

# Analisis Robustness dan Tipping Point Proyek ERP Berbasis Simulasi Monte Carlo

Dicky Aditya\*<sup>1</sup>, Muhammad Kharis Ihsan <sup>2</sup>, M Ainul Yaqin <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang; dickyadty2004@gmail.com

<sup>2</sup> Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang; 230605110128@student.uin-malang.ac.id

<sup>3</sup> Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang; yaqinov@ti.uin-malang.ac.id

**Abstrak:** Penelitian ini menganalisis ketidakpastian dalam proyek *Enterprise Resource Planning* (ERP), yang sering menyebabkan deviasi terhadap target waktu dan biaya. Fokus penelitian ini adalah untuk mengevaluasi ketahanan kinerja proyek dalam menghadapi ketidakpastian serta mengidentifikasi titik kritis dalam hubungan antara durasi dan biaya proyek. Pendekatan kuantitatif berbasis simulasi *Monte Carlo* dengan 500 iterasi digunakan untuk menghasilkan berbagai skenario proyek berdasarkan distribusi probabilitas parameter durasi dan biaya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa skenario S1.4 (*fast-tracking*) dan S2.5 (*ideal case*) memiliki ketahanan tertinggi (100%) karena dapat memenuhi target waktu dan biaya secara konsisten. Namun, S1.4 lebih realistis diterapkan dibandingkan S2.5. Sebaliknya, skenario S1.5 (*extreme crashing*) menunjukkan titik kritis, karena meskipun durasi tercepat tercapai, biaya proyek meningkat drastis dan probabilitas sesuai anggaran turun menjadi 0%. Temuan ini menegaskan bahwa percepatan proyek bukan solusi yang selalu efektif. Sebaliknya, strategi yang mempertahankan keseimbangan antara waktu, biaya, dan risiko lebih tahan terhadap ketidakpastian dalam proyek ERP. Penelitian ini memberikan wawasan baru dalam pengambilan keputusan berbasis probabilistik pada manajemen proyek ERP

**Keywords:** ERP; *Monte Carlo*; *robustness*; *tipping point*; ketidakpastian

DOI: <https://doi.org/10.47134/jacis.v6i2.184>

\*Correspondensi: Dicky Aditya

Email: dickyadty2004@gmail.com

Receive: 6 Mei 2026

Accepted: 28 Mei 2026

Published: 1 Juni 2026



**Copyright:** © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**Abstract:** This study analyzes the uncertainty in Enterprise Resource Planning (ERP) projects, which often leads to deviations from time and cost targets. The focus of this research is to evaluate the robustness of project performance in the face of uncertainty and identify the tipping point in the relationship between project duration and cost. A quantitative approach based on Monte Carlo simulation with 500 iterations was used to generate various project scenarios based on the probabilistic distributions of duration and cost parameters. The results show that the S1.4 (*fast-tracking*) and S2.5 (*ideal case*) scenarios have the highest robustness (100%) because they consistently meet both time and cost targets. However, S1.4 is more realistic to implement compared to S2.5. Conversely, the S1.5 (*extreme crashing*) scenario reveals the tipping point, as although the fastest duration is achieved, the project cost increases significantly, and the probability of staying within budget drops to 0%. These findings highlight that project acceleration is not always an effective solution. Instead, strategies that maintain a balance between time, cost, and risk are the most resilient to uncertainty in ERP projects. This study provides new insights into probabilistic decision-making in ERP project management.

**Keywords:** ERP; *Monte Carlo*; *robustness*; *tipping point*; *uncertainty*

## PENDAHULUAN

Implementasi *Enterprise Resource Planning* (ERP) merupakan proyek teknologi informasi yang memiliki tingkat kompleksitas tinggi karena melibatkan integrasi fungsi lintas departemen, keterkaitan antar modul, perubahan proses bisnis, serta transformasi organisasi secara menyeluruh [1]. Tantangan dalam implementasi ERP tidak hanya berkaitan dengan aspek teknis, tetapi juga mencakup kesiapan organisasi, penyesuaian proses kerja, keterlibatan pengguna, dan kemampuan sumber daya manusia dalam merespons kebutuhan proyek yang bersifat dinamis [2]. Kondisi tersebut menyebabkan proyek ERP rentan terhadap ketidakpastian, terutama pada aspek durasi pelaksanaan, penggunaan sumber daya, dan biaya proyek. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa ketidakpastian dalam implementasi ERP dapat memicu keterlambatan jadwal, pembengkakan biaya, bahkan kegagalan pencapaian manfaat sistem yang telah direncanakan [3]. Dalam perspektif manajemen proyek, ketidakpastian menjadi salah satu aspek penting yang perlu dikelola secara sistematis. *PMBOK® Guide* Edisi Ketujuh menjelaskan bahwa *Uncertainty Performance Domain* mencakup kondisi ketidakpastian, ambiguitas, kompleksitas, dan perubahan yang dapat memengaruhi pencapaian tujuan proyek [4]. Pada proyek ERP, ketidakpastian tersebut dapat muncul dari variasi durasi aktivitas, perubahan kebutuhan organisasi, keterbatasan anggaran, serta ketidaksesuaian antara kompetensi staf dan kebutuhan teknis pekerjaan. Apabila ketidakpastian ini hanya dianalisis menggunakan pendekatan deterministik berbasis estimasi tunggal, maka hasil evaluasi proyek berpotensi kurang mampu menggambarkan variasi risiko yang terjadi selama pelaksanaan proyek [5]. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan evaluasi berbasis probabilistik yang mampu menggambarkan kemungkinan variasi durasi dan biaya secara lebih realistis.

Penelitian sebelumnya telah menggunakan simulasi *Monte Carlo* untuk menganalisis ketidakpastian proyek, terutama dalam memprediksi durasi penyelesaian, memperkirakan biaya, dan mengevaluasi risiko keterlambatan [6], [7]. Namun, sebagian besar kajian masih berfokus pada perbandingan nilai rata-rata atau peluang keberhasilan skenario secara terpisah. Pendekatan tersebut belum sepenuhnya menunjukkan seberapa tahan suatu skenario proyek ketika dihadapkan pada ketidakpastian waktu dan biaya secara bersamaan. Dengan kata lain, analisis tidak cukup hanya menjawab skenario mana yang menghasilkan durasi tercepat atau biaya terendah, tetapi juga perlu menjawab skenario mana yang paling stabil dalam memenuhi target proyek secara konsisten.

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini menitikberatkan pada analisis *robustness* dan *tipping point* dalam proyek ERP. *Robustness* digunakan untuk menilai ketahanan suatu skenario dalam menjaga keberhasilan proyek dari sisi ketepatan waktu dan kesesuaian anggaran secara simultan. Sementara itu, *tipping point* digunakan untuk mengidentifikasi titik kritis ketika strategi percepatan proyek mulai menimbulkan kenaikan biaya yang tidak proporsional. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengevaluasi hasil simulasi berdasarkan rata-rata durasi dan biaya, tetapi juga menilai kestabilan skenario serta batas kritis dari keputusan percepatan proyek.

