standar Deviasi pada Setiap Aktivitas

No	Aktivitas	Varians (hari)	Standar Deviasi (hari)
1	Mobilisasi	3,1	1,8
2	Jembatan Sementara	14,4	3,8
3	SMKK	1,2	1,1
4	Galian Biasa	2,7	1,7
5	Galian Struktur	7,8	2,8
6	Timbunan Pilihan	3,9	2,0
7	Pemotongan Pohon Pilihan > 75 cm	2,3	1,5

No	Aktivitas	Varians (hari)	Standar Deviasi (hari)
8	Lapis Resap Pengikat	1,1	1,1
9	Lapis Perekat	1,1	1,1
10	Laston Lapis Antara (AC-BC)	4,8	2,2
11	Beton fc 30 Mpa	0,8	0,9
12	Beton fc 20 Mpa	2,1	1,5
13	Beton fc 10 Mpa	1,7	1,3
14	Penyediaan Pracetak Gelagar	2,5	1,6
15	Pemasangan Pracetak Gelagar	2,2	1,5
16	Beton Pratekan	1,3	1,1
17	Penyediaan Planel	1,3	1,1
18	Pemasangan Planel	1,1	1,1
19	Baja Tulangan Polos	5,4	2,3
20	Baja Tulangan Sirip	5,5	2,4
21	Fondasi Cerucuk	94,4	9,7
22	Tiang Bor Beton	1,4	1,2
23	Pengujian PIT	0,2	0,5

Sumber : Hasil Penelitian (2025)

Berdasarkan Tabel 4 didapatkan nilai varians dan standar deviasi pada keseluruhan item pekerjaan. Untuk menganalisis probabilitas digunakan nilai varians dan standar deviasi pada aktivitas kritis yang dimana hasil rekapitulasi tercantum pada Tabel 5.

Tabel 5 Rekapitulasi Nilai Varians dan Standar Deviasi pada Aktivitas Kritis

No	Aktivitas Kritis	Varians	Standar Deviasi
1	Mobilisasi	3,1	1,8
2	SMKK	14,4	3,8
3	Pemotongan Pohon > 75cm	1,2	1,1
4	Jembatan Sementara	2,7	1,7
5	Galian Biasa	7,8	2,8
6	Galian Struktur	3,9	2,0
7	Timbunan Pilihan	2,3	1,5
8	Lapis Resap Pengikat	1,1	1,1
9	Lapis Perekat	1,1	1,1
10	Laston Antara (AC-BC)	4,8	2,2
	JUMLAH	42,4	19,1

Sumber : Hasil Penelitian (2025)

Berdasarkan Tabel 5 terlihat bahwa setiap aktivitas pada jalur kritis memiliki nilai varians dan standar deviasi yang berbeda-beda sesuai tingkat ketidakpastian durasinya. Aktivitas yang memiliki nilai varians tinggi maka akan memiliki resiko keterlambatan tinggi, sehingga diperlukan prioritas perhatian terhadap aktivitas tersebut. Oleh karena itu berdasarkan hasil analisis pekerjaan, yang menjadi perhatian utama adalah pekerjaan galian biasa selain pekerjaan SMKK.

Analisis Probabilistik

Analisis probabilistik dilakukan untuk mengetahui peluang proyek dapat diselesaikan dalam durasi target yang telah ditetapkan. Nilai probabilitas dihitung berdasarkan perbandingan antara durasi ekspektasi jalur kritis dan target penyelesaian proyek melalui nilai Z dari distribusi normal. Dengan demikian, nilai Z dan probabilitas yang dihasilkan dapat memberikan gambaran kuantitatif mengenai tingkat ketercapaian waktu proyek. Rumus perhitungan nilai Z dijabarkan pada persamaan (4).

