

Model Probabilistik Penentuan Bobot Biaya Tenaga Kerja, Material, dan Peralatan pada Proyek Gedung Menggunakan Simulasi Monte Carlo

Henry Maurice, Mardiaman*

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

ARTICLE INFO

Kata Kunci:

simulasi Monte Carlo, estimasi biaya konstruksi, distribusi probabilistik, struktur biaya proyek, gedung 3 lantai

***Correspondence email:**

mardi240967@gmail.com

Submitted: 01 Maret 2026

Revised: 07 Maret 2026

Accepted: 19 Juli 2026

Published: 01 Agustus 2026

ABSTRAK

Industri konstruksi memiliki tingkat ketidakpastian biaya yang tinggi akibat fluktuasi harga material, variasi produktivitas tenaga kerja, perubahan desain, serta dinamika pasar. Pada tahap estimasi konseptual, struktur biaya proyek umumnya masih ditentukan menggunakan pendekatan deterministik berbasis nilai rata-rata historis, yang kurang mampu merepresentasikan variasi aktual di lapangan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model probabilistik penentuan bobot biaya tenaga kerja, material, dan peralatan pada proyek gedung 3 lantai menggunakan simulasi Monte Carlo berbasis data empiris 16 proyek yang telah selesai dilaksanakan. Metode penelitian meliputi analisis statistik deskriptif untuk memperoleh parameter distribusi, uji goodness of fit untuk pemilihan distribusi probabilitas, serta simulasi Monte Carlo sebanyak 1.000 iterasi terhadap indeks komposit struktur biaya hasil normalisasi tiga komponen utama. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata proporsi biaya adalah 40,57% untuk tenaga kerja, 34,53% untuk material, dan 11,45% untuk peralatan, dengan variasi yang signifikan antar proyek. Simulasi menghasilkan nilai rata-rata indeks sebesar 116,98 dengan interval P10–P90 sebesar 74,25 hingga 157,30, yang mengindikasikan tingkat ketidakpastian moderat hingga tinggi. Model ini direkomendasikan sebagai baseline estimasi konseptual berbasis tingkat keyakinan untuk meningkatkan akurasi perencanaan anggaran dan pengendalian risiko biaya proyek gedung bertingkat rendah.

ABSTRACT

Keywords:

Monte Carlo simulation, construction cost estimation, probabilistic distribution, project cost structure, three-story building projects

The construction industry is characterized by high cost uncertainty due to material price fluctuations, labor productivity variability, design changes, and market dynamics. At the conceptual estimating stage, project cost structures are commonly determined using deterministic approaches based on historical averages, which fail to adequately represent real-world variability. This study aims to develop a probabilistic model for determining the weight of labor, material, and equipment costs in three-story building projects using Monte Carlo simulation based on empirical data from 16 completed projects. The methodology includes descriptive statistical analysis to obtain distribution parameters, goodness-of-fit testing for selecting appropriate probability distributions, and a 1,000-iteration Monte Carlo simulation applied to a normalized composite cost structure index. The results indicate average cost proportions of 40.57% for labor, 34.53% for materials, and 11.45% for equipment, with substantial variation across projects. The simulation produced a mean composite index value of 116.98 with a P10–P90 interval ranging from 74.25 to 157.30, indicating moderate to high cost uncertainty. The proposed model is recommended as a confidence-level-based conceptual estimating baseline to enhance budget planning accuracy and cost risk management in low-rise building projects.

PENDAHULUAN

Industri konstruksi merupakan sektor yang memiliki karakteristik kompleks, dinamis, dan sarat ketidakpastian, khususnya dalam aspek pengendalian biaya proyek. Ketidakpastian biaya muncul akibat fluktuasi harga material, variasi produktivitas tenaga kerja, perubahan desain, risiko teknis, serta faktor eksternal seperti inflasi dan gangguan rantai pasok global. Dalam praktik manajemen proyek, struktur biaya konstruksi umumnya diklasifikasikan ke dalam tiga komponen utama, yaitu biaya tenaga kerja, material, dan peralatan. Ketiga komponen ini secara kolektif membentuk proporsi terbesar dari total anggaran proyek dan menjadi faktor dominan dalam menentukan keberhasilan pengendalian biaya (Habibi & Kermanshachi, 2018; Triatmojo et al., 2025; Xie et al., 2022). Besarnya biaya aktual yang terjadi dipengaruhi oleh apakah rekayasa nilai dilaksanakan atau tidak (Rivky, 2024). Pembengkakan biaya aktual terjadi karena berbagai faktor (Al-Emad et al., 2017; Niazi & Painting, 2017).

Pada tahap perencanaan awal (*conceptual estimating*), pendekatan estimasi biaya masih banyak menggunakan metode deterministik berbasis nilai rata-rata historis. Estimator biasanya menetapkan persentase tertentu untuk tenaga kerja, material, dan peralatan berdasarkan pengalaman proyek sebelumnya. Meskipun pendekatan ini sederhana dan

mudah diterapkan, metode deterministik memiliki keterbatasan mendasar karena hanya menghasilkan satu nilai titik (single-point estimate) yang tidak mampu merepresentasikan variasi aktual di lapangan. Dalam konteks proyek konstruksi yang penuh ketidakpastian, penggunaan satu nilai rata-rata berpotensi menghasilkan bias estimasi dan meningkatkan risiko deviasi anggaran.