Pendekatan simulasi *Monte Carlo* digunakan karena mampu menghasilkan distribusi kemungkinan hasil proyek melalui pembangkitan nilai acak berdasarkan parameter probabilistik [8]. Metode *Monte Carlo* banyak digunakan untuk menyelesaikan persoalan yang mengandung ketidakpastian karena mampu menghasilkan berbagai kemungkinan hasil

melalui pembangkitan angka acak dan distribusi probabilitas [9]. Dalam konteks manajemen proyek, pendekatan ini dapat diperluas untuk menilai ketahanan jadwal atau *robustness* terhadap variasi aktivitas dan risiko keterlambatan [10]. Selain itu, proyek kompleks juga dapat mengalami *tipping point*, yaitu kondisi ketika perubahan strategi memicu dampak besar terhadap kinerja proyek, khususnya pada aspek waktu dan biaya [11]. Penggunaan simulasi *Monte Carlo* dalam estimasi biaya proyek juga relevan untuk mengidentifikasi potensi pembengkakan anggaran akibat ketidakpastian [12].

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penyusunan kerangka evaluasi berbasis dua ukuran, yaitu *robustness* dan *tipping point*, untuk menilai skenario proyek ERP secara simultan dari sisi waktu dan biaya. Berbeda dari penelitian yang hanya berfokus pada pemodelan durasi dan biaya, penelitian ini mengubah keluaran simulasi menjadi ukuran ketahanan skenario dan batas kritis percepatan proyek. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kerangka evaluasi yang lebih komprehensif bagi manajer proyek dalam memilih strategi yang tidak hanya cepat atau murah, tetapi juga stabil, realistis, dan tahan terhadap ketidakpastian.

## METODE

### Dataset dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan data keluaran simulasi proyek *Enterprise Resource Planning* (ERP) sebagai dasar analisis lanjutan. Data yang digunakan berupa rekapitulasi hasil simulasi dari beberapa skenario intervensi manajerial, yang mencakup perubahan alur kerja, pengendalian durasi, pengendalian biaya, dan ekspansi kapasitas sumber daya manusia. Dengan demikian, penelitian ini tidak berfokus pada pembangunan ulang model simulasi, tetapi pada evaluasi ketahanan skenario proyek melalui analisis *robustness* dan identifikasi *tipping point*.

Data yang digunakan bersifat sintetis karena dihasilkan dari simulasi *Monte Carlo*. Penggunaan data sintetis dipilih karena proyek ERP memiliki karakteristik ketidakpastian tinggi, terutama pada aspek durasi, biaya, sumber daya, dan hubungan antar aktivitas. Dalam konteks ini, simulasi digunakan untuk merepresentasikan berbagai kemungkinan kondisi proyek yang sulit diamati secara langsung melalui data lapangan. Pendekatan ini sesuai untuk menganalisis ketidakpastian proyek karena mampu menghasilkan distribusi kemungkinan hasil, bukan hanya satu nilai estimasi deterministik. Variabel utama yang digunakan dalam penelitian ditampilkan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Variabel analisis *robustness* dan *tipping point*

Variabel	Simbol	Keterangan	Sumber data
Durasi proyek	D	Rata-rata durasi proyek hasil simulasi	Mean Durasi
Biaya proyek	C	Rata-rata biaya proyek hasil simulasi	Mean Biaya
Target durasi	Dtarget	Batas waktu proyek	23 minggu
Target biaya	Ctarget	Batas anggaran proyek	Rp130.000 ribu
Probabilitas tepat waktu	$P(D \leq D_{target})$	Peluang proyek selesai $\leq 23$ minggu	$P(D \leq 23)$
Probabilitas sesuai anggaran	$P(C \leq C_{target})$	Peluang biaya $\leq$ Rp130.000 ribu	$P(C \leq 130k)$
Robustness	R	Ukuran kestabilan proyek	Hasil perhitungan
Tipping point	TP	Titik ketika percepatan menyebabkan biaya tidak proporsional	Hasil perbandingan skenario

Target durasi 23 minggu dan biaya Rp130.000 ribu digunakan sebagai batas evaluasi kinerja proyek dalam model simulasi. Nilai tersebut berfungsi sebagai *project constraint*, yaitu batas waktu dan anggaran untuk menilai apakah suatu skenario masih dapat diterima secara manajerial. Kedua nilai ditetapkan berdasarkan skenario dasar perencanaan proyek, bukan sebagai data observasional lapangan, melainkan sebagai nilai ambang untuk menghitung probabilitas tepat waktu, probabilitas sesuai anggaran, *robustness*, dan identifikasi tipping point.

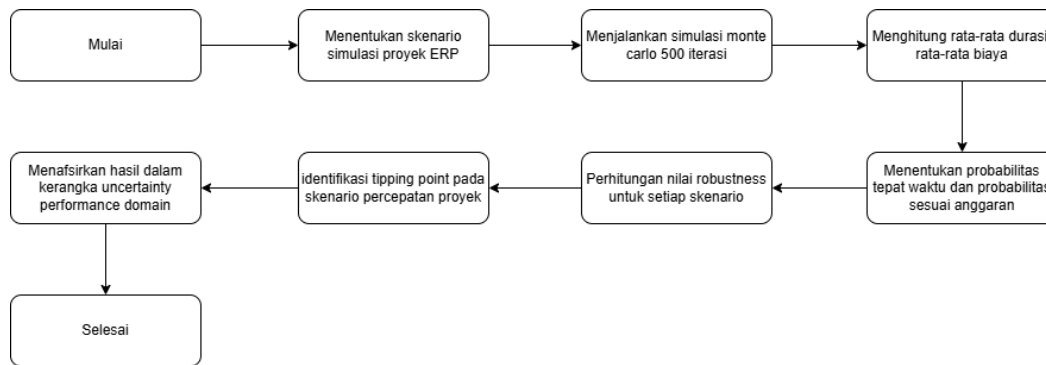
### Dasar Penentuan Metode dan Desain Skenario

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi Monte Carlo untuk merepresentasikan ketidakpastian proyek melalui pembangkitan nilai acak berdasarkan distribusi probabilitas. Pendekatan probabilistik digunakan karena durasi dan biaya proyek dipengaruhi oleh variasi aktivitas, kapasitas sumber daya, ketergantungan pekerjaan, serta risiko operasional [13], [14]. Durasi aktivitas dan biaya sumber daya dimodelkan menggunakan distribusi triangular dengan tiga estimasi utama, yaitu nilai minimum, paling mungkin, dan maksimum. Distribusi ini sesuai digunakan saat data historis terbatas, tetapi estimasi batas bawah, nilai paling mungkin, dan batas atas masih dapat ditentukan dari asumsi perencanaan proyek.