$$Z = \frac{T_d - TE}{s} \tag{4}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan durasi ekspektasi pada jalur kritis menghasilkan nilai TE sebesar 170 hari. Varians aktivitas kritis yang dijumlahkan memberikan varians total sebesar 42,4 dan standar deviasi lintasan kritis sebesar 19,1 hari. Durasi target proyek kemudian dibandingkan dengan nilai TE menggunakan rumus persamaan (4). Maka didapatkan :

$$Z = \frac{235 - 170}{19,1} = 3,403$$

Sehingga diperoleh nilai Z sebesar 3,403. Nilai ini selanjutnya digunakan untuk menentukan probabilitas penyelesaian proyek sesuai durasi target dengan mengacu pada distribusi normal baku dan menghasilkan peluang keberhasilan sebesar 70 % yang mengindikasikan resiko keterlambatan tinggi. Apabila target durasi diperpanjang menjadi 200 hari, probabilitas meningkat signifikan menjadi 83%, sehingga resiko keterlambatan menurun. Selanjutnya dengan target 240 hari, probabilitas penyelesaian proyek mencapai 100%, menunjukkan peluang besar proyek selesai tepat waktu. Analisis ini memberikan gambaran yang jelas mengenai hubungan antara target durasi proyek dan resiko keterlambatan.

Pendekatan Analisis Estimasi Durasi

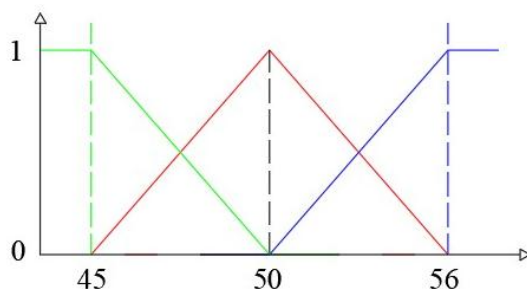
Pendekatan analisis estimasi durasi pada penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan tiga nilai waktu yaitu waktu optimis (a), waktu paling mungkin (m), dan waktu pesimis (b) yang diperoleh melalui wawancara terstruktur. Ketiga nilai ini direpresentasikan dalam bentuk grafik segitiga sebagai visualisasi rentang kemungkinan durasi aktivitas. Representasi segitiga tersebut menampilkan perubahan nilai durasi dari batas bawah menuju nilai paling mungkin dan kembali menurun menuju batas atas, sehingga memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai tingkat variasi durasi pada tiap aktivitas.

Untuk membentuk grafik tersebut digunakan fungsi linear naik dan turun yang menghubungkan tiga titik utama a-m-b. Nilai-nilai tersebut diplot pada sumbu horizontal (x) yang merepresentasikan durasi, sedangkan sumbu vertikal (y) menunjukkan derajat keanggotaan. Bentuk grafik ini menyerupai segitiga, dengan titik puncak berada pada nilai m karena memiliki derajat keanggotaan maksimum ($\mu = 1$), sementara nilai a dan b berada pada derajat keanggotaan minimum ($\mu = 0$). Representasi ini menggambarkan intensitas relative terjadinya suatu durasi t di dalam rentang estimasi tersebut. Dengan demikian, setiap aktivitas memiliki satu grafik segitiga yang merepresentasikan karakteristik variasi durasinya.

Pada aktivitas pertama estimasi durasi berada pada selang waktu [45, 56] dengan nilai paling mungkin yaitu 50. Variasi durasi tersebut direpresentasikan melalui fungsi segitiga sebagai berikut :

$$\mu(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 45 \\ \frac{t - 45}{50 - 45}, & 45 < t \leq 50 \\ \frac{56 - t}{56 - 50}, & 50 < t < 56 \\ 0, & t \geq 56 \end{cases}$$

Fungsi ini membentuk garis naik dari a menuju titik puncak di m dan menurun kembali hingga b, sehingga menghasilkan grafik segitiga sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Visualisasi Grafik Segitiga Aktivitas Mobilisasi

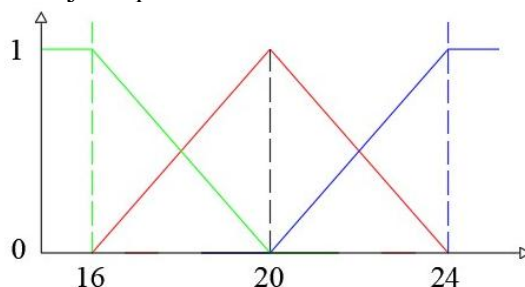
Sumber : Hasil Penelitian (2025)

Gambar 2 menampilkan hasil fungsi keanggotaan (*Triangular Fuzzy Number / TFN*) untuk aktivitas mobilisasi. Fungsi keanggotaan ini tersusun berdasarkan rekapitulasi hasil wawancara responden dimana masing-masing responden mempunyai subyektifitas masing-masing penilaiannya, sehingga apabila disatukan dalam bentuk TFN, maka terdapat daerah samar antara durasi optimis, paling mungkin, dan pesimis.