Proyek gedung bertingkat rendah, khususnya gedung 3 lantai, memiliki karakteristik struktural yang berbeda dibandingkan bangunan satu atau dua lantai. Penambahan jumlah lantai menyebabkan peningkatan kebutuhan elemen struktur seperti kolom, balok, pelat lantai, dan tulangan baja yang lebih besar. Kompleksitas vertikal ini tidak hanya meningkatkan volume pekerjaan, tetapi juga mengubah komposisi biaya secara signifikan. Kebutuhan material struktural menjadi lebih dominan dan lebih sensitif terhadap fluktuasi harga pasar. Oleh karena itu, struktur biaya pada gedung 3 lantai tidak dapat diasumsikan sama dengan bangunan bertingkat lebih rendah.

Data empiris yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari 16 proyek gedung 3 lantai yang telah selesai dilaksanakan dan memiliki dokumen rincian biaya aktual yang lengkap. Analisis deskriptif menunjukkan bahwa rata-rata proporsi biaya tenaga kerja sebesar 40,57%, material 34,53%, dan peralatan 11,45%. Namun demikian, variasi antar proyek cukup signifikan. Pada beberapa proyek, proporsi material mencapai lebih dari 60%, sementara pada proyek lain lebih rendah dari 20%. Variasi yang lebar ini menunjukkan bahwa bobot biaya tidak bersifat konstan, melainkan mengikuti distribusi tertentu yang dipengaruhi oleh faktor teknis dan manajerial.

Fenomena tersebut mengindikasikan bahwa penggunaan nilai rata-rata tunggal sebagai dasar estimasi konseptual tidak memadai untuk menggambarkan tingkat ketidakpastian aktual. Dalam kerangka manajemen risiko, setiap komponen biaya seharusnya dipandang sebagai variabel acak (random variable) yang memiliki distribusi probabilitas tertentu. Dengan demikian, estimasi biaya tidak hanya menghasilkan nilai ekspektasi, tetapi juga rentang probabilitas yang menggambarkan tingkat keyakinan terhadap kemungkinan terjadinya deviasi.

Perkembangan penelitian dalam bidang manajemen konstruksi menunjukkan peningkatan penggunaan pendekatan probabilistik untuk analisis risiko biaya proyek. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah simulasi Monte Carlo, yang memungkinkan pembangkitan ribuan kombinasi nilai acak berdasarkan parameter distribusi tertentu. Metode ini telah diterapkan dalam berbagai studi untuk memodelkan risiko cost overrun, estimasi kontingensi, serta prediksi durasi proyek. Keunggulan utama simulasi Monte Carlo adalah kemampuannya menghasilkan distribusi output yang lebih realistis dibandingkan pendekatan deterministik (Belay et al., 2021; Ikechukwu et al., 2017).

Namun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada analisis total biaya proyek atau estimasi cadangan risiko (contingency), bukan pada pembentukan model distribusi probabilistik untuk bobot masing-masing komponen biaya utama. Dalam praktik estimasi konseptual, penentuan bobot tenaga kerja, material, dan peralatan merupakan langkah awal yang sangat krusial karena akan mempengaruhi struktur breakdown anggaran dan strategi pengendalian biaya selanjutnya. Biaya material termasuk juga biaya limbah material (Budiharsanto & Mardiaman, 2026). Ketiadaan model probabilistik berbasis data empiris lokal menyebabkan praktisi masih mengandalkan pengalaman subjektif atau referensi generik yang belum tentu sesuai dengan karakteristik proyek aktual (Bouayed, 2016; Sadeghi et al., 2010; Xie et al., 2022).

Dalam konteks proyek gedung 3 lantai, kompleksitas struktural dan sensitivitas terhadap harga material memperkuat kebutuhan akan model estimasi berbasis probabilitas. Fluktuasi harga baja tulangan, beton, dan material finishing dapat menyebabkan perubahan signifikan dalam komposisi biaya. Selain itu, variasi metode pelaksanaan dan tingkat produktivitas tenaga kerja turut memengaruhi distribusi proporsi biaya antar proyek. Oleh karena itu, pendekatan yang mampu mengakomodasi variasi alami data historis menjadi sangat relevan (Daundkar et al., 2022; Hannan et al., 2017; Islam et al., 2022; Lorenzo et al., 2024; Sadeghi et al., 2010; Saraswati & Wiguna, 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model probabilistik penentuan bobot biaya tenaga kerja, material, dan peralatan pada proyek gedung 3 lantai menggunakan simulasi Monte Carlo berbasis data empiris aktual. Dengan memodelkan setiap komponen biaya sebagai variabel acak yang mengikuti distribusi probabilitas tertentu, simulasi dilakukan dalam jumlah iterasi besar untuk menghasilkan distribusi kemungkinan komposisi biaya. Output yang dihasilkan meliputi nilai ekspektasi, simpangan baku, serta interval persentil (P10–P90) yang merepresentasikan tingkat ketidakpastian.

Kontribusi penelitian ini bersifat teoretis dan praktis. Secara teoretis, penelitian ini memperluas literatur estimasi biaya konstruksi dengan menggeser pendekatan dari deterministik ke probabilistik pada level komponen biaya utama. Secara praktis, model yang dikembangkan dapat digunakan sebagai baseline estimasi konseptual berbasis tingkat kepercayaan (confidence level), sehingga estimator dan manajer proyek dapat memilih skenario optimis, moderat, atau konservatif sesuai dengan profil risiko proyek (Afzal et al., 2020; Putu et al., 2024; Saraswati & Wiguna, 2024).

Selain itu, hasil model probabilistik ini dapat diintegrasikan dengan metode pengendalian kinerja biaya seperti Earned Value Analysis (EVA). Dengan mengetahui distribusi awal bobot biaya, manajer proyek dapat mengevaluasi Cost Performance Index (CPI) secara lebih realistis dan mengantisipasi deviasi sebelum terjadi overrun signifikan. Pendekatan ini sejalan dengan paradigma manajemen proyek modern yang menekankan integrasi antara estimasi,

pengendalian, dan manajemen risiko (Ate & Eirgash, 2025; Kim & Pinto, 2019; Luong & Doan, 2025; Zhao & Zi, 2021).