Simulasi dilakukan sebanyak 500 iterasi untuk memperoleh distribusi awal durasi dan biaya secara eksploratif. Hasil simulasi diringkas menjadi rata-rata durasi, rata-rata biaya, probabilitas tepat waktu, dan probabilitas sesuai anggaran. Desain skenario meliputi perubahan alur kerja, pengendalian durasi, pengendalian biaya, dan ekspansi kapasitas sumber daya manusia untuk menganalisis pengaruh setiap intervensi terhadap waktu, biaya, dan ketahanan proyek. Desain ini juga sejalan dengan konsep *time-cost trade-off* dan analisis risiko jadwal yang menekankan bahwa percepatan proyek perlu dievaluasi bersama konsekuensi biaya dan risiko yang muncul [15], [16].

### Alur Kerja Penelitian

Tahapan penelitian dirancang untuk memisahkan proses simulasi dan analisis lanjutan hasil simulasi. Alur metodologi ditampilkan pada Gambar 1. Penelitian dimulai dengan penentuan skenario simulasi proyek ERP berdasarkan intervensi manajerial yang diuji, kemudian simulasi Monte Carlo dijalankan sebanyak 500 iterasi untuk menghasilkan variasi durasi dan biaya proyek. Hasil simulasi diringkas menjadi rata-rata durasi, rata-rata biaya, probabilitas tepat waktu, dan probabilitas sesuai anggaran. Selanjutnya dihitung nilai *robustness* untuk menilai ketahanan skenario terhadap target waktu dan biaya, serta dilakukan analisis tipping point untuk mengidentifikasi saat percepatan proyek mulai memicu kenaikan biaya yang tidak proporsional. Hasil analisis kemudian ditafsirkan menggunakan kerangka Uncertainty Performance Domain guna menjelaskan implikasi ketidakpastian terhadap pengambilan keputusan proyek ERP.



**Gambar 1.** Alur Metodologi

### Implementasi Simulasi Monte Carlo

Simulasi Monte Carlo digunakan untuk menghasilkan variasi durasi dan biaya proyek melalui pembangkitan nilai acak berdasarkan distribusi triangular. Pada setiap iterasi, nilai tersebut digunakan untuk menghitung durasi aktual proyek, biaya proyek, serta pencapaian target waktu dan biaya.

Proses simulasi meliputi pembangkitan acak durasi aktivitas, perhitungan durasi proyek berdasarkan hubungan aktivitas dan alur kerja, pembangkitan acak biaya sumber daya, serta perhitungan total biaya proyek. Setiap hasil simulasi kemudian dievaluasi berdasarkan target durasi 23 minggu dan biaya Rp130.000 ribu. Proses ini diulang sebanyak 500 iterasi untuk memperoleh distribusi hasil proyek.

Hasil simulasi tidak hanya digunakan untuk melihat rata-rata durasi dan biaya, tetapi juga menghitung probabilitas keberhasilan proyek. Probabilitas tepat waktu dihitung dari proporsi iterasi dengan durasi  $\leq 23$  minggu, sedangkan probabilitas sesuai anggaran dihitung dari proporsi iterasi dengan biaya  $\leq$  Rp130.000 ribu. Kedua probabilitas tersebut menjadi dasar analisis robustness

### Validasi Model Simulasi

Validasi model dilakukan melalui validasi logis dan pemeriksaan konsistensi hasil. Validasi logis memastikan perubahan skenario menghasilkan arah perubahan yang sesuai dengan mekanisme intervensi, misalnya percepatan alur kerja menurunkan durasi proyek, sedangkan ekspansi sumber daya dapat menurunkan durasi namun berpotensi meningkatkan biaya.

Pemeriksaan konsistensi dilakukan dengan memastikan probabilitas berada pada rentang 0%–100%, biaya dan durasi bernilai positif, serta hubungan percepatan dan biaya tetap dapat dijelaskan secara manajerial. Hasil simulasi juga diperiksa terhadap target 23 minggu dan Rp130.000 ribu untuk memastikan perhitungan probabilitas tepat waktu dan sesuai anggaran mengikuti definisi variabel yang digunakan. Validasi ini bertujuan memastikan model sintetik memiliki logika internal yang konsisten dan dapat direplikasi, bukan membuktikan kesesuaiannya dengan proyek ERP tertentu.

### Analisis Robustness

*Robustness* digunakan untuk mengukur kemampuan suatu skenario proyek dalam memenuhi target waktu dan biaya secara bersamaan. Dalam penelitian ini, nilai *robustness* dihitung

menggunakan Persamaan (1), yaitu dengan mengambil nilai minimum antara probabilitas tepat waktu dan probabilitas sesuai anggaran. Pendekatan ini digunakan karena suatu skenario hanya dapat dikatakan kuat apabila kedua target tercapai secara simultan.

Rumus yang digunakan:

$$R = \frac{P(D \leq D_{target}) + P(C \leq C_{target})}{2} \quad \dots pers (1)$$

Keterangan:

$R$  = Nilai *robustness*

$P(D \leq D_{target})$  = Probabilitas proyek selesai tepat waktu ( $\leq 23$  minggu)

$P(C \leq C_{target})$  = Probabilitas proyek sesuai anggaran ( $\leq$  Rp130.000 ribu)

$D_{target}$  = Target durasi proyek (23 minggu)

$C_{target}$  = Target biaya proyek (Rp130.000 ribu)

Interpretasi:

Nilai R	Kategori
$\geq 99\%$	Sangat robust
90%–98,9%	Robust
70%–89,9%	Moderat
$< 70\%$	Tidak robust

Dengan mengukur *robustness*, penelitian ini dapat menilai skenario mana yang paling stabil dalam menghadapi ketidakpastian, yaitu yang mampu menyelesaikan proyek tepat waktu dan sesuai anggaran secara konsisten.

### Analisis Tipping Point

*Tipping point* digunakan untuk mengidentifikasi kondisi ketika percepatan proyek mulai menyebabkan kenaikan biaya yang tidak proporsional. Indeks *tipping point* dihitung menggunakan Persamaan (2), yaitu rasio perubahan biaya terhadap besarnya perubahan durasi antar skenario.

Rumus dasar:

$$TP = \frac{\Delta C}{\Delta D} \quad \dots pers (2)$$

Keterangan:

$TP$  = Indeks *tipping point*

$\Delta C$  = Perubahan biaya antar skenario

$\Delta D$  = Perubahan durasi antar skenario

Dalam penelitian ini, suatu skenario dianggap sebagai *tipping point* apabila memenuhi tiga kondisi berikut:

1. Durasi proyek berkurang secara signifikan.
2. Biaya meningkat secara tidak proporsional.
3. Probabilitas sesuai anggaran turun drastis atau mendekati 0%.

