JURNAL LOCUS: Penelitian & Pengabdian
Volume 5 No. 9 September 2026
E-ISSN 2829-7334| P-ISSN 2829-5439
Hompage: https://locus.rivierapublishing.id/index.php/jl

Optimasi Waktu dan Biaya Proyek *Shoring Protection* Menggunakan Integrasi *Time Cost Trade Off* dan Simulasi *Monte Carlo*

Adi Eka Pranata*, Tri Joko Wahyu Adi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia
Email: pranata.ekaadi@gmail.com*, trijoko@its.ac.id

Keywords:
Time–Cost Trade-Off; Monte Carlo Simulation; Time and Cost Optimization; Project Acceleration; Risk Management; Shoring Protection.

Abstract
Construction project delays can increase costs, disrupt cash flow, and adversely affect overall project performance. These problems occurred in the 2,000-meter Shoring Protection Project in Tanah Grogot, East Kalimantan, due to low piling productivity, delayed spun-pile deliveries, and weather uncertainty. This study aimed to optimize project time and cost and determine the most realistic acceleration scenario by integrating the Time–Cost Trade-Off (TCTO) method with Monte Carlo Simulation. A quantitative approach with a simulation experiment was employed using secondary data, including the project schedule, Work Breakdown Structure, project costs, contract value, and actual productivity. Critical activities were identified using the Critical Path Method and subsequently evaluated through TCTO analysis with QM for Windows. Duration uncertainty was modeled using triangular probability distributions and 10,000 iterations in Oracle Crystal Ball. The TCTO results showed that without acceleration, the project would require a total duration of 709 days at a cost of IDR 160.53 billion. The contract schedule recovery scenario reduced the total duration to 491 days at a cost of IDR 161.51 billion, with an achievement probability of approximately 40%. The maximum acceleration scenario produced the shortest total duration of 462 days but required the highest cost of IDR 162.53 billion and had a very low probability of achievement. Meanwhile, the optimum scenario resulted in a total duration of 612 days at the lowest cost of IDR 160.57 billion, with an achievement probability approaching 100%. Therefore, integrating TCTO and Monte Carlo Simulation provides a more comprehensive basis for project acceleration decisions by simultaneously considering time, cost, and risk. The optimum scenario is recommended as the most efficient and reliable alternative for project completion.

Kata Kunci:
Time–Cost Trade-Off; Simulasi *Monte Carlo*; Optimasi Waktu Dan Biaya, Percepatan Proyek; Manajemen Risiko; *Shoring Protection.*

Abstrak
Keterlambatan proyek konstruksi dapat meningkatkan biaya, mengganggu arus kas, dan menurunkan kinerja proyek. Permasalahan ini terjadi pada Proyek Shoring Protection sepanjang 2.000 meter di Tanah Grogot, Kalimantan Timur, akibat rendahnya produktivitas pemancangan, keterlambatan pasokan spun pile, dan ketidakpastian cuaca. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan waktu dan biaya proyek serta menentukan skenario percepatan yang paling realistis melalui integrasi metode *Time–Cost Trade-Off* (TCTO) dan Simulasi *Monte Carlo*. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan eksperimen simulatif berdasarkan data sekunder berupa jadwal pelaksanaan, *Work Breakdown Structure*, biaya proyek, nilai kontrak, dan produktivitas aktual. Aktivitas kritis diidentifikasi menggunakan *Critical Path Method*, kemudian dianalisis melalui TCTO dengan QM *for Windows*. Ketidakpastian durasi dimodelkan menggunakan distribusi triangular melalui 10.000 iterasi pada *Oracle Crystal Ball*. Hasil TCTO menunjukkan bahwa tanpa percepatan, proyek memerlukan total durasi 709 hari dengan biaya Rp160,53 miliar. Skenario pemulihan jadwal kontrak menghasilkan durasi total 491 hari dengan biaya Rp161,51 miliar dan probabilitas pencapaian sekitar 40%.

Skenario percepatan maksimum menghasilkan durasi total 462 hari dengan biaya tertinggi sebesar Rp162,53 miliar, tetapi memiliki probabilitas pencapaian yang sangat rendah. Sementara itu, skenario optimum menghasilkan total durasi 612 hari dengan biaya terendah sebesar Rp160,57 miliar dan probabilitas pencapaian mendekati 100%. Dengan demikian, integrasi TCTO dan Simulasi *Monte Carlo* menghasilkan keputusan percepatan yang lebih komprehensif karena mempertimbangkan waktu, biaya, dan risiko secara simultan. Skenario optimum direkomendasikan sebagai alternatif paling efisien dan andal untuk penyelesaian proyek.

