



MANAJEMEN RISIKO KETERLAMBATAN PROYEK TRANSMISI 275KV BERBASIS INTEGRASI FMEA, RCA, DAN MONTE CARLO

SYLVINA VIOLANDA^{1*}, NINIET INDAH ARVITRIDA²

¹ Departemen Teknik Sistem dan Industri, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Jawa Timur

² Departemen Teknik Sistem dan Industri, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Jawa Timur

*Corresponding Author: 6010241051@student.its.ac.id

Naskah diterima: 25 Mei 2026. Disetujui: 30 Juni 2026. Diterbitkan: 31 Juli 2026

ABSTRAK

Proyek pembangunan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 275 kV yang menjadi objek studi merupakan infrastruktur krusial dalam RUPTL 2025–2034 untuk mendukung keandalan sistem interkoneksi serta integrasi Energi Baru Terbarukan (EBT). Proyek ini rentan terhadap risiko keterlambatan, sebagaimana ditunjukkan oleh kegagalan pengadaan awal dan tantangan pembebasan lahan, yang berpotensi menimbulkan dampak finansial signifikan termasuk pembayaran unutilized capacity (Take-or-Pay) atas pembangkit termal terkait. Penelitian ini bertujuan mengelola risiko keterlambatan dan merumuskan strategi mitigasi paling efektif melalui pendekatan mixed-method terintegrasi. Jalur kritis ditentukan dengan Critical Path Method (CPM); identifikasi dan prioritas risiko dilakukan melalui Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) semi-kuantitatif; akar penyebab ditelusuri dengan Root Cause Analysis (Fishbone Diagram dan 5-Whys); serta Simulasi Monte Carlo yang parameter ketidakpastiannya diturunkan dari skor FMEA, diterapkan untuk mengukur sebaran durasi, probabilitas pencapaian Commercial Operation Date (COD), dan dampak finansial. Hasil menunjukkan jalur kritis terdiri atas 16 aktivitas dengan Total Float nol; tujuh aktivitas berkategori risiko Sangat Tinggi (RPN tertinggi 80); median durasi penyelesaian 34,8 bulan (COD September 2028) dengan probabilitas memenuhi target RUPTL 0,0%; serta dampak finansial Take-or-Pay Rp 417–646 miliar per tahun dan cost-of-delay Rp 46–54 miliar per bulan. Penelitian memberikan kontribusi metodologis berupa template manajemen risiko keterlambatan yang dapat direplikasi untuk proyek transmisi sejenis.

Kata kunci : manajemen risiko proyek; *SUTET 275 kV*; *FMEA*; *Root Cause Analysis*; *Simulasi Monte Carlo*

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan, khususnya jaringan transmisi tegangan ekstra tinggi, memegang peran strategis dalam menjamin keandalan pasokan listrik nasional.

Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2025–2034 menargetkan penambahan sekitar 47.758 kms jaringan transmisi baru pada tegangan 500 kV, 275 kV, 150 kV, dan 70 kV sebagai bagian dari inisiatif green super grid nasional. Salah satu ruas strategis pada koridor 275 kV adalah proyek SUTET yang menjadi objek studi ini, yang berfungsi sebagai backbone interkoneksi dan jalur evakuasi daya pembangkit termal eksisting menuju subsistem yang membutuhkan.

Proyek transmisi berskala besar sangat rentan terhadap keterlambatan akibat kompleksitas teknis, ketergantungan antar-aktivitas, ketidakpastian pengadaan, serta kendala pembebasan lahan dan perizinan (Pall dkk., 2019). Studi pada industri konstruksi menegaskan bahwa keterlambatan umumnya bersumber dari interaksi banyak faktor sekaligus, mulai dari perencanaan, pengadaan, hingga pelaksanaan di lapangan, dan berimbas pada pembengkakan biaya serta mundurnya penyelesaian (Sambasivan & Soon, 2007; Alobadi & Naimi, 2023). Pada proyek yang dikaji, kerentanan tersebut telah terwujud melalui kegagalan pelelangan (gagal lelang) pada tahap pengadaan awal yang memaksa tender ulang, sehingga periode lelang mundur dari rencana semula dan menggeser keseluruhan baseline jadwal. Keterlambatan penyelesaian berdampak langsung pada mundurnya Commercial Operation Date (COD), yang menimbulkan kewajiban finansial berupa pembayaran unutilized capacity (Take-or-Pay) atas pembangkit yang dayanya tidak dapat dievakuasi.

Studi terdahulu mengenai keterlambatan proyek konstruksi dan energi umumnya menerapkan metode tunggal, baik Critical Path Method (CPM) untuk penjadwalan (Jha, 2015), FMEA untuk prioritas risiko (Muttaqin & Kusuma, 2018), maupun Simulasi Monte Carlo untuk kuantifikasi probabilistik (Avlijas, 2018; Ichsan dkk., 2025) secara terpisah, dan jarang memadukan keempatnya dalam satu kerangka analitik yang menghubungkan jadwal, prioritas risiko, akar penyebab, serta dampak finansial. Pendekatan pengelolaan risiko proyek yang baku pun menekankan pentingnya integrasi proses identifikasi, analisis, dan respons risiko secara menyeluruh (Project Management Institute, 2018). Beberapa studi telah memadukan analisis risiko sistemik berbasis jaringan (Ellinas dkk., 2016) dan dinamika sistem untuk menelusuri faktor keterlambatan (Zhao dkk., 2025), serta mengembangkan analisis risiko biaya–jadwal terintegrasi (Hulett, 2011); namun integrasi penuh dengan kuantifikasi probabilistik dan finansial pada konteks proyek transmisi PLN masih terbatas. Celah inilah yang menjadi fokus penelitian ini.

Tujuan penelitian ini adalah: (1) menentukan jalur kritis proyek berdasarkan CPM; (2) memprioritaskan risiko aktivitas jalur kritis dengan FMEA dan menelusuri akar penyebabnya melalui Root Cause Analysis; (3) mengkuantifikasi probabilitas keterlambatan penyelesaian melalui Simulasi Monte Carlo; serta (4) mengestimasi dampak finansial keterlambatan dan merumuskan strategi mitigasi yang terukur dan terprioritas. Kontribusi penelitian terletak pada integrasi keempat metode sebagai template manajemen risiko keterlambatan yang dapat direplikasi pada proyek transmisi sejenis.