Analisis *tipping point* difokuskan pada kelompok S1, yang mencakup perubahan alur kerja dan percepatan proyek yang paling ekstrem. Identifikasi *tipping point* membantu untuk memahami batas kritis di mana percepatan proyek justru menyebabkan pembengkakan biaya yang besar.

### Tools Penelitian dan Replikasi

Simulasi dan analisis dalam penelitian ini dilakukan menggunakan Microsoft Excel sebagai *tools* utama. Microsoft Excel digunakan untuk membangkitkan nilai acak, menghitung durasi dan biaya proyek, menyusun rekapitulasi hasil simulasi, serta menghitung probabilitas tepat waktu dan probabilitas sesuai anggaran. Selain itu, Excel juga digunakan untuk menghitung nilai *robustness*, indeks *tipping point*, serta membuat visualisasi berupa grafik hubungan durasi-biaya, grafik nilai *robustness*, dan kurva perubahan durasi-biaya.

Agar penelitian dapat direplikasi, data minimum yang perlu disiapkan meliputi daftar skenario, rata-rata durasi proyek, rata-rata biaya proyek, probabilitas tepat waktu, dan probabilitas sesuai anggaran. Nilai *robustness* dihitung menggunakan Persamaan (1), sedangkan indeks *tipping point* dihitung menggunakan Persamaan (2) sampai Persamaan (4). Dengan demikian, proses analisis dapat diulang pada proyek ERP lain selama tersedia data keluaran simulasi atau data historis yang memuat durasi, biaya, serta batas target proyek.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini membahas hasil simulasi proyek ERP dengan fokus pada dua aspek utama, yaitu *robustness* dan *tipping point*. Pembahasan tidak hanya diarahkan untuk membandingkan rata-rata durasi dan biaya, tetapi juga untuk menilai ketahanan skenario terhadap target waktu dan anggaran secara simultan. Pendekatan ini penting karena keberhasilan proyek ERP tidak cukup dinilai dari durasi tercepat atau biaya terendah, melainkan dari kemampuan skenario dalam menjaga kinerja proyek ketika menghadapi ketidakpastian.

### Hasil Simulasi Skenario Proyek

Rekapitulasi hasil simulasi dari kelompok skenario S1, S2, S3, dan S4 ditampilkan pada Tabel 2. Setiap kelompok skenario merepresentasikan bentuk intervensi manajerial yang berbeda. Kelompok S1 berfokus pada perubahan alur kerja, S2 pada pengendalian durasi, S3 pada pengendalian biaya, sedangkan S4 pada ekspansi kapasitas sumber daya manusia.

**Tabel 2.** Rekapitulasi hasil simulasi skenario S1–S4

Kelompok	Skenario	Deskripsi	Durasi (minggu)	Biaya (ribu rupiah)	P Waktu (%)	P Biaya (%)
S1	S1.1	<i>Baseline sekuensial</i>	21,43	97.241	89,0	100,0
S1	S1.2	<i>Parallel development</i>	18,78	97.810	100,0	99,8
S1	S1.3	<i>Early migration</i>	17,82	108.145	100,0	96,4

S1	S1.4	<i>Fast-tracking</i>	21,35	102.408	100,0	100,0
S1	S1.5	<i>Extreme crashing</i>	13,75	139.462	100,0	0,0
S2	S2.1	<i>Strict testing control</i>	20,93	92.650	95,2	100,0
S2	S2.2	<i>Front-end guard</i>	21,13	94.280	92,6	100,0
S2	S2.3	<i>Core stabilization</i>	20,89	91.870	96,4	100,0
S2	S2.4	<i>Expert standardization</i>	20,81	90.940	98,2	100,0
S2	S2.5	<i>Ideal case</i>	17,11	76.430	100,0	100,0
S3	S3.1	<i>Expert budget cap</i>	21,32	93.850	88,4	100,0
S3	S3.2	<i>Junior fixed rate</i>	21,39	94.620	87,2	100,0
S3	S3.3	<i>Mid-level save</i>	21,24	93.910	89,6	100,0
S3	S3.4	<i>Fixed price contract</i>	21,21	87.450	89,8	100,0
S3	S3.5	<i>Global budget cut</i>	21,31	77.630	88,6	100,0
S4	S4.1	<i>Junior support</i>	22,81	116.420	56,4	71,2
S4	S4.2	<i>Double expert</i>	17,54	153.810	84,2	12,4
S4	S4.3	<i>Fast boost</i>	18,29	132.550	82,6	46,8
S4	S4.4	<i>Balanced growth</i>	20,53	119.640	72,8	68,4
S4	S4.5	<i>Maximum capacity</i>	18,42	115.780	81,4	74,6

Berdasarkan Tabel 2, kelompok S1 menunjukkan bahwa perubahan alur kerja dapat mempercepat penyelesaian proyek, tetapi tidak selalu menghasilkan kondisi yang stabil dari sisi biaya. Skenario S1.2 dan S1.3 mampu menghasilkan probabilitas tepat waktu sebesar 100%, yang menunjukkan bahwa pengaturan aktivitas secara lebih paralel dapat meningkatkan peluang penyelesaian proyek dalam batas 23 minggu. Namun, peningkatan percepatan pada S1.3 mulai diikuti oleh kenaikan biaya yang lebih besar dibandingkan S1.2. Kondisi paling ekstrem terlihat pada S1.5, yaitu skenario dengan durasi tercepat sebesar 13,75 minggu, tetapi biaya meningkat menjadi 139.462 ribu rupiah dan probabilitas sesuai anggaran turun menjadi 0%. Temuan ini menunjukkan bahwa percepatan proyek secara ekstrem dapat menciptakan risiko biaya yang lebih besar daripada manfaat waktu yang diperoleh.

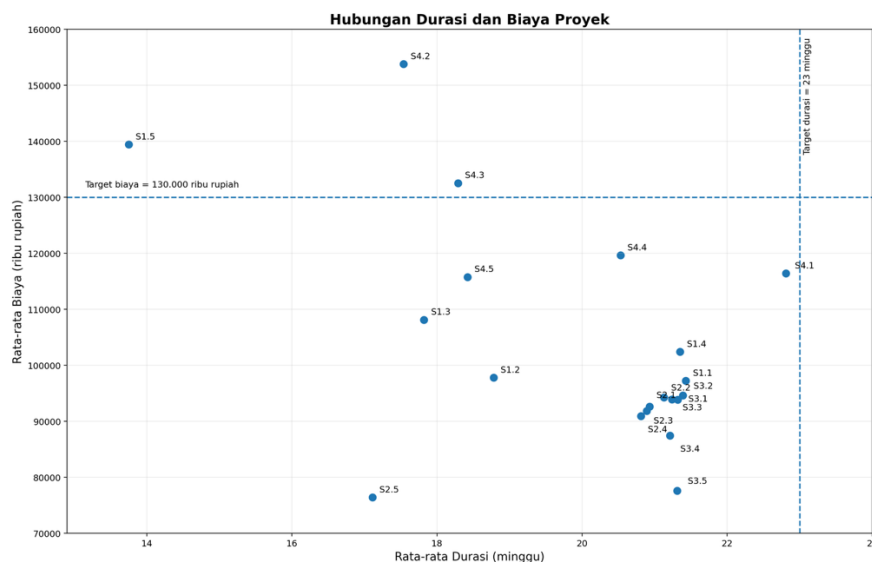
Kelompok S2 menunjukkan bahwa pengendalian durasi maksimum aktivitas cenderung menghasilkan kinerja yang stabil. Seluruh skenario S2 memiliki probabilitas sesuai anggaran sebesar 100%, sedangkan probabilitas tepat waktu berada pada rentang 92,6% sampai 100%. Skenario S2.5 menghasilkan durasi dan biaya paling rendah, tetapi skenario ini perlu dipahami sebagai kondisi ideal karena nilai maksimum durasi disamakan dengan nilai paling mungkin. Oleh karena itu, meskipun S2.5 menunjukkan hasil terbaik secara numerik, penerapannya dalam proyek nyata perlu dipertimbangkan secara hati-hati karena proyek ERP tetap memiliki risiko perubahan kebutuhan, kendala teknis, dan ketergantungan antar aktivitas.