PENDAHULUAN

Salah satu permasalahan utama dalam industri konstruksi, baik di tingkat global maupun nasional, adalah keterlambatan penyelesaian proyek. Hampir seluruh proyek konstruksi, baik berskala kecil maupun besar, berpotensi mengalami deviasi waktu akibat ketidaksesuaian antara perencanaan dan pelaksanaan. Dampak keterlambatan tidak hanya berupa peningkatan biaya proyek, tetapi juga berimplikasi pada munculnya klaim denda keterlambatan, terganggunya arus kas, penurunan kualitas pekerjaan, serta menurunnya reputasi kontraktor maupun pemilik proyek. Sumber keterlambatan tersebut dapat berasal dari faktor internal, seperti rendahnya produktivitas tenaga kerja, keterlambatan suplai material, dan keterbatasan peralatan, maupun faktor eksternal, seperti kondisi cuaca ekstrem, perubahan regulasi, serta dinamika sosial di lapangan.

Dalam praktiknya, upaya percepatan proyek konstruksi sering dilakukan secara reaktif melalui penambahan jam kerja, peningkatan jumlah tenaga kerja, atau penyediaan peralatan tambahan tanpa didukung oleh analisis yang sistematis mengenai keseimbangan antara waktu dan biaya (Abbas Hassan et al., 2023). Metode penjadwalan konvensional seperti *Critical Path Method* (CPM) umumnya hanya berfokus pada identifikasi jalur kritis dan estimasi durasi aktivitas berbasis asumsi deterministik. Metode ini belum dirancang untuk mengevaluasi konsekuensi biaya dari strategi percepatan yang dipilih. Akibatnya, keputusan percepatan kerap menimbulkan tambahan biaya yang tidak terukur secara akurat, sementara target durasi proyek tetap sulit dicapai akibat variasi produktivitas, keterbatasan material, dan ketidakpastian kondisi lapangan (Hassan et al., 2023).

Metode penjadwalan konvensional seperti *Critical Path Method* (CPM) secara luas digunakan untuk mengidentifikasi aktivitas kritis yang menentukan durasi proyek. Meskipun CPM efektif dalam menentukan jalur kritis, metode ini pada dasarnya bersifat deterministik dan mengasumsikan bahwa durasi aktivitas dapat diperkirakan secara pasti. Project Management Institute (2019) menyatakan bahwa pendekatan deterministik memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan kondisi aktual proyek konstruksi, terutama ketika proyek dihadapkan pada variabilitas produktivitas, gangguan suplai material, dan ketidakpastian lingkungan kerja.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, metode *Time–Cost Trade-Off* (TCTO) dikembangkan sebagai pendekatan analitis untuk menentukan kombinasi durasi dan biaya proyek yang paling efisien. Prinsip dasar TCTO menyatakan bahwa percepatan durasi aktivitas proyek (*crashing*) umumnya akan meningkatkan biaya langsung, sementara durasi proyek yang lebih panjang akan meningkatkan biaya tidak langsung, sehingga terdapat suatu titik optimum di mana total biaya proyek menjadi minimum (Kelley, 1961). Namun, berbagai studi literatur menunjukkan bahwa penerapan TCTO klasik umumnya masih bersifat deterministik

dan menghasilkan solusi optimum dalam bentuk satu nilai tunggal, tanpa mempertimbangkan ketidakpastian durasi dan biaya aktivitas di lapangan (Hosseinpour et al., 2023).

Keterbatasan pendekatan deterministik menjadi semakin signifikan pada proyek konstruksi yang bersifat linear dan berulang. Proyek jenis ini memiliki karakteristik aktivitas yang relatif seragam, dilakukan secara repetitif dalam segmen panjang, serta sangat dipengaruhi oleh produktivitas peralatan, kondisi cuaca, dan kelancaran suplai material. (Abdelhady et al., 2025) menunjukkan bahwa pada proyek konstruksi linear, variabilitas produktivitas dapat menyebabkan deviasi durasi dan biaya yang signifikan jika tidak dimodelkan secara eksplisit dalam proses perencanaan dan pengambilan keputusan percepatan.