Pada aktivitas berikutnya nilai estimasi durasi menunjukkan selang waktu yang berbeda yaitu [16, 24] dengan nilai paling mungkin berada pada angka 20. Hubungan antara ketiga nilai tersebut direpresentasikan oleh fungsi segitiga sebagai berikut :

$$\mu(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 16 \\ \frac{t-16}{20-16}, & 16 < t \leq 20 \\ \frac{24-t}{24-20}, & 20 < t < 24 \\ 0, & t \geq 24 \end{cases}$$

Grafik yang dihasilkan memperlihatkan pola kenaikan dari a menuju puncak di m, kemudian menurun kembali hingga mencapai nilai b, sebagaimana disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3 Visualisasi Grafik Segitiga Aktivitas SMKK

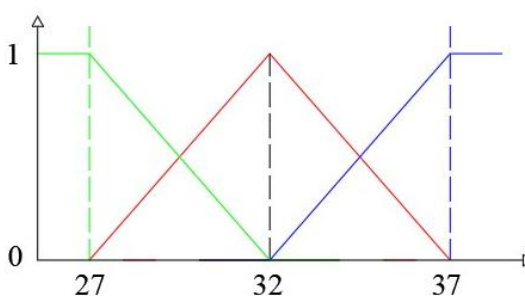
Sumber : Hasil Penelitian (2025)

Gambar 3 menampilkan hasil fungsi keanggotaan (*Triangular Fuzzy Number / TFN*) untuk aktivitas SMKK. Fungsi keanggotaan ini tersusun berdasarkan rekapitulasi hasil wawancara responden dimana masing-masing responden mempunyai subyektifitas masing-masing penilaiannya, sehingga apabila disatukan dalam bentuk TFN, maka terdapat daerah samar antara durasi optimis, paling mungkin, dan pesimis.

Aktivitas selanjutnya memiliki karakteristik durasi yang berada pada selang waktu [2, 37] dengan nilai paling mungkin yaitu 32. Representasi segitiganya ditunjukkan melalui fungsi segitiga sebagai berikut :

$$\mu(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 27 \\ \frac{t-27}{32-27}, & 27 < t \leq 32 \\ \frac{37-t}{37-32}, & 32 < t < 37 \\ 0, & t \geq 37 \end{cases}$$

Hasil grafik representasi segitiga durasi aktivitas dapat disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4 Visualisasi Grafik Segitiga Aktivitas Pemotongan Pohon Pilihan

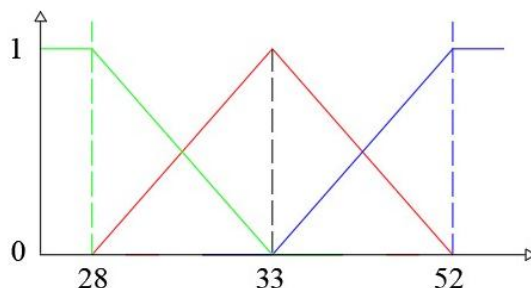
Sumber : Hasil Penelitian (2025)

Gambar 4 menampilkan hasil fungsi keanggotaan (*Triangular Fuzzy Number / TFN*) untuk aktivitas pemotongan pohon pilihan. Fungsi keanggotaan ini tersusun berdasarkan rekapitulasi hasil wawancara responden dimana masing-masing responden mempunyai subyektifitas masing-masing penilaiannya, sehingga apabila disatukan dalam bentuk TFN, maka terdapat daerah samar antara durasi optimis, paling mungkin, dan pesimis.

Pada aktivitas berikutnya, estimasi durasi berada dalam selang waktu [28, 52] dengan nilai paling mungkin yaitu 33. Variasi durasi tersebut direpresentasikan menggunakan grafik segitiga, di mana garis linear naik dari titik a, menuju puncak pada m dan menurun kembali hingga titik b. Hubungan antara ketiga nilai ini digambarkan melalui fungsi segitiga berikut :

$$\mu(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 28 \\ \frac{t-28}{33-28}, & 28 < t \leq 33 \\ \frac{52-t}{52-33}, & 33 < t < 52 \\ 0, & t \geq 52 \end{cases}$$

Hasil grafik representasi segitiga durasi aktivitas dapat disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5 Visualisasi Grafik Segitiga Aktivitas Jembatan Sementara