2. METODE PENELITIAN

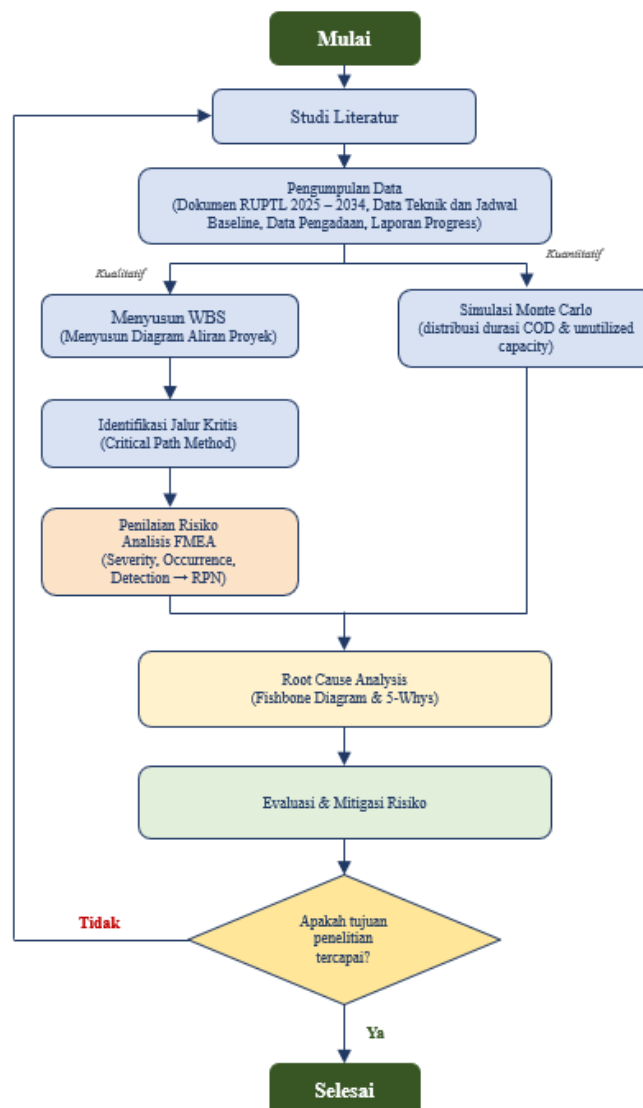
2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada satu proyek Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 275 kV yang menghubungkan dua gardu induk pada koridor interkoneksi salah satu subsistem kelistrikan besar di Indonesia. Proyek berfungsi sebagai backbone evakuasi daya pembangkit termal eksisting (2×200 MW) dan dikelola oleh unit induk pembangunan perusahaan listrik milik negara. Demi menjaga kerahasiaan, identitas proyek, lokasi geografis,

perusahaan, dan pembangkit disamakan dalam naskah ini, sementara seluruh data teknis dan finansial dipertahankan apa adanya untuk menjaga validitas analisis.

2.2. Desain Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan mixed-method terintegrasi yang memadukan metode kualitatif dan kuantitatif untuk mengevaluasi risiko keterlambatan proyek secara komprehensif. Pendekatan kualitatif dipakai untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan faktor risiko melalui Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) serta menelusuri akar penyebabnya melalui Root Cause Analysis (Fishbone Diagram dan 5-Whys). Pendekatan kuantitatif mengukur probabilitas dan dampak keterlambatan melalui Simulasi Monte Carlo yang parameter ketidakpastiannya diturunkan dari hasil FMEA. Integrasi keempat metode CPM, FMEA, Simulasi Monte Carlo, dan Root Cause Analysis yang disusun sebagai satu alur analitik yang menghubungkan jalur kritis, prioritas risiko, probabilitas keterlambatan, dampak finansial, dan akar penyebab. Alur penelitian secara keseluruhan disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir metodologi penelitian

2.3. Prosedur Pengumpulan Data

Data dikumpulkan dari dua sumber. Data sekunder bersumber dari dokumen resmi dan perencanaan proyek, meliputi jadwal proyek dan Work Breakdown Structure (WBS) baseline, risk register, pedoman manajemen risiko terintegrasi korporat, data operasi bulanan pembangkit, dokumen RUPTL 2025–2034, serta draft Service Level Agreement (SLA) 10-stage eksekusi proyek. Data primer diperoleh melalui wawancara dan diskusi terbatas dengan tim manajemen risiko dan tim proyek untuk mengonfirmasi parameter risiko, skenario durasi, dan asumsi pemodelan. Data jadwal menggunakan Microsoft Project untuk mengekstraksi struktur aktivitas, relasi ketergantungan, dan durasi; data operasi pembangkit (periode efektif $n = 17$ bulan) digunakan untuk mengestimasi parameter dampak finansial

2.4. Metode Analisis Data

Analisis data dilakukan dalam lima tahap berurutan sesuai diagram alir. Pertama, identifikasi jalur kritis dengan Critical Path Method (CPM) melalui forward dan backward pass berbasis kriteria Total Float = 0; aktivitas dengan TF = 0 membentuk jalur kritis yang menentukan total durasi proyek dan tanggal Commercial Operation Date (COD). Kedua, penilaian dan prioritas risiko 16 aktivitas jalur kritis (sebagai failure mode) menggunakan FMEA dengan Risk Priority Number (RPN), dilanjutkan pemetaan pada matriks risiko 5×5 dan klasifikasi prioritas mitigasi melalui Traffic Light System. Ketiga, Simulasi Monte Carlo durasi penyelesaian dan dampak finansial dengan distribusi Triangular yang parameternya diturunkan dari skor FMEA. Keempat, penelusuran akar penyebab risiko prioritas dengan Fishbone Diagram dan 5-Whys. Kelima, perumusan strategi mitigasi terprioritas berdasarkan triangulasi keempat metode. Formulasi matematis tiap tahap diuraikan pada Subbab 2.5.

2.5. Formulasi dan Rumus Analisis

Pada CPM, Earliest Finish (EF), Latest Start (LS), dan Total Float (TF) dihitung dengan Persamaan 1, dan aktivitas kritis memenuhi syarat $TF = 0$:

$$EF = ES + D ; LS = LF - D ; TF = LS - ES = 0 \quad (1)$$

dengan:

- EF = Earliest Finish, waktu paling awal aktivitas dapat selesai (hari);
- ES = Earliest Start, waktu paling awal aktivitas dapat dimulai (hari);
- LF = Latest Finish, waktu paling lambat aktivitas harus selesai (hari);
- LS = Latest Start, waktu paling lambat aktivitas harus dimulai (hari);
- D = durasi aktivitas (hari);
- TF = Total Float, kelonggaran waktu total aktivitas (hari).

Pada FMEA, Risk Priority Number dihitung sebagai perkalian Severity (S), Occurrence (O), dan Detection (D) pada skala 1–5:

$$RPN = S \times O \times D \quad (2)$$

dengan :

- RPN = Risk Priority Number (rentang 1–125);
- S = Severity, tingkat keparahan dampak keterlambatan terhadap COD (skala 1–5);
- O = Occurrence, tingkat peluang terjadinya keterlambatan (skala 1–5);
- D = Detection, tingkat kesulitan mendeteksi gejala keterlambatan secara dini (skala 1–5).

Pada Simulasi Monte Carlo durasi, tiap tahapan jalur kritis dimodelkan sebagai variabel acak berdistribusi Triangular dengan parameter optimis (a), most likely (m), dan pesimis (b). Parameter ini menjadi jembatan metodologis dengan FMEA sehingga sebaran durasi merupakan propagasi kuantitatif dari profil risiko FMEA. Nilai harapan dan deviasi standar dihitung dengan pendekatan PERT:

$$\mu = (a + 4m + b) / 6 ; \sigma = (b - a) / 6 \quad (3)$$

dengan :

- μ = nilai harapan (mean) durasi tahapan (bulan);
- σ = deviasi standar durasi tahapan (bulan);
- a = estimasi durasi optimis (bulan);
- m = estimasi durasi paling mungkin/most likely (bulan);
- b = estimasi durasi pesimis (bulan).

Durasi acak dibangkitkan melalui inverse transform sampling. Untuk $0 \leq U \leq (m-a)/(b-a)$ digunakan cabang naik dan selebihnya cabang turun, dengan U bilangan acak seragam pada [0,1]:

$$X = a + \sqrt{[U(b-a)(m-a)]} ; X = b - \sqrt{[(1-U)(b-a)(b-m)]} \quad (4)$$

dengan :

- X = durasi tahapan hasil pembangkitan acak (bulan);
- U = bilangan acak berdistribusi seragam pada [0,1];
- a, m, b = parameter optimis, most likely, dan pesimis (bulan).

Total durasi tiap iterasi merupakan penjumlahan durasi seluruh tahapan jalur kritis, dan simulasi dijalankan sebanyak $N = 1.000$ iterasi:

$$T_k = \sum X_{i,k}, i = 1, \dots, n ; k = 1, \dots, N \quad (5)$$

dengan:

- T_k = total durasi proyek pada iterasi ke-k (bulan);
- $X_{i,k}$ = durasi tahapan ke-i pada iterasi ke-k (bulan);
- n = jumlah tahapan jalur kritis;
- N = jumlah iterasi simulasi ($N = 1.000$).