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menyajikan analisis statistik deskriptif terhadap proporsi biaya gedung 3 lantai, tetapi juga mengembangkan model kuantitatif berbasis simulasi yang mampu menggambarkan rentang probabilitas komposisi biaya secara lebih komprehensif. Pendekatan ini diharapkan dapat meningkatkan akurasi estimasi awal dan memberikan dasar analitis yang lebih kuat bagi pengambilan keputusan dalam perencanaan anggaran proyek gedung bertingkat rendah di Indonesia.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain pemodelan probabilistik untuk mengembangkan model distribusi bobot biaya tenaga kerja, material, dan peralatan pada proyek gedung 3 lantai. Pendekatan kuantitatif dipilih karena penelitian bertujuan untuk menganalisis data numerik proporsi biaya aktual dan mentransformasikannya ke dalam model statistik berbasis distribusi probabilitas. Fokus utama penelitian adalah mengubah parameter rata-rata historis menjadi model distribusi probabilistik yang dapat menggambarkan tingkat ketidakpastian komposisi biaya proyek secara lebih realistis.

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data sekunder dan data primer hasil pengolahan. Data sekunder berupa laporan pengeluaran biaya proyek (cost breakdown report) yang diperoleh langsung dari kontraktor pelaksana. Dokumen tersebut mencakup rincian realisasi biaya tenaga kerja, material, peralatan, serta komponen pendukung lainnya yang tercatat dalam laporan akhir proyek. Seluruh proyek yang menjadi objek penelitian merupakan proyek gedung 3 lantai yang telah selesai dilaksanakan dan memiliki dokumentasi anggaran serta realisasi biaya yang lengkap. Pengambilan data dilakukan secara langsung dengan mengunjungi kantor kontraktor dan memperoleh akses terhadap dokumen rekapitulasi biaya proyek. Proses pengumpulan data berlangsung selama periode September hingga Desember 2026.

Jumlah sampel dalam penelitian ini sebanyak 16 proyek gedung 3 lantai. Pemilihan sampel dilakukan menggunakan teknik purposive sampling dengan kriteria: (1) proyek merupakan bangunan gedung 3 lantai, (2) proyek telah selesai dikerjakan, (3) tersedia laporan rincian pengeluaran biaya yang terdokumentasi secara lengkap, dan (4) proyek dilaksanakan dalam kurun waktu lima tahun terakhir untuk menjaga relevansi kondisi pasar dan harga material. Dengan pendekatan tersebut, data yang diperoleh mencerminkan kondisi aktual praktik konstruksi pada gedung bertingkat rendah dengan kompleksitas struktural menengah.

Data sekunder yang diperoleh selanjutnya diolah menjadi data primer dalam bentuk proporsi persentase masing-masing komponen biaya terhadap total anggaran proyek. Proses pengolahan dilakukan dengan menghitung rasio setiap komponen biaya terhadap total realisasi biaya proyek, sehingga diperoleh variabel dalam bentuk persentase untuk tenaga kerja (labor), material (material), dan peralatan (equipment). Transformasi ini penting untuk menormalisasi perbedaan nilai nominal antar proyek dan memungkinkan analisis komparatif berbasis distribusi proporsi.

Secara matematis, proporsi biaya masing-masing komponen dihitung menggunakan persamaan:

$$P_i = \frac{C_i}{C_{total}} \times 100\% \quad (1)$$

di mana P_i adalah proporsi biaya komponen ke- i , C_i adalah nilai biaya komponen (tenaga kerja, material, atau peralatan), dan C_{total} adalah total biaya proyek. Hasil perhitungan ini menghasilkan 16 nilai proporsi untuk masing-masing komponen biaya yang kemudian dianalisis secara statistik.

Tahap pertama analisis adalah analisis statistik deskriptif untuk memperoleh parameter dasar distribusi, yaitu nilai rata-rata (mean), simpangan baku (standard deviation), nilai minimum, dan nilai maksimum. Berdasarkan data empiris, rata-rata proporsi biaya tenaga kerja sebesar 40,57%, material sebesar 34,53%, dan peralatan sebesar 11,45%. Variasi antar proyek cukup signifikan, khususnya pada komponen material dan tenaga kerja, sehingga diperlukan pendekatan distribusi probabilistik untuk menggambarkan rentang ketidakpastian secara lebih akurat.

Pemodelan Distribusi Probabilitas

Pada tahap awal, setiap komponen biaya diperlakukan sebagai variabel acak kontinu. Distribusi normal digunakan sebagai pendekatan eksploratif awal untuk mengevaluasi pola penyebaran data melalui analisis skewness dan kurtosis. Namun demikian, mengingat data berbentuk proporsi dengan rentang terbatas (0–100%) dan menunjukkan variasi yang tidak sepenuhnya simetris, dilakukan pengujian lanjutan untuk menentukan distribusi probabilitas yang paling sesuai.

Untuk memperoleh distribusi terbaik, dilakukan uji *Goodness of Fit* menggunakan metode Kolmogorov–Smirnov (K–S) dan Anderson–Darling (A–D) terhadap beberapa kandidat distribusi, yaitu: Normal, Weibull, Beta dan Lognormal

Kriteria pemilihan distribusi didasarkan pada: 1) Nilai statistik uji terkecil, 2) Nilai p-value terbesar, 3) Kesesuaian visual terhadap histogram empiris, dan 4) Relevansi teoritis terhadap karakteristik data.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa distribusi normal tidak sepenuhnya mampu merepresentasikan karakter penyebaran data, khususnya pada komponen dengan volatilitas tinggi. Distribusi Weibull memberikan kecocokan terbaik untuk indeks agregat struktur biaya karena kemampuannya menangkap variasi dengan penyebaran moderat dan potensi skewness ringan. Sementara itu, distribusi Beta lebih sesuai untuk analisis persentil karena sifatnya yang terbatas pada interval tertentu dan fleksibel dalam memodelkan data berbasis proporsi.