Studi kasus dalam penelitian ini adalah *Proyek Shoring Protection* sepanjang 2000 meter di Tanah Grogot, Kalimantan Timur, yang dilaksanakan dengan skema kontrak design and build. Proyek ini melibatkan pekerjaan preboring dan pemancangan spun pile berdiameter 800 mm hingga kedalaman 30 meter. Dalam pelaksanaannya, proyek menghadapi permasalahan produktivitas yang signifikan, di mana capaian aktual pemancangan hanya mencapai sekitar 4 titik per hari, jauh di bawah target perencanaan sebesar 9 titik per hari. Selain itu, keterlambatan suplai material spun pile akibat kondisi cuaca serta ketidakpastian cuaca di lokasi proyek semakin meningkatkan risiko keterlambatan penyelesaian dan pembengkakan biaya proyek.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keputusan percepatan proyek pada studi kasus ini tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan hasil analisis deterministik semata. Diperlukan pendekatan yang mampu mengakomodasi ketidakpastian durasi dan biaya aktivitas sehingga alternatif percepatan yang dihasilkan tidak hanya efisien secara teoritis, tetapi juga realistis dan andal dalam implementasinya. Dalam konteks ini, simulasi *Monte Carlo* telah banyak digunakan untuk memodelkan ketidakpastian durasi dan biaya proyek secara probabilistik, sehingga memungkinkan estimasi durasi dan biaya proyek pada tingkat keyakinan tertentu (Chen et al., 2021; Zygiaris et al., 2022).

Oleh karena itu, integrasi metode *Time–Cost Trade-Off* (TCTO) dengan Simulasi *Monte Carlo* dipandang sebagai pendekatan yang lebih komprehensif dalam menganalisis percepatan proyek konstruksi. Metode TCTO digunakan untuk merumuskan alternatif percepatan berdasarkan keseimbangan waktu dan biaya, sedangkan Simulasi *Monte Carlo* digunakan untuk mengevaluasi reliabilitas dan risiko dari setiap alternatif percepatan dalam kondisi ketidakpastian. Pendekatan terintegrasi ini memungkinkan analisis percepatan proyek tidak hanya berfokus pada satu solusi optimum, tetapi juga pada berbagai alternatif dengan tingkat probabilitas pencapaian yang terukur, sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan percepatan proyek yang lebih adaptif dan berbasis risiko, khususnya pada proyek konstruksi linear dan berulang seperti pekerjaan shoring protection. Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah penelitian ini meliputi identifikasi alternatif percepatan yang memungkinkan diterapkan pada *Proyek Shoring Protection*, integrasi metode TCTO dan Simulasi *Monte Carlo* dalam pelaksanaan percepatan proyek, serta strategi implementasi yang mampu mendukung pengambilan keputusan percepatan proyek secara adaptif dan berbasis risiko. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menerapkan pendekatan integrasi metode TCTO dan Simulasi Monte Carlo guna mengoptimalkan percepatan waktu dan biaya pada *Proyek Shoring Protection* melalui identifikasi aktivitas kritis, penyusunan model analisis, dan penerapan model tersebut untuk menghasilkan skenario percepatan yang efisien dari sisi biaya serta memiliki tingkat keandalan penyelesaian yang tinggi dalam kondisi ketidakpastian.

Penelitian ini dibatasi pada Proyek Shoring Protection sepanjang 2.000 meter di Tanah Grogot dengan fokus pada pekerjaan pemancangan spun pile. Variabel yang dianalisis hanya mencakup waktu (durasi) dan biaya (*direct* dan *indirect cost*), menggunakan data produktivitas aktual serta keterlambatan suplai spun pile akibat cuaca, tanpa mengubah metode pelaksanaan proyek, dengan asumsi skema kontrak design and build dan harga satuan tetap hingga proyek selesai. Risiko di luar ruang lingkup penelitian, seperti force majeure, perubahan desain yang signifikan, maupun perubahan kebijakan pemerintah, tidak diperhitungkan dalam analisis. Hasil penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi secara teoretis dalam pengembangan literatur mengenai integrasi TCTO dan Simulasi *Monte Carlo*, secara praktis sebagai alat bantu bagi manajer proyek dalam menentukan strategi percepatan aktivitas kritis yang efisien dan realistis, serta bagi industri konstruksi sebagai bukti empiris bahwa kombinasi kedua metode tersebut dapat diterapkan untuk mendukung pengelolaan proyek infrastruktur, khususnya pada pekerjaan shoring protection