Persentil distribusi (P10, P50, P80, P90, P95) digunakan untuk menetapkan proyeksi COD dan eksposur risiko jadwal. Pada estimasi dampak finansial unutilized capacity (Take-or-Pay), Capacity Factor (CF), energi tidak terdispatch (E_{und}), dan biaya ToP dihitung dengan Persamaan 6–8:

$$CF = E_{aktual} / (P \times t) \quad (6)$$

$$E_{und} = (CF_k - CF_a) \times P \times t \quad (7)$$

$$C_{ToP} = E_{und} \times \tau \quad (8)$$

dengan:

- CF = Capacity Factor (faktor kapasitas), rasio energi aktual terhadap energi maksimum;
- E_{aktual} = energi listrik aktual terbangkit pada periode (MWh);
- P = daya terpasang pembangkit ($P = 400$ MW);
- t = jumlah jam dalam periode (8.760 jam per tahun);
- E_{und} = energi tidak terdispatch akibat keterlambatan evakuasi daya (MWh);
- CF_k = Capacity Factor kontrak (80%);
- CF_a = Capacity Factor aktual/realisasi (rata-rata 46,5%);
- C_{ToP} = biaya Take-or-Pay (Rp);

τ = tarif ToP (Rp 0,5439 juta per MWh).

Nilai sentral MWh tidak terdispatch periode proyeksi diramalkan dengan regresi linier sederhana:

$$\hat{Y}_t = \alpha + \beta \cdot t \quad (9)$$

dengan:

- $\hat{Y}_t$ = nilai ramalan (MWh tidak terdispatch) pada periode ke- t ;
- t = indeks waktu (bulan);
- α = intersep regresi, $\alpha = \bar{y} - \beta \cdot \bar{t}$;
- β = kemiringan/slope regresi, $\beta = \Sigma(t_i - \bar{t})(y_i - \bar{y}) / \Sigma(t_i - \bar{t})^2$;
- $\bar{y}, \bar{t}$ = rata-rata nilai historis dan rata-rata indeks waktu.

Ketidakpastian volume dimodelkan dengan distribusi Normal melalui Simulasi Monte Carlo ($N = 1.000$); biaya tahunan dan persentilnya dihitung dengan Persamaan 10–11:

$$X_m = \mu + \sigma \cdot Z, \quad Z \sim N(0,1); \quad C_k = \Sigma (X_{m,k} \times \tau_{m,k}) \quad (10)$$

dengan:

- X_m = MWh tidak terdispatch bulan ke- m hasil pembangkitan acak (MWh);
- μ, σ = rata-rata (81.586 MWh) dan deviasi standar (35.557 MWh) MWh tidak terdispatch;
- Z = peubah acak normal baku, $Z \sim N(0,1)$;
- C_k = biaya ToP tahunan pada iterasi ke- k (Rp);
- $\tau_{m,k}$ = tarif ToP bulan ke- m iterasi ke- k (Rp/MWh);
- P_q = persentil ke- q dari distribusi biaya tahunan ($0 \leq q \leq 1$).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Jalur Kritis dan Sumber Keterlambatan Struktural

Analisis CPM mengidentifikasi jalur kritis yang terdiri atas 16 aktivitas dengan Total Float nol, membentang dari fase pengadaan, sampai dengan konstruksi. Total durasi baseline 720 hari kalender (ffl 24 bulan) hanya tercapai apabila seluruh relasi tumpang-tindih antar-aktivitas (Start-to-Start dan Finish-to-Finish) terealisasi sempurna; tanpa tumpang-tindih, penjumlahan durasi seluruh fase mencapai ffl 1.150 hari. Selisih sekitar 430 hari ini merepresentasikan cadangan risiko jadwal yang sudah melekat pada rencana itu sendiri artinya jadwal baseline bertumpu pada asumsi eksekusi paralel yang nyaris sempurna, sementara kondisi lapangan proyek transmisi justru rawan tertunda pada sisi pengadaan, lahan, dan pasokan material.

Kerentanan tersebut bertambah karena sebagian kelonggaran waktu telah habis sebelum konstruksi dimulai: proses pengadaan saja telah mundur dari rencana semula, sehingga proyek memasuki tahap konstruksi dalam posisi tertinggal. Hal ini menyebabkan keterlambatan pada satu titik langsung menggeser COD. Keenam belas aktivitas jalur kritis beserta kode WBS dan durasinya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Aktivitas jalur kritis proyek (TF = 0)

No.	WBS	Aktivitas Kritis (Failure Mode)	Durasi (hari)	Kategori
1	1.1.1	Penyusunan Dokumen Tender / RKS	68	Pengadaan
2	1.1.2	Penyusunan HPS	30	Pengadaan
3	1.1.3	Proses Lelang / Procurement	159	Pengadaan

No.	WBS	Aktivitas Kritis (Failure Mode)	Durasi (hari)	Kategori
4	1.1.3.1	Pengumuman / Undangan Tender	7	Pengadaan
5	1.1.3.2	Aanwijzing	7	Pengadaan
6	1.1.3.3	Pemasukan Dokumen Penawaran	28	Pengadaan
7	1.5.1	Preparation Work	107	Pra-Konstruksi
8	1.5.2	Foundation Work Tower	271	Konstruksi
9	1.5.5	Erection Work Tower	184	Konstruksi
10	1.5.7	Installation Insulator & Hardware	127	Konstruksi
11	1.5.8	Stringing & Sagging Works	78	Konstruksi
12	1.6.1	Site-testing	37	Komisioning
13	1.6.2	Pre-commissioning	15	Komisioning
14	1.6.3	Commissioning / RLB Certificate	10	Komisioning
15	1.6.4	As Built Drawing	6	Komisioning
16	1.6.5	Project Finish (BASTP)	0	Milestone

Sumber: Diolah dari jadwal proyek (Microsoft Project); 16 aktivitas dengan Total Float = 0.

Temuan ini menegaskan bahwa risiko keterlambatan tidak tersebar merata, melainkan menumpuk pada fase hulu (pengadaan dan pra konstruksi) serta pada pekerjaan tower. Karena itu, pengendalian jadwal akan memberi hasil paling besar bila diarahkan ke simpul-simpul tersebut, bukan disebar tipis ke seluruh aktivitas.

3.2 Prioritas dan Karakteristik Risiko (FMEA)

Enam belas aktivitas jalur kritis dinilai sebagai failure mode dengan FMEA pada skala 1–5 untuk Severity (keparahan dampak terhadap COD), Occurrence (peluang keterlambatan terjadi), dan Detection (kesulitan mendeteksi gejala keterlambatan secara dini). Skala penilaian mengacu pada Pedoman Manajemen Risiko Terintegrasi korporat dan penilaian tim risiko, sebagaimana diringkas pada Tabel 2. Nilai Detection ditetapkan pada rentang 2–4: D = 4 untuk lima driver utama yang paling sulit dikendalikan dini (Proses Lelang, Foundation Work Tower, Erection Work Tower, Stringing & Sagging, dan Commissioning/RLB), D = 3 untuk mayoritas aktivitas, dan D = 2 untuk tahap administratif penutup

Tabel 2. Skala penilaian Severity, Occurrence, dan Detection (1–5)

Skala	Severity (S)	Occurrence (O)	Detection (D)
1	Tidak signifikan: hampir tidak berdampak pada jadwal	Sangat kecil (< 20%): hampir tidak terjadi	Sangat mudah: terdeteksi segera/otomatis
2	Minor: keterlambatan < 1 minggu, mudah dipulihkan	Kecil (20–40%): pengendalian memadai	Mudah: tersedia early warning jelas
3	Medium: menggeser jadwal 1–2 minggu	Sedang (40–60%): bergantung kondisi lapangan	Sedang: terdeteksi via monitoring rutin
4	Signifikan: menggeser penyelesaian s/d fl1 bulan	Besar (60–80%): berulang pada proyek serupa	Sulit: faktor di luar kendali (ROW, cuaca)
5	Sangat signifikan: menggeser COD > 1 bulan	Sangat besar (≥ 80%): hampir pasti terjadi	Sangat sulit: tanpa kontrol/early warning

Sumber: Diadaptasi dari Pedoman Manajemen Risiko Terintegrasi korporat dan penilaian tim risiko.