Kelompok S3 menunjukkan bahwa pengendalian biaya efektif dalam menjaga proyek tetap berada dalam batas anggaran. Seluruh skenario S3 memiliki probabilitas sesuai anggaran sebesar 100%. Namun, probabilitas tepat waktu masih berada di bawah 90%. Dengan demikian, meskipun rata-rata durasi pada kelompok S3 masih berada di bawah target 23

minggu, ketidakpastian durasi belum sepenuhnya terkendali. Hal ini menunjukkan bahwa strategi pengendalian biaya saja belum cukup untuk menjamin stabilitas proyek dari sisi waktu. Dalam konteks manajemen proyek, hasil ini menegaskan bahwa efisiensi biaya perlu dikombinasikan dengan pengendalian durasi atau penataan alur kerja agar proyek tidak hanya murah, tetapi juga memiliki peluang tinggi untuk selesai tepat waktu.

Kelompok S4 memperlihatkan bahwa ekspansi kapasitas sumber daya manusia tidak selalu menghasilkan peningkatan ketahanan proyek. Skenario S4.2 dan S4.3 mampu memperpendek durasi, tetapi biaya meningkat cukup besar sehingga probabilitas sesuai anggaran menurun. S4.5 menunjukkan hasil yang lebih seimbang dibandingkan skenario S4 lainnya, dengan durasi 18,42 minggu, biaya 115.780 ribu rupiah, probabilitas tepat waktu 81,4%, dan probabilitas sesuai anggaran 74,6%. Namun, nilai tersebut belum mampu menyaingi stabilitas S1.4 atau S2.5. Artinya, penambahan sumber daya manusia perlu dilakukan secara selektif karena tambahan kapasitas dapat mempercepat proyek, tetapi juga dapat meningkatkan biaya dan kompleksitas koordinasi.

Hubungan antara rata-rata durasi dan biaya proyek pada seluruh skenario ditampilkan pada Gambar 2. Gambar tersebut memperlihatkan posisi setiap skenario terhadap batas durasi 23 minggu dan batas biaya 130.000 ribu rupiah.



**Gambar 2.** Hubungan durasi dan biaya proyek

Berdasarkan Gambar 2, skenario yang berada di bawah batas durasi dan biaya dapat dipandang sebagai skenario yang relatif aman. S1.4 berada pada area yang stabil karena memenuhi batas waktu dan anggaran secara bersamaan. Sebaliknya, S1.5 tampak sebagai *outlier* karena menghasilkan durasi paling pendek, tetapi melewati batas biaya proyek. Pola ini menunjukkan bahwa evaluasi proyek ERP tidak dapat hanya berorientasi pada percepatan jadwal. Perlu ada pertimbangan terhadap keseimbangan antara durasi dan biaya agar keputusan manajerial tidak menghasilkan risiko pembengkakan anggaran.

### Analisis Robustness

*Robustness* digunakan untuk menilai sejauh mana setiap skenario mampu menjaga keberhasilan proyek dari sisi waktu dan biaya secara bersamaan. Dalam penelitian ini, nilai *robustness* dihitung dengan mengambil nilai minimum antara probabilitas tepat waktu dan

probabilitas sesuai anggaran. Pendekatan ini digunakan karena suatu skenario hanya dapat dikatakan kuat apabila mampu memenuhi kedua target secara simultan. Jika salah satu probabilitas rendah, maka ketahanan skenario tersebut juga rendah. Nilai *robustness* setiap skenario ditampilkan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Nilai *robustness* pada setiap skenario

Kelompok	Skenario	P Waktu (%)	P Biaya (%)	Robustness (%)	Kategori
S1	S1.1	89,0	100,0	89,0	Moderat
S1	S1.2	100,0	99,8	99,8	Sangat <i>robust</i>
S1	S1.3	100,0	96,4	96,4	<i>Robust</i>
S1	S1.4	100,0	100,0	100,0	Sangat <i>robust</i>
S1	S1.5	100,0	0,0	0,0	Tidak <i>robust</i>
S2	S2.1	95,2	100,0	95,2	<i>Robust</i>
S2	S2.2	92,6	100,0	92,6	<i>Robust</i>
S2	S2.3	96,4	100,0	96,4	<i>Robust</i>
S2	S2.4	98,2	100,0	98,2	<i>Robust</i>
S2	S2.5	100,0	100,0	100,0	Sangat <i>robust</i>
S3	S3.1	88,4	100,0	88,4	Moderat
S3	S3.2	87,2	100,0	87,2	Moderat
S3	S3.3	89,6	100,0	89,6	Moderat
S3	S3.4	89,8	100,0	89,8	Moderat
S3	S3.5	88,6	100,0	88,6	Moderat
S4	S4.1	56,4	71,2	56,4	Tidak <i>robust</i>
S4	S4.2	84,2	12,4	12,4	Tidak <i>robust</i>
S4	S4.3	82,6	46,8	46,8	Tidak <i>robust</i>
S4	S4.4	72,8	68,4	68,4	Tidak <i>robust</i>
S4	S4.5	81,4	74,6	74,6	Moderat