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksperimen simulatif yang bertujuan untuk menganalisis hubungan waktu dan biaya proyek serta menentukan alternatif percepatan yang paling optimal. Metode yang digunakan terdiri atas dua tahapan utama, yaitu analisis deterministik menggunakan *Time–Cost Trade-Off* (TCTO) dan analisis probabilistik menggunakan Simulasi *Monte Carlo*. Data penelitian berupa data sekunder yang diperoleh dari dokumen proyek, seperti jadwal pelaksanaan, *Work Breakdown Structure* (WBS), harga satuan pekerjaan, nilai kontrak, produktivitas, dan biaya proyek. Tahap awal penelitian meliputi pengumpulan data, identifikasi lintasan kritis menggunakan *Critical Path Method* (CPM), serta penentuan alternatif percepatan berdasarkan data historis proyek, sehingga diperoleh parameter durasi dan biaya pada kondisi normal maupun percepatan sebagai dasar analisis TCTO.

Analisis TCTO dilakukan untuk menentukan kombinasi percepatan yang paling efisien melalui perhitungan cost slope, penentuan urutan percepatan aktivitas kritis, serta evaluasi perubahan durasi dan biaya total proyek hingga diperoleh solusi optimum secara deterministik. Selanjutnya, ketidakpastian durasi aktivitas dimodelkan menggunakan Simulasi Monte Carlo dengan distribusi probabilitas triangular berdasarkan data historis proyek. Simulasi dijalankan menggunakan perangkat lunak *Crystal Ball* sebanyak 10.000 iterasi untuk menghasilkan distribusi probabilitas durasi dan biaya proyek serta mengevaluasi tingkat ketercapaian solusi percepatan pada berbagai tingkat keyakinan, khususnya persentil P50 dan P80.

Tahap akhir penelitian adalah mengintegrasikan hasil analisis TCTO dan Simulasi Monte Carlo untuk memperoleh alternatif percepatan yang tidak hanya memberikan biaya dan durasi yang optimal, tetapi juga memiliki tingkat probabilitas keberhasilan yang tinggi dalam kondisi ketidakpastian. Setiap skenario percepatan dievaluasi berdasarkan efisiensi biaya, pencapaian waktu penyelesaian, dan tingkat risiko sehingga diperoleh solusi yang paling realistis untuk diterapkan. Hasil penelitian selanjutnya dibahas melalui analisis sensitivitas dan implikasi manajerial sebagai dasar pengambilan keputusan percepatan proyek yang adaptif, efisien, dan berbasis risiko pada *Proyek Shoring Protection*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisa Metode *Time Cost Trade Off*

Pada tahap ini dilakukan analisis *Time-Cost Trade-Off* (TCTO) menggunakan perangkat lunak QM for Windows untuk menentukan alternatif percepatan (*crashing*) yang menghasilkan biaya total proyek paling optimal. Analisis difokuskan pada aktivitas-aktivitas yang belum dimulai karena aktivitas tersebut masih memiliki fleksibilitas untuk dilakukan percepatan tanpa mengganggu pekerjaan yang telah selesai maupun yang sedang berlangsung. Melalui analisis ini dapat diidentifikasi kombinasi aktivitas kritis yang perlu dipercepat beserta tingkat percepatan yang paling efisien, sehingga diperoleh alternatif penyelesaian proyek yang mampu mengurangi keterlambatan dengan konsekuensi biaya yang minimum. Hasil analisis selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penyusunan skenario percepatan proyek serta evaluasi keseimbangan antara waktu penyelesaian dan biaya pelaksanaan proyek.

Identifikasi *Schedule* dan Biaya *Crashing* pada Sisa Aktivitas Kritis

Setelah dilakukan analisis strategi percepatan, langkah selanjutnya adalah mengidentifikasi perubahan biaya baik direct cost maupun indirect cost akibat dilakukan crashing. *Schedule* dan biaya Percepatan dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Tabel Normal dan Crashing