Risk Priority Number (RPN) dihitung sebagai $RPN = S \times O \times D$ (Persamaan 2). Hasil penilaian menempatkan seluruh aktivitas pada kategori Sangat Tinggi, Tinggi, atau Sedang dan tidak ada yang Rendah. Pola ini menunjukkan bahwa tingkat risiko lebih dikendalikan oleh keparahan dampak (Severity) ketimbang peluang kejadian (Occurrence): posisi pada jalur kritis dengan sendirinya menaikkan Severity karena keterlambatan sekecil apa pun

langsung berimbas pada COD. Tujuh aktivitas berkategori Sangat Tinggi dengan RPN tertinggi 80. Prioritisasi RPN inheren disajikan pada Gambar 2, dan ringkasan penilaian pada Tabel 3.

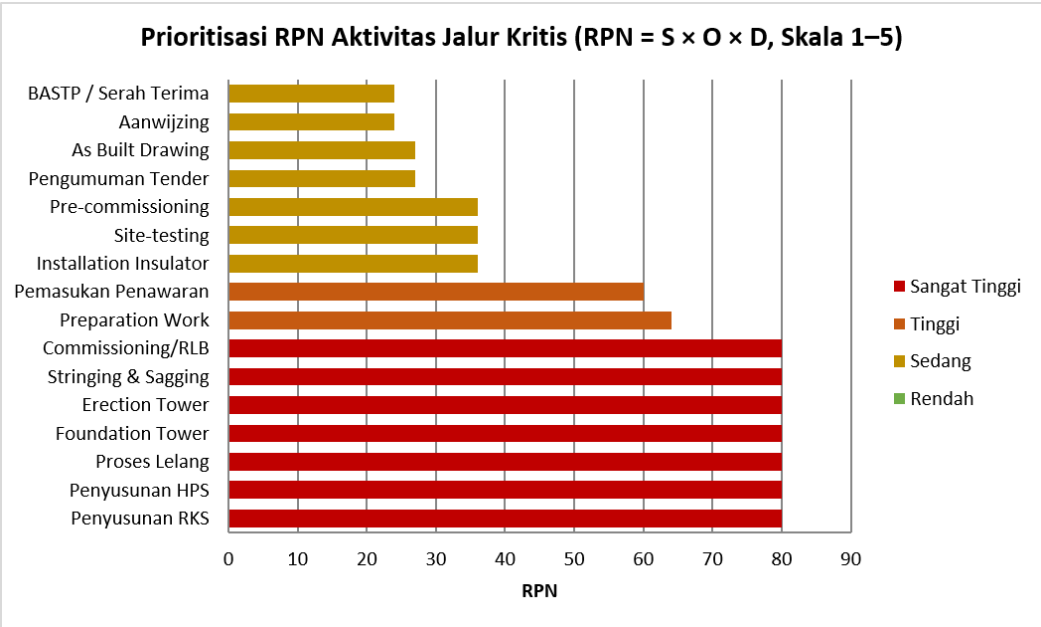
Tabel 3. Hasil FMEA aktivitas berprioritas tertinggi (kondisi inheren)

No.	Aktivitas Kritis (Failure Mode)	S	O	D	RPN	Peringkat	Tingkat Risiko
1	Penyusunan Dokumen Tender / RKS	5	4	4	80	1	Sangat Tinggi
2	Penyusunan HPS	5	4	4	80	2	Sangat Tinggi
3	Proses Lelang / Procurement	5	4	4	80	3	Sangat Tinggi
4	Pengumuman / Undangan Tender	3	3	3	27	13	Sedang
5	Aanwijzing	4	3	2	24	15	Sedang
6	Pemasukan Dokumen Penawaran	5	4	3	60	9	Sangat Tinggi
7	Preparation Work	4	4	4	64	8	Tinggi
8	Foundation Work Tower	5	4	4	80	4	Sangat Tinggi
9	Erection Work Tower	5	4	4	80	5	Sangat Tinggi
10	Installation Insulator & Hardware	4	3	3	36	10	Sedang
11	Stringing & Sagging Works	5	4	4	80	6	Sangat Tinggi
12	Site-testing	4	3	3	36	11	Sedang
13	Pre-commissioning	4	3	3	36	12	Sedang
14	Commissioning / RLB Certificate	5	4	4	80	7	Sangat Tinggi
15	As Built Drawing	3	3	3	27	14	Sedang
16	Project Finish (BASTP)	4	3	2	24	16	Sedang

Sumber: Hasil analisis FMEA ($RPN = S \times O \times D$, skala 1–5).

Seluruh enam belas aktivitas jalur kritis tergolong Sangat Tinggi, Tinggi, atau Sedang, tidak ada yang Rendah. Hal ini mencerminkan bahwa posisi aktivitas pada jalur kritis secara inheren mengangkat tingkat risikonya, karena setiap keterlambatan berdampak langsung pada COD. Tujuh aktivitas tergolong Sangat Tinggi ($RPN \geq 80$), yaitu Penyusunan Dokumen Tender/ RKS, Penyusunan Dokumen HPS, Proses Lelang, Foundation Work Tower, Erection Work Tower, Stringing & Sagging, dan Commissioning/RLB; Dua aktivitas tergolong Tinggi ($RPN 40\text{--}79$); dan Tujuh aktivitas tergolong Sedang ($RPN 20\text{--}39$). Prioritisasi visual RPN inheren disajikan pada Gambar 2.

Pemetaan pada matriks risiko 5×5 dan Traffic Light System menempatkan sembilan aktivitas pada zona Merah (mitigasi segera) dan tujuh pada zona Kuning (pengawasan rutin), tanpa zona Hijau. Konsentrasi zona Merah terjadi pada fase pengadaan (Proses Lelang) dan konstruksi (Foundation, Erection, Stringing) dua fase dengan rentang ketidakpastian durasi terlebar. Nilai Detection yang relatif tinggi ($D = 4$) pada lima driver utama mengisyaratkan bahwa kontrol eksisting baru sebagian mampu menangkap gejala keterlambatan secara dini, sehingga koreksi kerap baru dilakukan setelah dampak membesar; kelemahan deteksi ini menjadi salah satu sasaran mitigasi pada Subbab 3.6. Hasil pemetaan menempatkan enam aktivitas pada zona Sangat Tinggi, tujuh aktivitas pada zona Tinggi, dan tiga aktivitas pada zona Sedang, sebagaimana disajikan pada Tabel 4. Nomor pada sel matriks mengacu pada nomor aktivitas FMEA Tabel 3.