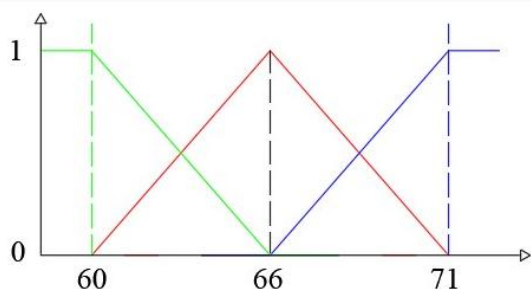
Sumber : Hasil Penelitian (2025)

Gambar 5 menampilkan hasil fungsi keanggotaan (*Triangular Fuzzy Number / TFN*) untuk aktivitas jembatan sementara. Fungsi keanggotaan ini disusun berdasarkan rekapitulasi hasil wawancara responden dimana masing-masing responden mempunyai subyektifitas masing-masing penilaiannya, sehingga apabila disatukan dalam bentuk TFN, maka terdapat daerah samar antara durasi optimis, paling mungkin, dan pesimis.

Aktivitas selanjutnya memiliki karakteristik durasi yang berbeda, dengan estimasi waktu optimis, paling mungkin, dan pesimis berada pada selang [60, 71] dan puncak durasi pada nilai 66. Bentuk variasi durasi aktivitas tersebut direpresentasikan melalui fungsi segitiga sebagai berikut :

$$\mu(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 60 \\ \frac{t-60}{66-60}, & 60 < t \leq 66 \\ \frac{71-t}{71-66}, & 66 < t < 71 \\ 0, & t \geq 71 \end{cases}$$

Hasil grafik representasi segitiga durasi aktivitas dapat disajikan pada Gambar 6.

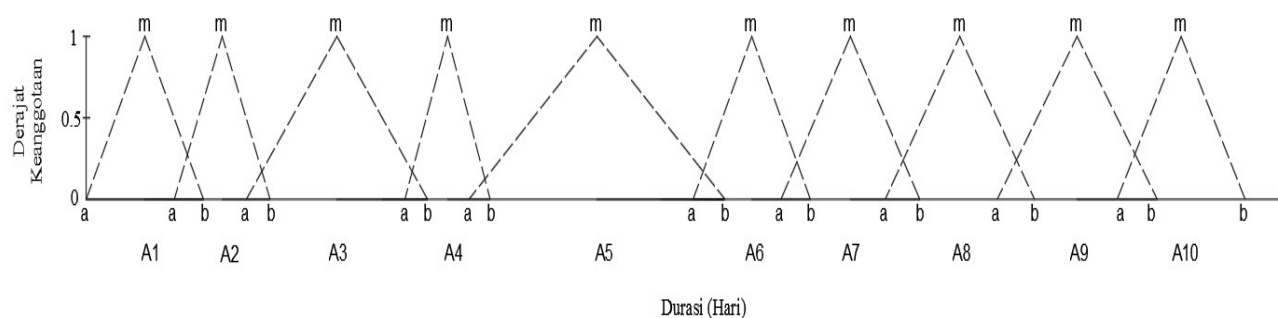


Gambar 6 Visualisasi Grafik Segitiga Aktivitas Galian Biasa

Sumber : Hasil Penelitian (2025)

Gambar 6 menampilkan hasil fungsi keanggotaan (*Triangular Fuzzy Number / TFN*) untuk aktivitas galian biasa. Fungsi keanggotaan ini disusun berdasarkan rekapitulasi hasil wawancara responden dimana masing-masing responden mempunyai subyektifitas masing-masing penilaiannya, sehingga apabila disatukan dalam bentuk TFN, maka terdapat daerah samar antara durasi optimis, paling mungkin, dan pesimis.

Keseluruhan nilai a,m dan b untuk aktivitas lainnya divisualisasikan pada satu grafik representasi gabungan untuk menunjukkan variasi durasi dan tingkat ketidakpastian antar aktivitas yang ditunjukkan pada Gambar 7. Grafik ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai rentang durasi aktivitas proyek.