Task Name	Schedule Normal				Schedule Crashing				TCTO		
	Duration (days)	Biaya Langsung (Rp)	Biaya Tak Langsung (Rp)	Biaya Total	Duration (days)	Biaya Langsung (Rp)	Biaya Tak Langsung (Rp)	Biaya Total	Cost Slope (Rp/day)	BTL/day (Rp/day)	Net Slope (Rp/day)
TOTAL DURASI SISA	**529**				**311**					**1.924.421,50**	**8.822.578,50**
Handling Spun Pile	135	Rp 806.025.000	Rp 45.500.000	Rp 851.525.000	75	Rp 1.450.845.000	Rp 25.500.000	Rp 1.476.345.000	10.747.000,00	1.924.421,50	8.822.578,50
Preboring	320	Rp 1.610.000.000	Rp 26.000.000	Rp 1.636.000.000	306	Rp 1.750.000.000	Rp 26.010.000	Rp 1.776.010.000	10.000.000,00	1.924.421,50	8.075.578,50
Piling	320	Rp 7.978.500.000	Rp 130.133.333	Rp 8.108.633.333	160	Rp 9.200.000.000	Rp 48.000.000	Rp 9.248.000.000	7.634.375,00	1.924.421,50	5.709.953,50
Jointing	320	Rp 476.160.000	Rp 120.533.333	Rp 596.693.333	160	Rp 520.000.000	Rp 48.000.000	Rp 568.000.000	274.000,00	1.924.421,50	-1.650.421,50

Task Name	Schedule Normal				Schedule Crashing				TCTO		
	Duration (days)	Biaya Langsung (Rp)	Biaya Tak Langsung (Rp)	Biaya Total	Duration (days)	Biaya Langsung (Rp)	Biaya Tak Langsung (Rp)	Biaya Total	Cost Slope (Rp/day)	BTL/day (Rp/day)	Net Slope (Rp/day)
Cutting Pile	320	Rp 379.470.000	Rp 96.000.000	Rp 475.470.000	160	Rp 430.000.000	Rp 48.000.000	Rp 478.000.000	315.812,50	1.924.421,50	-1.608.609,00
Install Rebar PHT	350	Rp 122.349.010	Rp 70.000.000	Rp 192.349.010	170	Rp 155.000.000	Rp 34.000.000	Rp 189.000.000	181.394,39	1.924.421,50	-1.743.027,11
Install Formwork PHT	350	Rp 42.172.690	Rp 70.000.000	Rp 112.172.690	170	Rp 55.000.000	Rp 34.000.000	Rp 89.000.000	71.262,83	1.924.421,50	-1.853.158,67
Pouring Concrete PHT	330	Rp 32.617.220	Rp 32.617.220	Rp 65.234.440	165	Rp 42.000.000	Rp 32.500.000	Rp 74.500.000	56.865,33	1.924.421,50	-1.867.556,17
Install Rebar Capping Beam	330	Rp 462.487.320	Rp 65.450.000	Rp 527.937.320	120	Rp 575.000.000	Rp 24.000.000	Rp 599.000.000	535.774,67	1.924.421,50	-1.388.646,83
Install Bekisting Capping Beam	330	Rp 201.631.680	Rp 65.450.000	Rp 267.081.680	120	Rp 250.000.000	Rp 24.000.000	Rp 274.000.000	230.325,33	1.924.421,50	-1.694.096,17
Pouring Concrete Capping Beam	330	Rp 155.891.304	Rp 65.450.000	Rp 221.341.304	120	Rp 195.000.000	Rp 24.000.000	Rp 219.000.000	186.231,89	1.924.421,50	-1.738.189,61

Untuk menentukan apakah suatu aktivitas layak dilakukan percepatan, digunakan parameter *net slope*, yaitu selisih antara *cost slope* dengan biaya tidak langsung per hari. Interpretasinya adalah sebagai berikut:

1. *Net slope* negatif: percepatan mengurangi biaya total proyek
2. *Net slope* positif: percepatan berpotensi menambah biaya total proyek

Hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian besar aktivitas memiliki nilai *net slope* negatif, yang berarti percepatan pada aktivitas tersebut dapat memberikan penghematan biaya total proyek. Sebaliknya, aktivitas handling, preboring dan *piling* memiliki nilai *net slope*

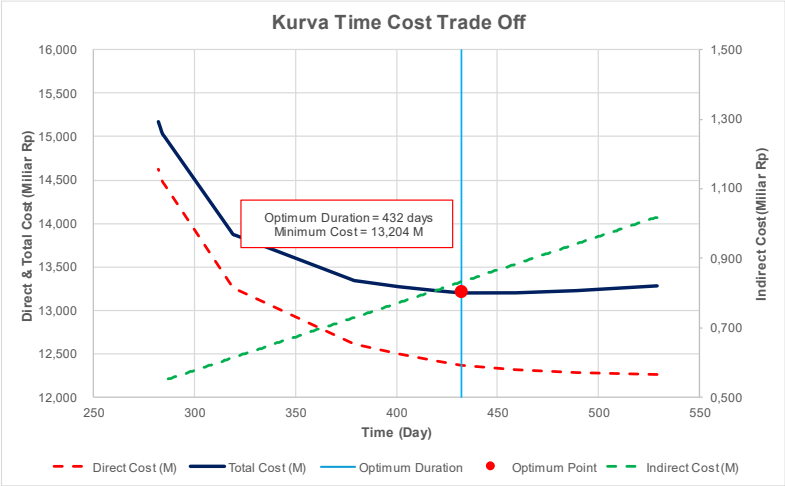
positif, yang menunjukkan bahwa percepatan pada aktivitas ini berpotensi menimbulkan kenaikan total biaya proyek.