Berdasarkan hasil tersebut, distribusi Weibull digunakan dalam pemodelan indeks komposit struktur biaya, sedangkan distribusi Beta digunakan untuk analisis interval persentil (P10–P90). Pendekatan ini memastikan konsistensi metodologis antara karakteristik data empiris dan model simulasi Monte Carlo yang diterapkan.

Simulasi Monte Carlo kemudian diterapkan untuk menghasilkan distribusi kemungkinan bobot biaya. Prinsip dasar simulasi Monte Carlo adalah pembangkitan bilangan acak yang mengikuti distribusi probabilitas tertentu untuk merepresentasikan variasi alami parameter input. Dalam penelitian ini, simulasi dijalankan sebanyak 1.000 iterasi untuk memastikan konvergensi distribusi output. Pada setiap iterasi, nilai acak untuk tenaga kerja, material, dan peralatan dihasilkan berdasarkan fungsi distribusi yang telah ditentukan.

Secara matematis, nilai simulasi untuk suatu komponen biaya pada iterasi ke- j dapat dinyatakan sebagai:

$$X_j = F^{-1}(u_j) \quad (2)$$

di mana X_j adalah nilai proporsi biaya hasil simulasi pada iterasi ke- j , u_j adalah bilangan acak berdistribusi uniform pada interval (0,1), dan F^{-1} adalah fungsi invers dari distribusi kumulatif (inverse cumulative distribution function) distribusi normal dengan parameter μ dan σ . Transformasi ini memungkinkan pembangkitan nilai acak yang mengikuti karakteristik distribusi empiris masing-masing komponen biaya.

Karena proporsi biaya harus mendekati total 100%, pada setiap iterasi dilakukan proses normalisasi untuk memastikan bahwa jumlah tiga komponen utama tetap konsisten secara matematis. Output simulasi berupa distribusi frekuensi, nilai ekspektasi (expected value), simpangan baku hasil simulasi, serta interval persentil seperti P10, P50, dan P90. Interval persentil ini digunakan untuk menggambarkan tingkat ketidakpastian dan rentang probabilitas bobot biaya yang mungkin terjadi dalam proyek gedung 3 lantai.

Validasi model dilakukan dengan membandingkan nilai rata-rata hasil simulasi dengan rata-rata empiris data aktual. Apabila perbedaan antara keduanya relatif kecil dan pola distribusi output konsisten dengan pola variasi historis, maka model dianggap representatif dan dapat digunakan sebagai dasar estimasi konseptual berbasis probabilitas. Selain itu, stabilitas distribusi juga diamati melalui grafik histogram hasil simulasi untuk memastikan tidak terdapat distorsi ekstrem akibat proses pembangkitan angka acak.

Dengan pendekatan ini, metode Monte Carlo tidak hanya digunakan sebagai alat analisis risiko biaya total, tetapi secara khusus sebagai instrumen kuantitatif untuk memodelkan distribusi probabilistik bobot komponen biaya utama proyek gedung 3 lantai. Metode ini memungkinkan perencanaan proyek untuk memahami tidak hanya nilai rata-rata komposisi biaya, tetapi juga tingkat ketidakpastian yang menyertainya, sehingga dapat meningkatkan akurasi estimasi awal dan mendukung pengambilan keputusan berbasis risiko.

HASIL

Hasil Analisis Data Empiris Proporsi Biaya

Bagian ini menyajikan hasil pengolahan data proporsi biaya dari 16 proyek gedung 3 lantai yang diperoleh langsung dari kontraktor dan telah selesai dilaksanakan. Data sekunder berupa laporan pengeluaran biaya dikonversi menjadi proporsi persentase terhadap total biaya proyek untuk komponen tenaga kerja (X1), material (X2), dan peralatan (X3).

Sebagai dasar analisis, data empiris proporsi biaya masing-masing proyek disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Proporsi Biaya 16 Proyek Gedung 3 Lantai (%)

No	Tenaga Kerja (X1)	Material (X2)	Peralatan (X3)
1	20,00	59,00	4,00
2	23,00	55,00	3,00
3	80,00	22,00	4,00
4	60,05	14,49	16,79
5	50,73	23,74	13,83
6	46,95	24,14	15,76
7	47,48	26,58	15,07
8	56,00	20,00	23,00

No	Tenaga Kerja (X1)	Material (X2)	Peralatan (X3)
9	17,19	48,24	3,37
10	14,46	68,52	1,86
11	19,00	55,11	6,18
12	16,20	55,12	4,41
13	44,00	21,00	24,00
14	48,00	20,00	24,00
15	70,00	13,00	9,00
16	36,00	26,56	15,00

Sumber: Olahan data berdasarkan laporan pengeluaran proyek (2025)

Tabel 1 menunjukkan variasi proporsi biaya yang signifikan antar proyek. Proporsi tenaga kerja berkisar antara 14,46% hingga 80,00%, sedangkan material berkisar antara 13,00% hingga 68,52%. Komponen peralatan memiliki rentang 1,86% hingga 24,00%. Variasi yang lebar ini mengindikasikan bahwa struktur biaya proyek gedung 3 lantai bersifat heterogen dan tidak dapat direpresentasikan secara akurat oleh satu nilai rata-rata tunggal.