Gambar 7 Visualisasi Grafik Segitiga untuk Keseluruhan Aktivitas Kritis

Sumber : Hasil Penelitian (2025)

Pada gambar 7 titik a menggambarkan durasi paling cepat yang mungkin terjadi, m adalah durasi yang paling realistis berdasarkan penilaian narasumber, dan b merupakan durasi terlama yang diperkirakan dapat terjadi. Garis naik dari a ke m dan garis turun dari m ke b menunjukkan perubahan derajat keanggotaan dari 0 hingga 1 dan kembali ke 0. Bentuk segitiga ini memberikan gambaran visual bagaimana ketidakpastian durasi terbentuk dan sejauh mana penyebarannya. Berikut merupakan representasi fungsi keanggotaan fuzzy dengan nilai a, m, dan b untuk setiap segitiga:

- A1 Mobilisasi (45, 50, 56 hari) - derajat keanggotaan maksimum pada hari ke -50
- A2 SMK (16, 20, 24 hari) - derajat keanggotaan maksimum pada hari ke -20
- A3 Pemoangan Pohon Dia > 75 cm (27, 32, 37 hari) - derajat keanggotaan maksimum pada hari ke -32
- A4 Jembatan Sementara (28, 33, 52 hari) - derajat keanggotaan maksimum pada hari ke -33
- A5 Galian Biasa (60, 66, 71 hari) - derajat keanggotaan maksimum pada hari ke -66
- A6 Galian Struktur (32, 40, 49 hari) - derajat keanggotaan maksimum pada hari ke -40
- A7 Timbunan Pilihan (57, 63, 69 hari) - derajat keanggotaan maksimum pada hari ke -63
- A8 Lapis Resap Pengikat (17, 22, 25 hari) - derajat keanggotaan maksimum pada hari ke -22
- A9 Lapis Perkat (17, 22, 25 hari) - derajat keanggotaan maksimum pada hari ke -22
- A10 Lapis Laston Antara (AC-BC) (13, 21, 27 hari) - derajat keanggotaan maksimum pada hari ke -21

Pembahasan

Hasil perhitungan PERT menunjukkan bahwa nilai *Expected Time* (TE) dapat digunakan sebagai representatif dalam penyusunan jaringan kerja, di mana aktivitas dengan varians dan standar deviasi lebih tinggi memiliki tingkat ketidakpastian yang lebih besar sehingga berpotensi mempengaruhi durasi total proyek. Visualisasi *triangular fuzzy number* (TFN) yang dibentuk dari nilai a-m-b memperjelas interpretasi tersebut dengan menampilkan rentang durasi dari batas optimis hingga pesimis, semakin lebar bentuk segitiga semakin tinggi ketidakpastian aktivitas. Kombinasi analisis PERT dan representatif *triangular fuzzy number* ini memberikan gambaran kuantitatif sekaligus visual mengenai variasi durasi, sehingga mendukung evaluasi resiko waktu proyek secara lebih komprehensif.

SIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa penerapan metode PERT dengan estimasi tiga titik (a, m, b) mampu memberikan gambaran yang lebih informatif mengenai ketidakpastian durasi aktivitas pada Proyek Pembangunan Jembatan Besuk Ruas BTS Kota Bondowoso-Kab Situbondo. Nilai *Expected Time* (TE) yang dihitung dari estimasi a-m-b dan digunakan dalam penyusunan jaringan kerja menghasilkan durasi total proyek sebesar 170 hari dengan identifikasi aktivitas kritis sebagai penentu jalur penyelesaian. Visualisasi *triangular fuzzy number* yang dibentuk dari nilai a-m-b memperjelas rentang variasi durasi tiap aktivitas dan membantu interpretasi tingkat ketidakpastian durasi. Analisis probabilistik menunjukkan peluang penyelesaian proyek sebesar 70% yang mengindikasikan tingkat ketidakpastian moderat dan dapat dijadikan dasar bagi manajer proyek dalam pengambilan keputusan pengendalian waktu. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melanjutkan analisis hingga tahap defuzzifikasi agar interpretasi durasi dapat diperoleh secara lebih komprehensif pada kondisi ketidakpastian yang lebih tinggi serta mengintegrasikan perangkat lunak untuk meningkatkan akurasi dan replikasi hasil.

DAFTAR PUSTAKA

Ayu Ratna Winanda, L. et al. (2024) "Achieving Green Construction Rating in Building Projects with Fuzzy System Approach," 01024, pp. 1–10.