Gambar 2. Prioritisasi RPN inheren aktivitas jalur kritis

Tabel 4. Pemetaan Aktivitas Jalur Kritis pada Matriks Risiko 5 × 5

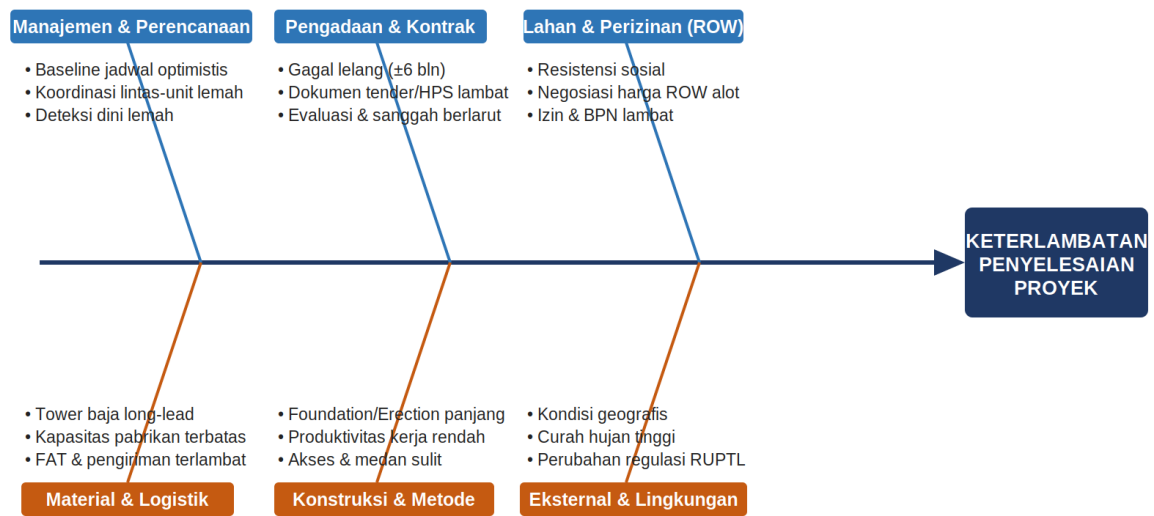
S ↓ O →	O = 1	O = 2	O = 3	O = 4	O = 5
S = 5 (Sangat Signifikan)	Sedang	Tinggi	Tinggi	Sangat Tinggi (No. 1,2,3,6, 8,9,11,14)	Sangat Tinggi
S = 4 (Signifikan)	Sedang	Sedang	Tinggi (No. 5,10, 12, 13, 16)	Sangat Tinggi (No. 7)	Sangat Tinggi
S = 3 (Medium)	Rendah	Sedang	Tinggi (No. 4,15)	Tinggi	Tinggi
S = 2 (Minor)	Rendah	Sedang	Sedang	Sedang	Tinggi
S = 1 (Tidak Signifikan)	Rendah	Rendah	Rendah	Sedang	Sedang

Konsentrasi aktivitas pada zona Sangat Tinggi terjadi pada fase pengadaan (Proses Lelang) dan konstruksi (Foundation, Erection, Stringing), yang memang merupakan dua fase dengan rentang ketidakpastian durasi terlebar dan menjadi tulang punggung jalur kritis.

3.3 Akar Penyebab Keterlambatan (Root Cause Analysis)

FMEA menetapkan aktivitas mana yang paling berisiko, tetapi belum menjelaskan mengapa risiko tersebut muncul. Celah itu ditutup melalui Root Cause Analysis. Fishbone Diagram (Gambar 3) memetakan enam kategori penyebab: Manajemen & Perencanaan, Pengadaan & Kontrak, Lahan & Perizinan (ROW), Material & Logistik, Konstruksi & Metode, serta Eksternal & Lingkungan. Penelusuran 5-Whys terhadap dua risiko zona Merah tertinggi menyimpulkan dua akar penyebab utama: (1) pada risiko pengadaan, perencanaan yang tidak front-loaded dan ketiadaan market sounding sebelum penyusunan dokumen tender; serta (2) pada risiko konstruksi, lemahnya manajemen material long-lead (tower baja) dan

metode konstruksi yang belum dipercepat, diperberat akses dan medan sulit. Rincian kategori dan penyebab dominan disajikan pada Tabel 5.



Gambar 3. Fishbone Diagram akar penyebab keterlambatan proyek

Fishbone Diagram pada Gambar 3 memetakan penyebab keterlambatan secara melebar ke dalam enam kategori, namun belum menunjukkan rantai sebab-akibat yang menghubungkan tiap penyebab hingga ke sumber paling mendasar. Untuk itu, dua kategori yang paling dominan yang berasal dari aktivitas zona Merah pada hasil FMEA, yakni kegagalan pengadaan serta keterlambatan konstruksi ditelusuri lebih dalam menggunakan metode 5-Whys.

Selanjutnya, penelusuran 5-Whys dilakukan terhadap dua risiko berprioritas tertinggi yang sama-sama berada pada zona Merah, yaitu kegagalan proses pengadaan/lelang dan keterlambatan pekerjaan konstruksi (Foundation dan Erection).

Tabel 5. Analisis 5-Whys pada Dua Risiko Berprioritas Tertinggi (Kegagalan Pengadaan dan Keterlambatan Konstruksi)

Tingkat	Pertanyaan	Jawaban
Risiko 1 Kegagalan Proses Pengadaan/Lelang (Zona Merah)		
1	Mengapa proyek tertinggal sejak gerbang awal?	Proses lelang mundur fl6 bulan akibat gagal lelang
2	Mengapa terjadi gagal lelang?	Penawaran peserta tidak memenuhi syarat administrasi/teknis/HPS
3	Mengapa penawaran tidak memenuhi syarat?	Spesifikasi dan HPS kurang akurat serta jumlah peserta terbatas
4	Mengapa HPS kurang akurat & peserta terbatas?	Dokumen tender disusun tergesa tanpa market sounding
5	Mengapa penyusunan tergesa?	Perencanaan pengadaan tidak dimulai dini dan tanpa buffer waktu
Akar	Akar Penyebab	Pengadaan tidak front-loaded dan tanpa market sounding
Risiko 2 —Keterlambatan Pekerjaan Konstruksi: Foundation & Erection (Zona Merah)		

1	Mengapa rantai konstruksi menjadi pengikat utama durasi proyek?	Pekerjaan Foundation (271 hari) dan Erection (184 hari) berdurasi panjang dan berurutan pada jalur kritis
2	Mengapa Foundation dan Erection berdurasi panjang?	Produktivitas lapangan rendah dan jumlah front kerja yang dibuka terbatas
3	Mengapa produktivitas rendah dan front kerja terbatas?	Akses lokasi dan topografi sulit serta mobilisasi alat dan material lambat
4	Mengapa mobilisasi material lambat?	Tower baja bersifat long-lead dengan kapasitas pabrikan terbatas sehingga material tidak tiba tepat waktu
5	Mengapa keterlambatan material tidak diantisipasi?	Purchase Order material long-lead tidak diterbitkan di muka dan urutan kerja tidak di-fast-track
Akar	Akar Penyebab	Lemahnya manajemen material long-lead dan metode konstruksi yang belum dipercepat (tanpa fast-track dan multi-front kerja)

Sumber: Hasil Root Cause Analysis (Fishbone Diagram dan 5-Whys).

Kedua jalur penelusuran memperlihatkan pola konsisten: keterlambatan tidak bersumber dari satu aktivitas tunggal, melainkan dari interaksi antara kelemahan di hulu (pengadaan dan manajemen material) dengan kendala pelaksanaan di lapangan (metode dan medan konstruksi). Pemahaman ini mengarahkan mitigasi agar menyasar simpul yang mampu memutus rantai keterlambatan, bukan sekadar menambal gejala di hilir.