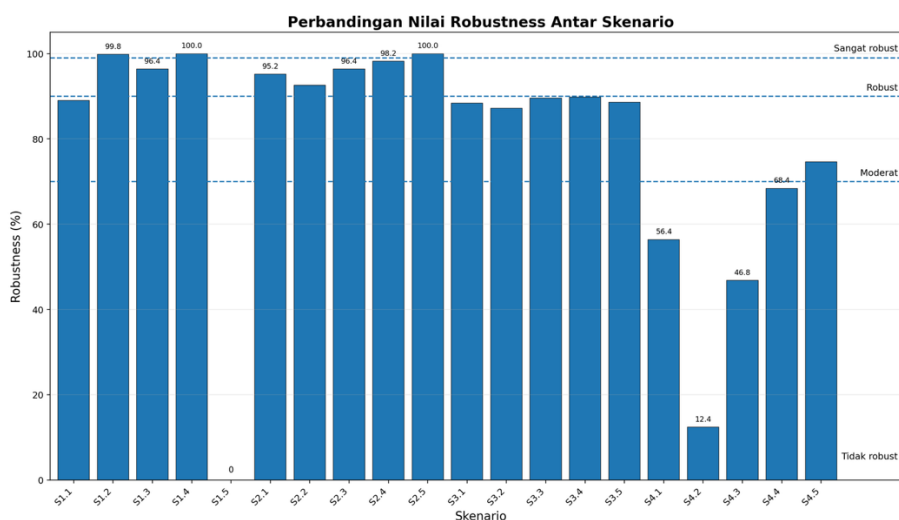
Berdasarkan Tabel 3, skenario dengan nilai *robustness* tertinggi adalah S1.4 dan S2.5, masing-masing sebesar 100%. Hal ini menunjukkan bahwa kedua skenario tersebut mampu menjaga proyek tetap berada dalam batas waktu dan anggaran pada seluruh hasil simulasi. Namun, secara manajerial, S1.4 lebih realistis untuk direkomendasikan karena masih merepresentasikan strategi percepatan yang dapat diterapkan melalui pengaturan alur kerja. Sebaliknya, S2.5 merupakan kondisi ideal karena mengasumsikan bahwa seluruh durasi maksimum aktivitas dapat dikendalikan hingga setara dengan nilai paling mungkin.

S1.2 juga menunjukkan tingkat *robustness* sangat tinggi, yaitu 99,8%. Hasil ini mengindikasikan bahwa *parallel development* dapat menjadi strategi percepatan yang relatif aman karena mampu menurunkan durasi tanpa menyebabkan gangguan besar terhadap anggaran. S1.3 masih berada pada kategori *robust* dengan nilai 96,4%, tetapi mulai menunjukkan penurunan stabilitas biaya. Penurunan tersebut terlihat dari probabilitas sesuai anggaran yang turun menjadi 96,4%. Dengan demikian, semakin agresif perubahan alur kerja dilakukan, semakin besar pula potensi risiko biaya yang muncul.

Sebaliknya, S1.5 menunjukkan nilai *robustness* sebesar 0%. Meskipun skenario ini memiliki probabilitas tepat waktu sebesar 100%, probabilitas sesuai anggarannya turun menjadi 0%. Temuan ini menunjukkan bahwa keberhasilan waktu tidak dapat dijadikan satu-satunya indikator keberhasilan proyek. Sebuah skenario yang sangat cepat tetap dapat dikategorikan gagal secara *robustness* apabila tidak mampu menjaga biaya dalam batas anggaran.

Kelompok S2 secara umum berada pada kategori *robust* hingga sangat *robust*. Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian durasi maksimum merupakan strategi yang cukup efektif dalam menjaga stabilitas proyek. Kelompok S3 berada pada kategori moderat karena meskipun seluruh skenario aman dari sisi biaya, probabilitas tepat waktu masih berada di bawah 90%. Sementara itu, kelompok S4 cenderung memiliki *robustness* rendah, kecuali S4.5 yang berada pada kategori moderat. Kondisi ini menunjukkan bahwa ekspansi sumber daya manusia perlu dirancang secara hati-hati, karena penambahan staf tidak secara otomatis meningkatkan ketahanan proyek. Perbandingan nilai *robustness* antar skenario ditampilkan pada Gambar 3.

Berdasarkan Gambar 3, S1.4 dan S2.5 berada pada posisi tertinggi, sedangkan S1.5 dan beberapa skenario S4 berada pada posisi terendah. Visualisasi ini memperjelas bahwa strategi yang paling cepat bukan selalu strategi yang paling kuat. Dalam konteks proyek ERP, skenario yang kuat adalah skenario yang mampu menjaga keseimbangan antara pencapaian waktu dan pengendalian biaya.



Gambar 3. Perbandingan nilai robustness antar skenario

### Analisis Tipping Point

Analisis *tipping point* dilakukan pada kelompok S1 karena kelompok ini merepresentasikan perubahan alur kerja dan percepatan proyek secara bertahap. *Tipping point* digunakan untuk mengidentifikasi titik ketika percepatan proyek mulai tidak seimbang dengan kenaikan biaya yang ditimbulkan. Hasil identifikasi *tipping point* pada kelompok S1 ditampilkan pada Tabel 4.

Berdasarkan Tabel 4, transisi dari S1.1 ke S1.2 menunjukkan percepatan yang relatif efisien. Durasi proyek berkurang sebesar 2,65 minggu, sedangkan biaya hanya meningkat sebesar 569 ribu rupiah. Nilai TP sebesar 214,72 ribu rupiah per minggu menunjukkan bahwa tambahan biaya untuk memperoleh percepatan masih relatif rendah. Selain itu, probabilitas sesuai anggaran hanya turun sebesar 0,2%. Dengan demikian, S1.2 dapat dipahami sebagai bentuk percepatan awal yang masih aman.

Transisi dari S1.2 ke S1.3 menunjukkan bahwa percepatan tambahan mulai membutuhkan biaya yang lebih besar. Durasi hanya berkurang sebesar 0,96 minggu, tetapi biaya meningkat sebesar 10.335 ribu rupiah. Nilai TP meningkat menjadi 10.765,63 ribu rupiah per minggu.

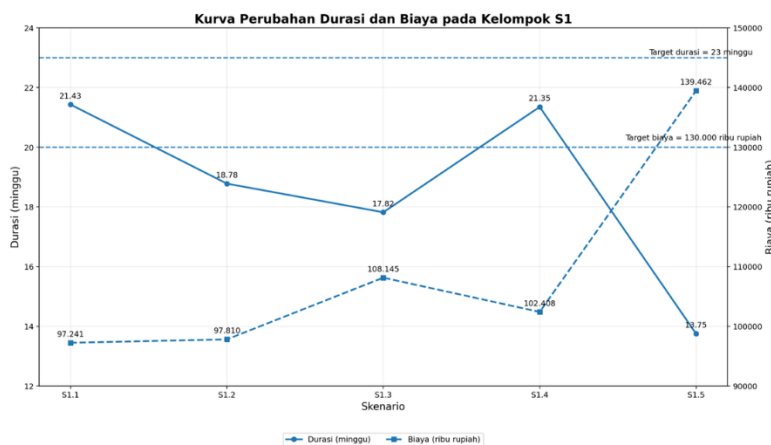
Meskipun probabilitas sesuai anggaran masih berada pada 96,4%, hasil ini menunjukkan bahwa efisiensi percepatan mulai menurun. Artinya, tambahan percepatan tidak lagi diperoleh dengan biaya yang kecil.