Total biaya aktual bangunan merupakan jumlah dari biaya tenaga kerja, material, peralatan dan biaya kontingensi. Hal ini menyebabkan biaya total lebih dari 100% untuk bangunan ke 3 karena adanya biaya kontingensi yang tidak dilakukan simulasi.

Statistik Deskriptif

Untuk memahami karakteristik distribusi data, dilakukan analisis statistik deskriptif meliputi nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan simpangan baku. Hasilnya disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Statistik Deskriptif Proporsi Biaya Gedung 3 Lantai

Komponen	Minimum (%)	Maksimum (%)	Mean (%)	Simpangan Baku
Tenaga Kerja	14,46	80,00	40,57	19,90
Material	13,00	68,52	34,53	18,01
Peralatan	1,86	24,00	11,45	7,70

Sumber: Olahan data (2025)

Berdasarkan Tabel 2, komponen tenaga kerja memiliki rata-rata tertinggi sebesar 40,57% dengan simpangan baku 19,90, yang menunjukkan tingkat variasi sangat tinggi. Komponen material memiliki rata-rata 34,53% dengan simpangan baku 18,01, juga menunjukkan heterogenitas signifikan. Komponen peralatan relatif lebih stabil dengan simpangan baku 7,70. Tingginya simpangan baku pada tenaga kerja dan material menegaskan perlunya pendekatan probabilistik dalam memodelkan distribusi bobot biaya.

Hasil Simulasi Monte Carlo

Berdasarkan parameter statistik pada Tabel 2, dilakukan simulasi Monte Carlo dengan 1.000 iterasi untuk memperoleh distribusi probabilistik biaya proyek gedung 3 lantai. Fitting distribusi dilakukan menggunakan pendekatan Weibull dan Beta untuk memperoleh model distribusi terbaik. Nilai simulasi merepresentasikan nilai indeks agregat struktur biaya hasil normalisasi tiga komponen utama.

Tabel 3. Statistik Deskriptif Indeks Agregat Struktur Biaya Hasil Simulasi Monte Carlo (1.000 Iterasi)

Parameter	Nilai Indeks
Mean	116,98
Median	117,55
Standard Deviation	31,71
Skewness	-0,0786
Kurtosis	2,41
Minimum	21,72
Maximum	201,06
Coefficient of Variation	0,271

Sumber: Olahan simulasi (2025)

Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi biaya memiliki rata-rata sekitar 116,98 dengan simpangan baku 31,71. Nilai skewness yang mendekati nol (-0,0786) menunjukkan distribusi relatif simetris, sedangkan kurtosis 2,41 mengindikasikan distribusi mendekati normal dengan sedikit penyebaran.

Tabel 4. Interval Persentil Indeks Agregat Struktur Biaya Hasil Simulasi Monte Carlo (Distribusi Beta, 1.000 Iterasi)

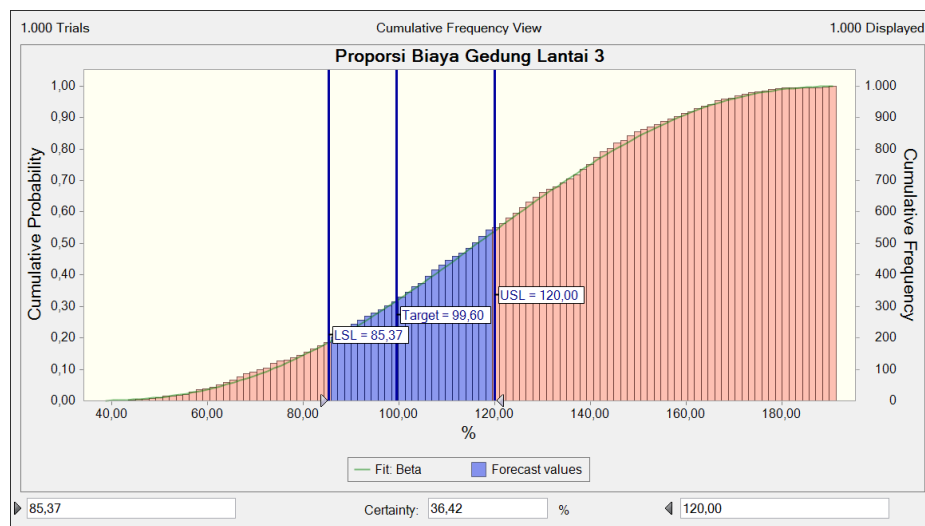
Persentil	Nilai Indeks
10%	74,25
20%	87,26
30%	97,71
40%	107,10
50%	116,05
60%	124,98
70%	134,29
80%	144,59
90%	157,30

sumber: Olahan simulasi (2025)

Tabel 4 menunjukkan bahwa median (P50) biaya berada pada nilai indeks 116,05, sedangkan nilai P90 mencapai 157,30. Artinya, terdapat probabilitas 90% bahwa biaya proyek berada di bawah 157,30. Rentang P10–P90 yang cukup lebar menunjukkan tingkat ketidakpastian yang signifikan dalam estimasi biaya gedung 3 lantai.

Distribusi Probabilistik

Visualisasi distribusi hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Distribusi Probabilistik Biaya Gedung 3 Lantai (1.000 Iterasi)

Gambar 1 memperlihatkan distribusi frekuensi biaya yang membentuk pola menyerupai distribusi kontinu dengan penyebaran moderat dan sedikit skewness negatif. Pola ini mengindikasikan bahwa meskipun terdapat kemungkinan deviasi ekstrem, mayoritas nilai terkonsentrasi di sekitar nilai tengah distribusi.