3.4 Analisis Probabilistik Keterlambatan Jadwal

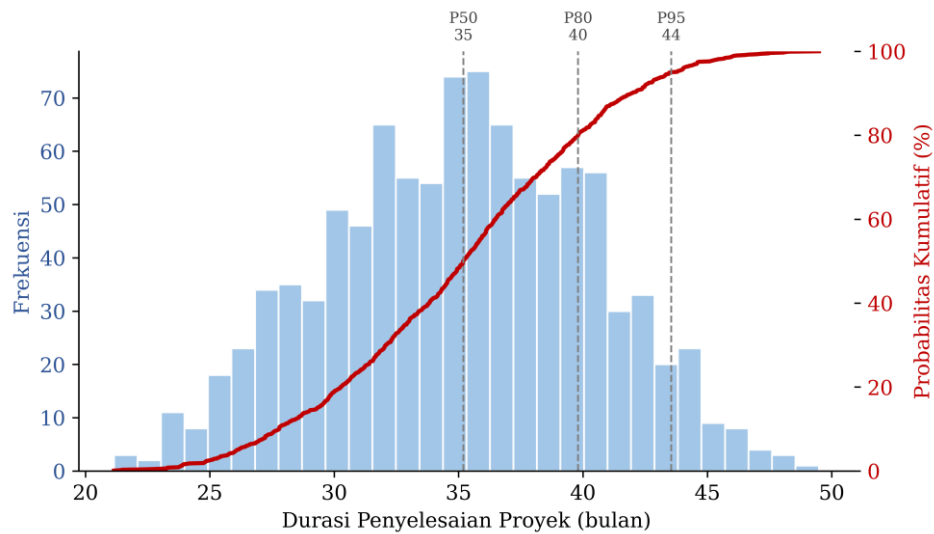
Untuk menggeser pertanyaan dari apakah proyek akan terlambat menjadi seberapa besar kemungkinannya dan seberapa lama, durasi tahapan jalur kritis disimulasikan sebagai variabel acak Triangular. Parameter diturunkan dari Service Level Agreement (SLA) 10-stage RUPTL dan konfirmasi Business Process Owner: skenario optimis dari rencana penyelesaian pemilik proses, serta moderat dan pesimis dari SLA (Tabel 6).

Tabel 6. Parameter distribusi Triangular durasi tahapan jalur kritis (bulan)

Tahapan	Optimis (a)	Moderat (m)	Pesimis (b)
Perencanaan Pengadaan	3	3	3
Pelaksanaan Pengadaan	4	8	12
Konstruksi	12	24	36
Total	19	35	51

Sumber: Diturunkan dari SLA 10-stage RUPTL dan konfirmasi Business Process Owner.

Hasil 1.000 iterasi menghasilkan distribusi durasi penyelesaian beserta kurva-S probabilitas kumulatifnya (Gambar 4), dengan rekapitulasi persentil pada Tabel 7. Median durasi penyelesaian adalah 34,8 bulan (COD September 2028) dan pada tingkat keyakinan 95% mencapai 43,5 bulan (COD Mei 2029). Sisi paling menentukan bagi pengambilan keputusan adalah peluang pencapaian target: probabilitas memenuhi target RUPTL (Desember 2026) adalah 0,0% dan target unit pengusul (Desember 2027) hanya 5,2% (Gambar 5). Angka ini menafsirkan baseline bukan sekadar optimistis, melainkan nyaris tidak mungkin dicapai, sehingga fokus pengelolaan sewajarnya bergeser dari mengejar target lama menuju penetapan target realistis dan kuantifikasi konsekuensi keterlambatan.

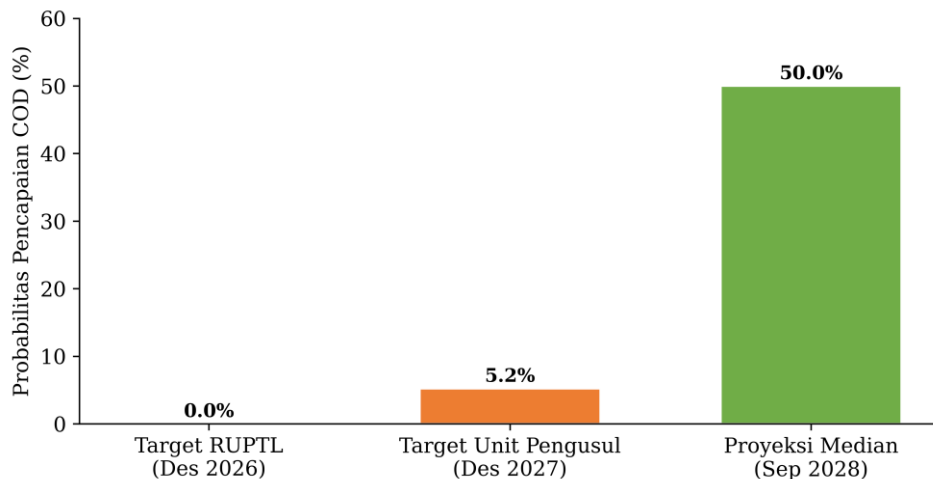


Gambar 4. Distribusi durasi penyelesaian proyek dan kurva-S probabilitas kumulatif

Tabel 7. Hasil Simulasi Monte Carlo durasi penyelesaian proyek (N = 1.000)

Metrik	Durasi (bulan)	Proyeksi COD	Keterangan
P10	28	Februari 2028	Optimistik
P50 (Median)	35	September 2028	Base case
P80	39	Januari 2029	Konservatif
P90	42	April 2029	Pesimistik
P95	44	Juni 2029	Worst case
Mean	35	September 2028	Nilai harapan

Sumber: Hasil Simulasi Monte Carlo (N = 1.000); baseline mulai Oktober 2025.

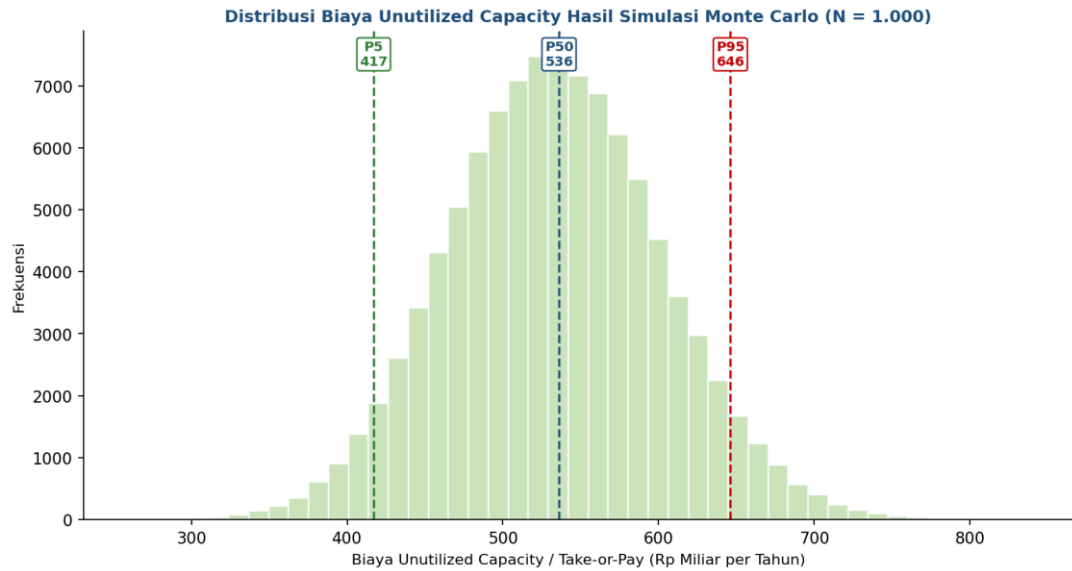


Gambar 5. Probabilitas pencapaian COD terhadap target jadwal

3.5 Analisis Dampak Finansial Keterlambatan

Keterlambatan menutup jalur evakuasi daya pembangkit termal terkait (2×200 MW), sehingga Capacity Factor realisasi turun dari 80% (kontrak) menjadi rata-rata 46,5% (maksimum historis 62%); selisihnya memunculkan kewajiban Take-or-Pay. Data operasi

efektif ($n = 17$) menunjukkan rata-rata 85.094 MWh tidak terdispatch per bulan dengan koefisien variasi 47,6%, sementara tarif efektif ToP relatif stabil (koefisien variasi 2,7%; rata-rata Rp 0,5439 juta/MWh). Karena itu ketidakpastian biaya didominasi oleh volume energi, bukan tarif, sehingga volume bulanan dimodelkan stokastik (Persamaan 9–11). Proyeksi deterministik biaya ToP 2026 adalah Rp 532,53 miliar, sedangkan Simulasi Monte Carlo ($N = 1.000$) memperkirakan rentang pada keyakinan 95% sebesar Rp 417,03–646,13 miliar per tahun dengan median Rp 536,09 miliar (Gambar 6).