Tabel 4. Identifikasi tipping point pada skenario S1

Transisi Skenario	Perubahan Durasi (minggu)	Percepatan (minggu)	Perubahan Biaya (ribu rupiah)	TP (ribu rupiah/minggu)	Perubahan P Biaya	Interpretasi
S1.1 → S1.2	-2,65	2,65	+569	214,72	-0,2%	Percepatan efisien
S1.2 → S1.3	-0,96	0,96	+10.335	10.765,63	-3,4%	Biaya mulai meningkat tajam
S1.3 → S1.4	+3,53	-	-5.737	-	+3,6%	Bukan percepatan, tetapi stabilisasi
S1.4 → S1.5	-7,60	7,60	+37.054	4.875,53	-100,0%	Tipping point

Transisi dari S1.3 ke S1.4 tidak dikategorikan sebagai percepatan karena durasi proyek meningkat dari 17,82 minggu menjadi 21,35 minggu. Namun, kenaikan durasi tersebut diikuti oleh penurunan biaya dan peningkatan probabilitas sesuai anggaran menjadi 100%. Oleh karena itu, S1.4 lebih tepat dipahami sebagai skenario stabilisasi. Skenario ini mengorbankan sebagian percepatan untuk memperoleh ketahanan biaya dan waktu yang lebih baik.

Tipping point paling jelas muncul pada transisi dari S1.4 ke S1.5. Pada transisi ini, durasi proyek turun signifikan sebesar 7,60 minggu, tetapi biaya meningkat sebesar 37.054 ribu rupiah. Lebih penting lagi, probabilitas sesuai anggaran turun dari 100% menjadi 0%. Artinya, seluruh hasil simulasi pada S1.5 melewati batas anggaran. Dengan demikian, S1.5 dapat dikategorikan sebagai titik kritis karena percepatan proyek tidak lagi memberikan manfaat yang seimbang terhadap risiko biaya. Perubahan durasi dan biaya pada kelompok S1 ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva perubahan durasi dan biaya pada kelompok S1

Berdasarkan Gambar 4, penurunan durasi tidak selalu diikuti oleh biaya yang stabil. Pada S1.5, biaya meningkat melewati batas anggaran, sehingga memperkuat indikasi adanya tipping point. Pola ini menunjukkan bahwa percepatan proyek memiliki batas kritis. Setelah batas tersebut terlampaui, tambahan percepatan dapat menyebabkan biaya meningkat secara tidak proporsional.

## Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya dan Implikasi

Temuan bahwa skenario tercepat tidak selalu menjadi skenario terbaik sejalan dengan literatur manajemen risiko proyek yang menekankan perlunya evaluasi jadwal dan biaya secara bersamaan. Bara [13] menunjukkan bahwa simulasi *Monte Carlo* yang mengintegrasikan dampak biaya dan jadwal dapat memperkuat analisis risiko proyek karena keputusan tidak hanya didasarkan pada satu indikator kinerja. Sejalan dengan itu, Ichsan et al. [14] menegaskan bahwa simulasi *Monte Carlo* mampu meningkatkan kemampuan prediksi penyelesaian jadwal proyek karena mempertimbangkan distribusi risiko, bukan hanya estimasi tunggal.

Hasil pada S1.5 memperkuat konsep *time-cost trade-off*, yaitu percepatan proyek dapat menurunkan durasi, tetapi pada titik tertentu dapat menyebabkan kenaikan biaya yang tidak proporsional. Ehnaish dan Badi [16] menunjukkan bahwa strategi *crashing* di bawah ketidakpastian perlu dikombinasikan dengan evaluasi risiko agar percepatan jadwal tidak menghasilkan konsekuensi biaya yang merugikan. Dalam penelitian ini, S1.5 menjadi bukti bahwa percepatan ekstrem memang memperpendek durasi, tetapi gagal secara anggaran karena probabilitas sesuai anggaran turun menjadi 0%.

Kontribusi teoretis penelitian ini terletak pada perluasan penggunaan simulasi *Monte Carlo* dari alat estimasi menjadi kerangka evaluasi ketahanan skenario. Dengan menggabungkan probabilitas tepat waktu dan probabilitas sesuai anggaran ke dalam ukuran *robustness*, penelitian ini memberikan cara untuk menilai stabilitas proyek secara simultan. Selain itu, analisis *tipping point* memberikan mekanisme untuk mengidentifikasi batas kritis ketika percepatan proyek tidak lagi efisien dari sisi biaya. Selain itu, risiko proyek perlu dipahami sebagai sistem yang saling berkaitan antar komponen. Seperti penelitian [17] yang menekankan bahwa pemodelan risiko proyek perlu mempertimbangkan keterkaitan antar risiko agar evaluasi proyek lebih mampu menggambarkan kondisi sistem yang kompleks. Oleh karena itu, analisis *robustness* dan *tipping point* dalam penelitian ini digunakan untuk melihat ketahanan skenario terhadap kombinasi risiko waktu dan biaya.

Secara praktis, hasil penelitian memberikan panduan bagi manajer proyek ERP untuk tidak memilih strategi hanya berdasarkan durasi tercepat. Skenario S1.4 menunjukkan bahwa strategi *fast-tracking* yang terkendali dapat menjadi pilihan yang lebih realistis karena mampu menjaga probabilitas tepat waktu dan sesuai anggaran sebesar 100%. Sebaliknya, S1.5 menunjukkan bahwa *extreme crashing* perlu dihindari apabila proyek memiliki batas anggaran ketat. Oleh karena itu, keputusan percepatan proyek sebaiknya dilakukan dengan mempertimbangkan distribusi risiko, kapasitas sumber daya, dan probabilitas keberhasilan secara bersamaan.

## Interpretasi dalam Kerangka Uncertainty Performance Domain

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketidakpastian dalam proyek ERP tidak bersifat linear. Perubahan strategi manajerial dapat memberikan dampak berbeda terhadap durasi dan biaya. Beberapa skenario mampu mempercepat durasi tanpa meningkatkan biaya secara signifikan, sedangkan skenario lain justru menimbulkan pembengkakan biaya meskipun berhasil mempercepat proyek. Kondisi ini sejalan dengan konsep *Uncertainty Performance Domain*, yang memandang proyek sebagai sistem dinamis dengan interaksi antara aktivitas, sumber daya, biaya, risiko, dan kapasitas organisasi.

Pengambilan keputusan dalam proyek ERP tidak cukup hanya didasarkan pada estimasi tunggal. Manajer proyek perlu mempertimbangkan distribusi kemungkinan hasil dan probabilitas keberhasilan setiap skenario. Simulasi *Monte Carlo* memberikan dasar untuk melihat variasi hasil proyek, sedangkan analisis *robustness* dan *tipping point* membantu menilai kelayakan strategi secara manajerial.