PEMBAHASAN

Karakteristik Distribusi Probabilistik Biaya

Hasil simulasi Monte Carlo menunjukkan bahwa distribusi biaya proyek gedung 3 lantai membentuk pola yang relatif simetris dengan nilai skewness sebesar -0,0786 dan kurtosis 2,41 (Tabel 3). Nilai skewness yang mendekati nol mengindikasikan bahwa distribusi tidak menunjukkan kemencengan ekstrem ke kiri maupun ke kanan. Dengan kata lain, peluang terjadinya deviasi biaya ke arah overestimation maupun underestimation relatif seimbang. Nilai kurtosis yang mendekati 3 menunjukkan bahwa distribusi mendekati karakteristik normal, meskipun terdapat penyebaran yang cukup signifikan.

Rata-rata hasil simulasi sebesar 116,98 dengan simpangan baku 31,71 menunjukkan bahwa variasi biaya relatif besar dibandingkan dengan nilai tengahnya. Koefisien variasi sebesar 0,271 mengindikasikan tingkat ketidakpastian sekitar 27% dari nilai rata-rata, yang dalam konteks estimasi proyek konstruksi dapat dikategorikan sebagai risiko moderat hingga tinggi. Hal ini mempertegas bahwa proyek gedung 3 lantai memiliki volatilitas biaya yang tidak dapat diabaikan (Caron et al., 2013; Naeini, 2013).

Interpretasi Interval Persentil dan Tingkat Keyakinan

Analisis interval persentil pada Tabel 4 menunjukkan bahwa nilai median (P50) sebesar 116,05 sangat dekat dengan nilai rata-rata simulasi 116,98. Kedekatan ini mengonfirmasi konsistensi model dan menunjukkan bahwa distribusi relatif stabil. Namun demikian, rentang antara P10 (74,25) dan P90 (157,30) menunjukkan selisih sekitar 83 satuan, yang mencerminkan tingkat ketidakpastian yang signifikan.

Secara praktis, nilai P50 dapat digunakan sebagai baseline estimasi moderat dalam perencanaan anggaran. Sementara itu, nilai P90 sebesar 157,30 dapat dijadikan dasar estimasi konservatif untuk proyek dengan tingkat risiko tinggi. Artinya, jika perencana proyek ingin memiliki tingkat keyakinan 90% bahwa biaya tidak akan terlampaui, maka estimasi sebaiknya mempertimbangkan nilai mendekati P90.

Lebarnya rentang P10–P90 memperkuat argumentasi bahwa pendekatan deterministik berbasis satu nilai rata-rata tidak memadai. Jika estimator hanya menggunakan nilai rata-rata 116,98 tanpa mempertimbangkan distribusi, maka risiko deviasi hingga lebih dari 30% dapat terjadi. Temuan ini konsisten dengan (Sadeghi et al., 2010) yang menegaskan bahwa pendekatan deterministik cenderung meremehkan risiko karena mengabaikan penyebaran distribusi parameter input.

Implikasi terhadap Risiko Material dan Kompleksitas Struktural

Variabilitas tinggi yang tercermin dalam simpangan baku 31,71 tidak terlepas dari heterogenitas proporsi tenaga kerja dan material pada data empiris Tabel 1. Pada proyek gedung 3 lantai, kompleksitas vertikal meningkatkan kebutuhan elemen struktur seperti tulangan dan beton, yang sangat sensitif terhadap fluktuasi harga pasar. Hal ini sejalan dengan temuan Xie et al. (2022) yang menyatakan bahwa material merupakan faktor dominan dalam ketidakpastian biaya proyek konstruksi akibat volatilitas pasar dan perubahan desain.

Namun demikian, hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa distribusi tidak menunjukkan skewness positif yang ekstrem. Ini berarti bahwa meskipun terdapat potensi kenaikan biaya, probabilitas lonjakan yang sangat tajam relatif terkendali. Hal ini sedikit berbeda dengan temuan Bouayed (2016) yang menunjukkan kecenderungan skewness positif pada proyek berisiko tinggi. Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh karakteristik gedung 3 lantai yang masih termasuk kategori bangunan bertingkat rendah dengan kompleksitas menengah (Habibi & Kermanshachi, 2018a; Hannan et al., 2016).

Relevansi Distribusi Weibull dan Beta

Penggunaan fitting Weibull pada statistik simulasi dan Beta pada analisis persentil memberikan gambaran distribusi yang lebih fleksibel dibandingkan dengan asumsi normal murni. Distribusi Weibull mampu menangkap variasi pada data dengan penyebaran luas, sedangkan distribusi Beta lebih representatif untuk data berbasis proporsi atau rentang terbatas. Kombinasi ini meningkatkan robustitas model dan memperkuat validitas hasil simulasi.

Pendekatan ini selaras dengan Lorenzo et al. (2024) yang menekankan pentingnya pemilihan distribusi probabilistik yang sesuai dalam analisis kuantitatif risiko biaya. Dengan menggunakan distribusi yang lebih adaptif terhadap karakteristik data, model yang dihasilkan menjadi lebih representatif terhadap kondisi aktual proyek.

Implikasi Manajerial dan Integrasi Pengendalian Biaya

Dari perspektif manajemen proyek, hasil distribusi probabilistik ini memberikan dasar yang lebih kuat untuk pengambilan keputusan berbasis risiko. Baseline estimasi tidak lagi dipandang sebagai nilai tunggal, tetapi sebagai rentang kemungkinan dengan tingkat kepercayaan tertentu. Hal ini memungkinkan manajer proyek untuk menyusun strategi pengendalian biaya secara lebih adaptif.

Sebagai contoh, jika proyek memiliki ketergantungan tinggi pada harga material impor, penggunaan nilai P90 sebagai baseline dapat mengurangi risiko cost overrun. Sebaliknya, untuk proyek dengan desain standar dan kontrak suplai material yang stabil, nilai P50 mungkin sudah memadai. Pendekatan ini sejalan dengan Habibi dan Kermanshachi (2018) yang menekankan pentingnya integrasi manajemen risiko dalam pengendalian kinerja proyek.