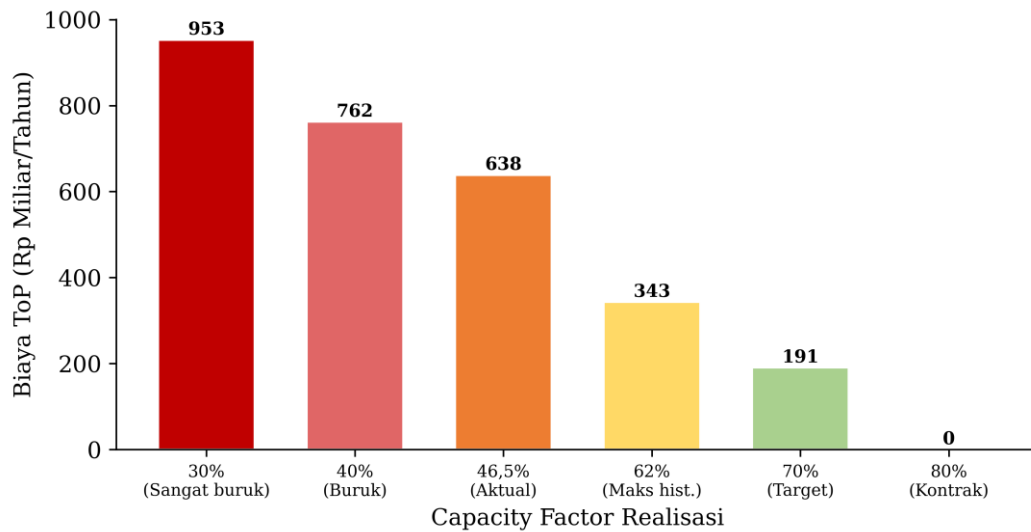
Gambar 6. Distribusi biaya unutilized capacity hasil Simulasi Monte Carlo

Analisis sensitivitas terhadap dua variabel kunci Capacity Factor realisasi dan durasi keterlambatan disajikan pada Tabel 8, dan Tabel 9. Pada CF realisasi aktual 46,5%, biaya ToP mencapai Rp 638,49 miliar per tahun; biaya meningkat tajam pada CF yang lebih rendah dan menjadi nol hanya bila CF mencapai 80% sesuai kontrak.

Tabel 8. Sensitivitas biaya Take-or-Pay terhadap Capacity Factor realisasi

Skenario CF	CF (%)	MWh Tidak Dispatch/Thn	Biaya ToP (Rp Miliar)
Sangat buruk	30%	1.752.000	952,97
Buruk	40%	1.401.600	762,38
Aktual (rata-rata)	46,5%	1.173.840	638,49
Maks historis	62%	630.720	343,07
Target	70%	350.400	190,59
Sesuai kontrak	80%	0	0,00

Hubungan terbalik antara Capacity Factor realisasi dan biaya Take-or-Pay pada Tabel 8 disajikan secara grafis pada Gambar 7, yang memperlihatkan lonjakan biaya pada skenario CF rendah.



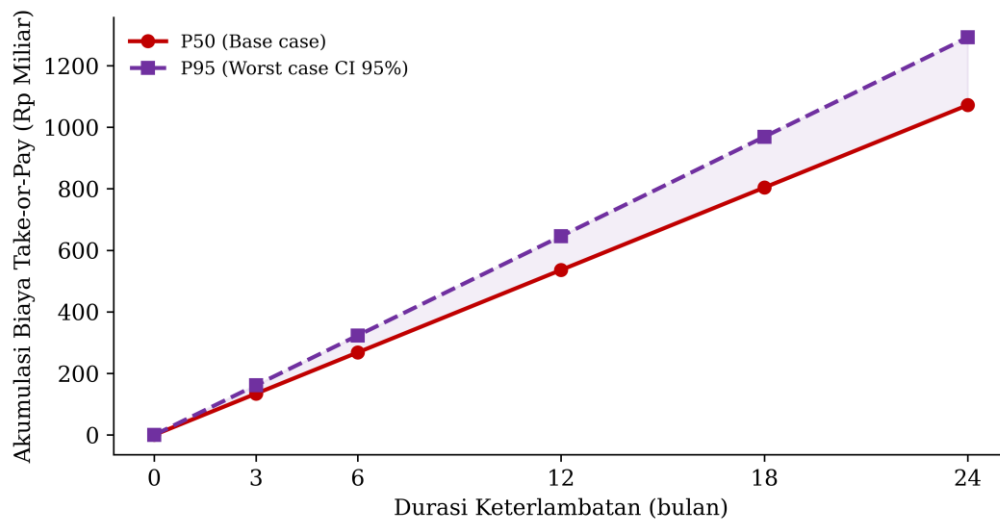
Gambar 7. Sensitivitas biaya Take-or-Pay terhadap Capacity Factor realisasi

Pada sisi durasi, setiap bulan keterlambatan menambah beban rata-rata Rp 46–54 miliar (P50–P95), sebagaimana Tabel 9 dan Gambar 8.

Tabel 9. Sensitivitas biaya Take-or-Pay terhadap durasi keterlambatan

Skenario Keterlambatan	Bulan	Biaya P50 (Rp M)	Biaya P95 (Rp M)
Tepat waktu	0	0,00	0,00
Ringan	3	134,02	161,53
Sedang	6	268,05	323,06
Berat (base risiko)	12	536,09	646,13
Sangat berat	18	804,14	969,19
Worst case	24	1.072,18	1.292,26

Sumber: Hasil Simulasi Monte Carlo; biaya proporsional terhadap durasi keterlambatan.



Gambar 8. Akumulasi biaya Take-or-Pay terhadap durasi keterlambatan

Besaran cost-of-delay ini menetapkan ambang kelayakan ekonomi bagi setiap upaya percepatan: selama biaya sebuah langkah mitigasi lebih kecil daripada kerugian yang dihindarkan, langkah itu layak secara ekonomi. Dengan cara pandang ini, dampak finansial

tidak lagi berhenti sebagai konsekuensi yang dilaporkan, tetapi menjadi dasar perhitungan investasi mitigasi, sehingga risiko jadwal dapat dikelola sebagai risiko finansial yang terukur.

3.6 Triangulasi Temuan dan Strategi Mitigasi

Keempat metode saling melengkapi dan bermuara pada simpul prioritas yang sama: pengadaan (Proses Lelang), lahan/ROW, serta material long-lead dan pekerjaan tower (Tabel 10). CPM menetapkan letak risiko pada jalur kritis; FMEA menyaring yang paling mendesak melalui zona Merah; Root Cause Analysis menjelaskan keterkaitan sebab-akibat dan titik ungkit; sedangkan Monte Carlo dan model finansial menakar seberapa mungkin, seberapa lama, dan seberapa mahal keterlambatan terjadi. Pertemuan keempatnya pada simpul yang sama memperkuat keyakinan atas prioritas intervensi.