Temuan *robustness* menunjukkan bahwa skenario terbaik bukan selalu skenario dengan durasi tercepat. S1.5 merupakan skenario tercepat, tetapi tidak *robust* karena gagal memenuhi batas anggaran. Sebaliknya, S1.4 lebih kuat secara manajerial karena mampu menjaga probabilitas tepat waktu dan probabilitas sesuai anggaran sebesar 100%. Skenario ini menunjukkan keseimbangan yang lebih baik antara waktu, biaya, dan risiko. Temuan *tipping point* menunjukkan bahwa percepatan proyek memiliki batas kritis. Percepatan yang terlalu agresif, seperti *extreme crashing*, dapat meningkatkan biaya secara tidak proporsional dan mengganggu stabilitas proyek. Oleh karena itu, strategi percepatan perlu dipertimbangkan secara hati-hati, terutama pada proyek dengan batas anggaran yang ketat.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan pentingnya pendekatan probabilistik dalam manajemen proyek ERP. Simulasi *Monte Carlo* tidak hanya digunakan untuk memperkirakan durasi dan biaya, tetapi juga menjadi dasar untuk mengevaluasi ketahanan skenario dan mengidentifikasi batas kritis dalam pengambilan keputusan proyek.

## SIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi ketahanan proyek ERP terhadap ketidakpastian menggunakan simulasi Monte Carlo, analisis *robustness*, dan *tipping point*. Hasil menunjukkan bahwa durasi tercepat tidak selalu menjadi skenario terbaik. S1.5 (*extreme crashing*) menghasilkan durasi paling singkat, yaitu 13,75 minggu, tetapi biaya meningkat menjadi Rp139.462 ribu dan probabilitas sesuai anggaran turun menjadi 0%, sehingga menjadi titik kritis karena percepatan tidak lagi seimbang dengan risiko biaya.

Skenario S1.4 (*fast-tracking*) menjadi alternatif paling layak karena mampu mempertahankan probabilitas tepat waktu dan sesuai anggaran sebesar 100%. Meskipun S2.5 (*ideal case*) juga memiliki *robustness* 100%, skenario tersebut sulit diterapkan pada proyek nyata sehingga S1.4 lebih realistis dan stabil sebagai strategi percepatan proyek.

Secara umum, keberhasilan proyek ERP ditentukan oleh keseimbangan antara waktu, biaya, risiko, dan kapasitas sumber daya. Pendekatan *robustness* membantu mengidentifikasi skenario yang paling tahan terhadap ketidakpastian, sedangkan analisis *tipping point* menentukan batas ketika percepatan mulai menimbulkan risiko biaya yang tidak proporsional. Penelitian selanjutnya dapat menggunakan data proyek nyata atau jumlah iterasi yang lebih besar agar hasil lebih kuat dan dapat digeneralisasi.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Ma, A. Wang, N. Li, L. Gu, and Q. Ai, "Improved critical chain project management framework for scheduling construction projects," *J. Constr. Eng. Manage.*, vol. 140, no. 12, p. 04014055, 2014.

- [2] E. L. N. Refta, I. Kurnia, and S. Hadiwijaya, "Optimasi permintaan dengan simulasi Monte Carlo serta optimasi persediaan New Baleno dengan Silver-Meal heuristic di PT Sejahtera Buana Trada," *J. Industrikrisna*, vol. 14, no. 2, pp. 107–118, 2025.
- [3] M. R. Gymnastiar, M. Ilyas, R. Gunawan, and D. R. Pasaribu, "Analisis faktor-faktor kegagalan implementasi ERP dari perusahaan multinasional," *J. Studi Multidisipliner*, vol. 9, no. 6, 2025.
- [4] Project Management Institute, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*, 7th ed. Newtown Square, PA, USA: Project Management Institute, 2021.
- [5] I. A. Hasugian, K. Muhyi, and N. Firlidany, "Simulasi Monte Carlo dalam memprediksi jumlah pengiriman dan total pendapatan," *Bul. Utama Tek.*, vol. 17, no. 2, pp. 133–138, 2022.
- [6] Yusmaity, J. Santony, and Yuhandri, "Simulasi Monte Carlo untuk memprediksi hasil ujian nasional," *J. Inf. Teknol.*, vol. 1, no. 4, pp. 1–6, 2019.
- [7] A. M. Siregar and R. Puspita, "Penerapan simulasi Monte Carlo dalam mengestimasi waktu penyelesaian proyek pengembangan perangkat lunak," *J. Teknol. Sist. Inf.*, vol. 6, no. 3, pp. 210–218, 2020.
- [8] I. E. Lianto and B. Anondho, "Analisis besaran koefisien ketidakpastian environmental uncertainty (EU) yang berpengaruh pada perhitungan buffer pada critical chain project management (CCPM) di Jakarta," *J. Mitra Tek. Sipil*, vol. 1, no. 2, pp. 143–150, 2018.
- [9] N. A. Dalimunthe, "Simulasi prediksi permintaan kue kacang di CV. Fawas Jaya Medan menggunakan metode Monte Carlo," *Skripsi*, Universitas Medan Area, Medan, Indonesia, 2021.
- [10] W. Na, P. Wu-Liang, and G. Hua, "A robustness simulation method of project schedule based on the Monte Carlo method," *Open Cybern. Syst. J.*, vol. 9, pp. 1–6, 2015.
- [11] J. S. Ford and D. N. Taylor, "Managing tipping point dynamics in complex construction projects," *J. Constr. Eng. Manage.*, vol. 134, no. 6, pp. 421–431, 2008.
- [12] A. Fadjar, "Aplikasi simulasi Monte Carlo dalam estimasi biaya proyek," *SMARTek*, vol. 6, no. 4, pp. 222–227, 2008.
- [13] M. Bara, "Enhanced Monte Carlo simulation for project risk analysis: Integrating cost and schedule impacts with time-shifted risks and dependency modeling," *Appl. Oper. Anal.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–15, 2025, doi: 10.1080/29966892.2025.2552675.
- [14] M. Ichsan, W. Isvara, and S. Karim, "Monte Carlo simulation for enhancing the schedule completion forecast of Jakarta Central Railway Station construction project," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 13, p. 7464, 2025, doi: 10.3390/app15137464.
- [15] S. Senses and M. Kumral, "Trade-off between time and cost in project planning: A simulation-based optimization approach," *Simulation*, vol. 100, no. 2, pp. 127–143, 2024.
- [16] A. Ehnaish and I. Badi, "Optimizing project schedules under uncertainty: A hybrid approach to crashing and risk evaluation using Monte Carlo simulation and integer linear programming," *J. Intell. Manag. Decis.*, vol. 4, no. 4, pp. 268–277, 2025, doi: 10.56578/jimd040402.
- [17] L. Guan, A. Abbasi, and M. Ryan, "A simulation-based risk interdependency network model for project risk assessment," *Decis. Support Syst.*, vol. 148, p. 113602, 2021.