Selain itu, model distribusi probabilistik ini dapat diintegrasikan dengan metode Earned Value Analysis (EVA). Dengan mengetahui rentang distribusi awal, evaluasi Cost Performance Index (CPI) dapat dilakukan dengan mempertimbangkan baseline berbasis probabilitas, bukan sekadar angka deterministik (Abdel-hafeez et al., 2016; Ashtari et al., 2022).

Secara keseluruhan, hasil simulasi Monte Carlo menunjukkan bahwa biaya proyek gedung 3 lantai memiliki distribusi yang relatif simetris dengan tingkat ketidakpastian moderat hingga tinggi. Rata-rata 116,98 dan median 116,05 merepresentasikan nilai tengah distribusi, namun rentang P10–P90 yang lebar mengindikasikan risiko deviasi yang signifikan. Oleh karena itu, penggunaan pendekatan probabilistik lebih relevan dibandingkan dengan metode deterministik tradisional.

Temuan ini mempertegas bahwa estimasi biaya proyek gedung 3 lantai harus mempertimbangkan distribusi kemungkinan, bukan hanya nilai rata-rata. Model yang dikembangkan dalam penelitian ini memberikan dasar kuantitatif

yang lebih robust untuk estimasi konseptual, analisis sensitivitas, serta perencanaan pengendalian biaya berbasis tingkat keyakinan.

SIMPULAN

Penelitian ini bertujuan mengembangkan model probabilistik penentuan bobot biaya tenaga kerja, material, dan peralatan pada proyek gedung 3 lantai menggunakan simulasi Monte Carlo berbasis data empiris aktual. Berdasarkan pengolahan 16 proyek yang telah selesai dilaksanakan dan terdokumentasi dalam laporan pengeluaran biaya proyek gedung 3 lantai, diperoleh rata-rata proporsi biaya tenaga kerja sebesar 40,57%, material 34,53%, dan peralatan 11,45%. Meskipun nilai rata-rata tersebut menunjukkan komposisi yang relatif seimbang antara tenaga kerja dan material, analisis deskriptif memperlihatkan rentang variasi yang sangat lebar antar proyek, terutama pada komponen material dan tenaga kerja. Temuan ini mengindikasikan bahwa struktur biaya proyek gedung 3 lantai tidak bersifat konstan, melainkan dipengaruhi oleh karakteristik desain, metode pelaksanaan, serta kondisi pasar material.

Hasil simulasi Monte Carlo dengan 1.000 iterasi menunjukkan bahwa setiap komponen biaya mengikuti distribusi probabilistik dengan interval ketidakpastian yang signifikan. Interval persentil P10–P90 pada komponen material dan tenaga kerja memperlihatkan fluktuasi yang cukup besar dibandingkan nilai rata-rata empiris, yang berarti bahwa pendekatan estimasi berbasis satu nilai deterministik tidak mampu merepresentasikan risiko aktual secara memadai. Nilai rata-rata hanya merepresentasikan posisi tengah distribusi (P50), sementara kemungkinan deviasi pada skenario optimis maupun konservatif dapat berbeda secara substansial. Dengan demikian, pendekatan probabilistik terbukti lebih representatif dalam menggambarkan variasi alami struktur biaya proyek.

Secara konseptual, penelitian ini menegaskan bahwa dalam proyek gedung 3 lantai, komponen material menjadi faktor yang paling sensitif terhadap ketidakpastian, sejalan dengan peningkatan kompleksitas struktural dan kebutuhan elemen konstruksi vertikal. Oleh karena itu, strategi pengendalian biaya pada tahap perencanaan perlu memberikan perhatian lebih pada manajemen risiko harga material dan optimasi desain struktur. Model probabilistik yang dihasilkan dapat digunakan sebagai baseline estimasi konseptual berbasis tingkat kepercayaan, misalnya dengan menggunakan nilai P50 sebagai estimasi moderat dan P90 sebagai skenario konservatif.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penyediaan parameter distribusi probabilistik komponen biaya utama proyek gedung 3 lantai berbasis data empiris lokal, yang dapat mendukung peningkatan akurasi estimasi awal serta integrasi dengan metode pengendalian kinerja biaya. Meskipun demikian, penelitian ini masih terbatas pada jumlah sampel 16 proyek dan asumsi distribusi tertentu. Penelitian lanjutan disarankan untuk memperluas jumlah sampel, menguji alternatif distribusi probabilitas, serta mengintegrasikan variabel risiko eksternal guna memperkaya model estimasi berbasis probabilistik di sektor konstruksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-hafeez, M. M., Attar, S. S. E., & Abdel-hafez, W. A. (2016). *Faculty of Engineering - Port Said University Risk Management as an Approach to Control Construction Projects Costs. 1*.
- Afzal, F., Shao, Y., Junaid, D., & Hanif, M. S. (2020). Cost-Risk Contingency Framework for Managing Cost Overrun in Metropolitan Projects: Using Fuzzy-Ahp and Simulation. *International Journal of Managing Projects in Business*, 13(5), 1121–1139. <https://doi.org/10.1108/ijmpb-07-2019-0175>
- Al-Emad, N., Abdul Rahman, I., Nagapan, S., & Gamil, Y. (2017). Ranking of Delay Factors for Makkah's Construction Industry. *MATEC Web of Conferences*, 103, 0–7. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710303001>
- Ashtari, M. A., Ansari, R., Hassannayebi, E., & Jeong, J. (2022). Cost Overrun Risk Assessment and Prediction in Construction Projects: A Bayesian Network Classifier Approach. *Buildings*, 12(10), 1660. <https://doi.org/10.3390/buildings12101660>
- Ate, B., & Eirgash, M. A. (2025). Proactive and Data-Driven Decision-Making Using Earned Value Analysis in Infrastructure Projects. *Buildings*, 2025(15), 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings15142388>
- Belay, S. M., Tilahun, S., Yehualaw, M., Matos, J., Sousa, H., & Workneh, E. T. (2021). Analysis of Cost Overrun and Schedule Delays of Infrastructure Projects in Low Income Economies : Case Studies in Ethiopia. *Advances in Civil Engineering*, 2021(2021), 15. <https://doi.org/10.1155/2021/4991204>
- Bouayed, Z. (2016). Using Monte Carlo Simulation To Mitigate The Risk Of Project Cost Overruns. *J. of Safety and Security Eng*, 6(2), 293–300. <https://doi.org/10.2495/SAFE-V6-N2-293-300>
- Budiharsanto, H. N., & Mardiaman. (2026). Evaluasi Wastage Level Material Struktur (Besi, Kayu, dan Beton) pada Proyek Rumah Susun Pemerintah di Surakarta. *Jurnal Talenta Sipil Vol*, 9(1), 545–551. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v9i1.1266>
- Caron, F., Ruggeri, F., & Merli, A. (2013). A Bayesian Approach to Improve. *Project Management Journal*, 44(1), 3–16. <https://doi.org/10.1002/pmj>
- Daundkar, S. T., Thakur, M. S., & Awad, M. S. (2022). Analysis of Construction Project Cost Overrun by Statistical Method. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10(5), 5200–5207.