Tabel 10. Triangulasi temuan antar-metode pada simpul prioritas

Simpul Prioritas	Temuan CPM	Kategori FMEA	Implikasi
Proses Lelang (pengadaan)	Gerbang jalur kritis; telah mundur	Sangat Tinggi	Penundaan awal menggeser seluruh COD
Preparation Work	Gerbang awal konstruksi	Sangat Tinggi	Prasyarat mulai konstruksi
Foundation & Erection Tower	Aktivitas konstruksi terpanjang (271 & 184 hari)	Sangat Tinggi	Driver utama durasi konstruksi
Stringing & Commissioning	Penutup jalur kritis	Sangat Tinggi	Penentu akhir pencapaian COD

Sumber: Sintesis hasil CPM, FMEA, RCA, dan Simulasi Monte Carlo.

Berdasarkan pertemuan temuan tersebut, strategi mitigasi disusun dalam tiga lapis. Lapis pertama, tindakan preventif di hulu berupa pengadaan front-loaded, penyiapan dokumen tender dan HPS lebih dini, market sounding, prakualifikasi penyedia yang ketat, pemaketan dan kontrak payung, serta penerbitan Purchase Order material long-lead di muka agar manufaktur tower berjalan parallel disertai pembebasan lahan/ROW yang dijalankan parallel sejak fase pengadaan melalui task-force khusus dan pemanfaatan status Proyek Strategis Nasional. Lapis kedua, percepatan rantai konstruksi melalui metode fast-track pada Foundation dan Erection, pembukaan beberapa front kerja secara paralel, manajemen vendor berbasis milestone dengan klausul insentif dan penalti, serta komisioning yang terjadwal ketat. Lapis ketiga, penguatan deteksi dini untuk menurunkan nilai Detection melalui sistem pemantauan terintegrasi berbasis kurva-S dan Earned Value Management, dilengkapi pengelolaan sisi dampak melalui optimasi dispatch pembangkit. Karena setiap bulan percepatan berpotensi menghindarkan kerugian Rp 46–54 miliar, keseluruhan program mitigasi ini memiliki justifikasi finansial yang kuat.

3.7 Implikasi Manajerial dan Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini menawarkan kontribusi metodologis berupa kombinasi FMEA yang disederhanakan dan Simulasi Monte Carlo yang selama ini belum lazim digunakan secara terpadu dalam perencanaan durasi proyek transmisi PLN. FMEA mengubah penilaian risiko dari kualitatif-subjektif menjadi semi-kuantitatif dan proaktif sehingga dapat dipakai sejak sebelum proyek dimulai, sedangkan Monte Carlo menggantikan estimasi durasi deterministik tunggal dengan distribusi probabilitas yang memungkinkan penetapan target COD realistis, buffer waktu memadai, dan pengukuran cost-of-delay. Kombinasi ini dapat direplikasi sebagai prosedur baku manajemen risiko keterlambatan bagi proyek transmisi sejenis.

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan. FMEA difokuskan pada aktivitas jalur kritis sehingga aktivitas near-critical belum tercakup; parameter distribusi Triangular diturunkan dari SLA dan konfirmasi pemilik proses, belum divalidasi dengan data historis multi-proyek; serta antar-risiko diasumsikan independen sehingga korelasi dan propagasi ketidakpastian belum dimodelkan secara penuh. Keterbatasan ini sekaligus membuka arah penelitian lanjutan.

4 KESIMPULAN

Integrasi CPM, FMEA, Root Cause Analysis, dan Simulasi Monte Carlo berhasil memetakan risiko keterlambatan proyek SUTET 275 kV secara menyeluruh dan terukur. Jalur kritis proyek terdiri atas 16 aktivitas dengan Total Float nol yang baseline 720 harinya hanya tercapai bila seluruh tumpang-tindih antar-aktivitas terealisasi sempurna, dengan driver utama Proses Lelang, Foundation Work Tower, dan Erection Work Tower. Penilaian FMEA menempatkan tujuh aktivitas pada kategori Sangat Tinggi dengan RPN tertinggi 80, dan tingkat risiko didominasi oleh keparahan dampak karena posisi pada jalur kritis membuat setiap keterlambatan langsung menggeser COD. Penelusuran akar penyebab menunjukkan keterlambatan bersumber dari pengadaan yang tidak front-loaded tanpa market sounding serta kendala pembebasan lahan/ROW yang saling memperkuat dengan rantai konstruksi yang panjang.

Secara probabilistik, median durasi penyelesaian diproyeksikan 34,8 bulan (COD September 2028), sementara dampak finansial Take-or-Pay berkisar Rp 417–646 miliar per tahun dengan cost-of-delay Rp 46–54 miliar per bulan. Temuan ini menunjukkan bahwa pengelolaan risiko jadwal sebaiknya diperlakukan sebagai pengelolaan risiko finansial, dengan strategi mitigasi tiga lapis preventif di hulu, percepatan rantai konstruksi, dan penguatan deteksi dini disertai pengelolaan sisi dampak yang difokuskan pada enam aktivitas zona Merah dan tiga titik ungkit sistem. Kerangka analitik terpadu yang dikembangkan dapat direplikasi sebagai template manajemen risiko keterlambatan bagi proyek transmisi PLN lainnya, sehingga mendukung pencapaian target RUPTL 2025–2034 secara lebih kredibel.

DAFTAR PUSTAKA

- Alobadi, H. A., & Naimi, S. (2023). IJTPE Journal A STUDY OF CONSTRUCTION DELAYS. *International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering" (IJTPE) Issue, 54*, 296–308. www.ijotpe.com
- Avlijas, G. (2018). Examining the Value of Monte Carlo Simulation for Project Time Management. *Management: Journal of Sustainable Business and Management Solutions in Emerging Economies*, 24(1), 11. <https://doi.org/10.7595/management.fon.2018.0004>
- Ellinas, C., Allan, N., & Johansson, A. (2016). Project systemic risk: Application examples of a network model. *International Journal of Production Economics*, 182, 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.011>
- Hulett, D. T. (2011). *Integrated Cost-Schedule Risk Analysis*. Gower Publishing.
- Ichsan, M., Isvara, W., & Karim, S. (2025). Monte Carlo Simulation for Enhancing the Schedule Completion Forecast of Jakarta Central Railway Station Construction Project. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/app15137464>
- Jha, K. N. (2015). *Construction Project Management: Theory and Practice*. Pearson.

- Kian Manesh Rad, E., Sun, M., & Bosch , F. (2017). Complexity for Megaprojects in the Energy Sector. *Journal of Management in Engineering*, 33(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000517](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000517)
- Muttaqin, A. Z., & Kusuma, Y. A. (2018). Analisis Failure Mode And Effect Analysis Proyek X Di Kota Madiun. 1(2), 81–96.
- Pall, G. K., Bridge, A. J., Gray, J., & Skitmore, M. (2019). Causes of delay in power transmission projects: An empirical study. *Energies*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/en13010017>
- Project Management Institute. (2018). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – Sixth Edition and Agile Practice Guide* (6th ed.). Project Management Institute.
- RUPTL PLN 2025 2034 (2). (n.d.).
- Sambasivan, M., & Soon, Y. (2007). Causes and effects of delays in Malaysian construction industry. *International Journal of Project Management*, 25, 517–525.
- Zhao, L., Qin, X., & Chen, C. (2025). Research on Risk Factors of Construction Project Delays Based on System Dynamics. *Procedia Computer Science*, 266, 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.08.044>