- Ayu Ratna Winanda, L., Wahyu Adi, T. and Anwar, N. (2019) "Monitoring Keselamatan Pekerja Konstruksi dengan Pendekatan Fuzzy Logic," *Prokons : Jurnal Teknik Sipil*, 12(1), pp. 23–29.
- Dwiretnani, A., Handayani, E. and Saputra, N. (2023) "Evaluasi Penjadwalan Waktu Proyek Pembangunan Gedung Menggunakan *Critical Path Method* (CPM) Annisaa," *Jurnal Talenta Sipil*, 6(1995), pp. 391–400. Available at: <https://doi.org/10.33087/talentsipil.v6i2.334>.
- Faisal, Ingsih, I.S. and Aasniari (2025) "Analisis Penjadwalan Proyek Konstruksi dengan Menggunakan Metode *Project Evaluation Review Technique* (PERT) dan *Critical Path Method* (CPM) pada Proyek Pembangunan Gedung Riset dan Inovasi Ilmu Komputer Universitas Brawijaya Tahap 1," *Jurnal Rekayasa Sipil*, 15(2), pp. 311–318.
- Firdaus, R.S. and Hermawan, H. (2025) "Analysis and Application of Construction Management in The Waled-Ciledug BTS Road Reconstruction Project," *Jurnal Syntax Transformation*, 6(3), pp. 129–143.
- Hajdu, M. and Bokor, O. (2014) "The Effects of Different Activity Distributions on Project Duration in PERT Networks," *Elsevier*, 119, pp. 766–775. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.03.086>.
- Kurniawan, B.N. and Mulyono, N.B. (2024) "Minimizing Delay in Construction Project at PT Freeport Indonesia using Crashing CPM-PERT Approach and Monte Carlo Simulation," *European jurnal*, 9(5), pp. 61–69.
- Ma'ruf, A., Kartika, D. and Yuwono, E. (2023) "Decision Support in Asphalt Production with Triangular Fuzzy Number," *Quest Journals*, 8(2), pp. 87–93.
- Ma'ruf, A. and Marianti, A. (2022) "Optimasi produksi aspal hotmix dengan pendekatan triangular fuzzy number," in. *Semsina 2022*, pp. 98–105.
- Made Asna, I. and Gede Angga Diputera, I. (2021) "Evaluasi Pelelangan Proyek Konstruksi dengan Aplikasi Metode Fuzzy Set," *Jurnal Ilmiah Kurva Teknik*, 10(2), pp. 8–17.
- Musyafir, Irawan, D. and Aditya, C. (2025) "Penerapan Metode PERT dan CPM untuk Mencapai Efektivitas Waktu dan Biaya Penyelesaian Proyek," *Bouwplank : Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan*, 5(1).
- Nanda, M.P., Kurniawati, M. and Riswanto, S. (2023) "Penggunaan Metode *Project Evaluation Review Technique* (PERT) dalam Evaluasi Perencanaan," *Jurnal Teknik Sipil*, 17(3), pp. 163–173. Available at: <https://doi.org/10.24002/jts.v17i3.7181>.
- Rolobessy, A.R.P., Djakfar, L. and Negara, K.P. (2025) "Assesment Of Schedule Uncertainty and Risk Mitigation," *Jurnal Pensil : Pendidikan Teknik Sipil*, 14, pp. 440–455. Available at: <https://doi.org/10.21009/jpensil.v14i3.59011>.
- Roos, E. and Hertog, D. Den (2021) "A Distributionally Robust Analysis of the Program Evaluation and Review Technique," *European Journal of Operational Research*, 291(3), pp. 918–928. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.09.027>.
- Rosalinda et al. (2023) "Analysis of Project Time and Cost Control With CPM , PERT and Crashing Project Methods in Shop Building Projects at CV . Mentari Permai," *Scientific Journal of Reflection*, 6(1), pp. 85–94.
- Santoso, F.W., Handayani, F.S. and Setiono (2025) "A Comparative Analysis of the CPM and PERT Methods in Project Time Management for a High-Rise Building Construction Project in Yogyakarta," *Sustainable Civil Building Management and Engineering Journal*, (2), pp. 1–13.
- Wahyudiono, S. and Utari, R.P. (2022) "Analisis Terkait Penggunaan *Program Evaluation and Review Technique* (PERT) pada Pemeliharaan Gedung (Studi Kasus : GKB 1 UMM Malang)," *Media Teknik Sipil*, 20(2), pp. 53–58.