- <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.43660>
- Habibi, M., & Kermanshachi, S. (2018). Phase-Based Analysis of Key Cost and Schedule Performance Causes and Preventive Strategies. *Engineering Construction & Architectural Management*, 25(8), 1009–1033. <https://doi.org/10.1108/ecam-10-2017-0219>
- Hannan, A., Ahmed, A., Ashraf, T., & Bai, Q. (2017). Estimation of Highway Project Cost Using Probabilistic Technique. *Destech Transactions on Engineering and Technology Research*, ictim. <https://doi.org/10.12783/dtetr/ictim2016/5523>
- Ikechukwu, A. C., Fidelis, I. E., & Kelvin, O. A. (2017). Causes and Effects of Cost Overruns in Public Building Construction. *IOSR Journal of Business and Management (IOSR-JBM)*, 19(7), 13–20. <https://doi.org/10.9790/487X-1907021320>
- Islam, M. S., Mohandes, S. R., Mahdiyar, A., Fallahpour, A., & Olanipekun, A. O. (2022). A Coupled Genetic Programming Monte Carlo Simulation–Based Model for Cost Overrun Prediction of Thermal Power Plant Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(8). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0002327](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0002327)
- 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). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000671](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000671)
- Lorenzo, D. C., Poza, D., Villafañez, F., & Acebes, F. (2024). Cost Contingency Estimation: A New Method for Quantitative Risk Analysis Applied to a Real Construction Project. *Dyna Ingenieria E Industria*, 99(1), 106–112. <https://doi.org/10.6036/10815>
- Luong, K. S., & Doan, N. S. (2025). Probabilistic Forecasting of Project Cost and Schedule Using Earned Value Management and Monte Carlo Simulation. *International Journal of Marine Science and Technology*, 1(1), 1–7. <https://doi.org/https://doi.org/10.65154/ijmst.21>
- Naeini, M. E. (2013). Cost control development under stochastic performance control 3 . Approaches to Measure Project Per-. *International Journal of Economics, Finance and Management Sciences*, 1(1), 54–60. <https://doi.org/10.11648/j.ijefm.20130101.17>
- Niazi, G. A., & Painting, N. (2017). Significant Factors Causing Cost Overruns in the Construction Industry in Afghanistan. *Procedia Engineering*, 182, 510–517. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.145>
- Putu, N., Sugiandhari, G., Respati, R., Studi, P., Sipil, T., Palangkaraya, U. M., Tengah, K., Studi, P., Sipil, T., Palangkaraya, U. M., Tengah, K., Studi, P., Sipil, T., Palangkaraya, U. M., & Tengah, K. (2024). Implementasi Value Engineering Untuk Optimalisasi Pembiayaan Pada Proyek Konstruksi. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 7(2), 465–478.
- Rivky, R. (2024). Value Engineering Building Structure Work Asn Paspampres Pupr Precast With Lead Rubber Bearing. *Injuruty: Interdisciplinary Journal and Humanity*, 3(2), 196–212.
- 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>
- Saraswati, N., & Wiguna, I. P. A. (2024). Contractor’s Perspective on Execution Method Impact to Cost Overrun in Bali’s Building Construction. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 28(1), 10–17. <https://doi.org/10.24843/jits.2024.v28.i01.p02>
- Triatmojo, D., Adi, H. P., & Poedjiastoeti, H. (2025). Risk Factor Analysis on Contingency Costs of Phase I Wastewater Network Project in Bogor City. *Indonesian Journal of Social Technology*, 6(2), 882–897. <https://doi.org/10.59141/jist.v6i2.8856>
- Xie, W., Deng, B., Yin, Y., Lv, X., & Deng, Z. (2022). Critical Factors Influencing Cost Overrun in Construction Projects : A Fuzzy Synthetic Evaluation. *Buildings*, 12(2028), 1–19.
- Zhao, M., & Zi, X. (2021). *Using Earned Value Management with exponential smoothing technique to forecast project cost Using Earned Value Management with exponential smoothing technique to forecast project cost*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1955/1/012101>