Selanjutnya tabel 4.4 digunakan sebagai sumber data biaya dan schedule baik normal maupun crashing untuk melakukan analisis TCTO menggunakan bantuan perangkat lunak QM for Windows.

Penentuan Durasi Percepatan Optimum

Penentuan durasi percepatan optimum dalam penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan *Time–Cost Trade-Off* (TCTO) dengan bantuan perangkat lunak QM for Windows. Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi kombinasi durasi dan biaya yang menghasilkan total biaya proyek minimum melalui proses iteratif percepatan aktivitas-aktivitas kritis. Inputan untuk data untuk software QM for Windows dapat dilihat di Lampiran 5.

Dalam model yang digunakan, setiap aktivitas direpresentasikan oleh parameter durasi normal, durasi *crash*, biaya normal, dan biaya *crash*. Selanjutnya dihitung nilai *cost slope*, yang menggambarkan tambahan biaya langsung untuk setiap satuan waktu percepatan. Analisis kemudian dilakukan dengan mempertimbangkan biaya tidak langsung proyek per hari, sehingga dapat ditentukan aktivitas mana yang layak untuk dipercepat berdasarkan prinsip efisiensi biaya. Hasil analisis output software QM for Windows divisualisasikan dalam kurva *Time–Cost Trade-Off* sebagaimana ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 1. Grafik Durasi dan Biaya Optimum

Dari kurva didapatkan bahwa biaya langsung (*direct cost*) mengalami peningkatan seiring dengan percepatan durasi proyek. Hal ini disebabkan oleh kebutuhan tambahan sumber daya, seperti peningkatan jumlah tenaga kerja, penggunaan alat dengan kapasitas lebih tinggi, maupun penerapan kerja lembur.

Biaya tidak langsung (*indirect cost*) menunjukkan tren penurunan seiring dengan percepatan durasi proyek. Penurunan ini terjadi karena berkurangnya waktu pelaksanaan proyek, sehingga biaya *overhead* seperti biaya manajemen, administrasi, dan operasional lapangan menjadi lebih kecil.

Berdasarkan grafik hasil TCTO didapatkan informasi sebagai berikut :

1. Apabila tidak dilakukan upaya percepatan terutama pada sisa aktivitas kritis, maka total waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proyek adalah 529 hari, dengan biaya total pekerjaan pada sisa aktivitas kritis Rp. 13.285.323.197,-
2. Sesuai dengan skenario 1 untuk mengembalikan durasi proyek menjadi 491 hari (sesuai kontrak), maka sisa aktivitas harus selesai dalam durasi 311 hari. Biaya total untuk aktivitas kritis yang diperlukan untuk melakukan percepatan skenario ini adalah Rp. 14.139.040.310,-.
3. Skenario percepatan paling optimum (skenario 2) adalah melakukan percepatan durasi dengan total biaya paling minimum, hal ini bisa diraih dengan melaksanakan durasi 432 hari dengan biaya total Rp. 13.204.045.411,- dengan catatan bahwa penyelesaian proyek akan terlambat 121 hari dari rencana.
4. Skenario yang terakhir adalah melakukan percepatan paling maksimal yang bisa dilakukan, yaitu dengan menyelesaikan sisa proyek dengan durasi 282 hari yang mengakibatkan proyek selesai lebih awal dengan total durasi 462 hari (maju 29 hari dari rencana). Biaya total yang dibutuhkan untuk skenario ini adalah Rp.15.165.532.086,-.

Atau jika dirangkum dalam tabel hasilnya adalah sebagai berikut :

Tabel 2. Hasil Analisis TCTO

No	Durasi Sisa Pekerjaan (hari)	Total Durasi Proyek (hari)	Biaya Sisa Aktivitas Kritis	Biaya Total Proyek	Keterangan
1	529	709	Rp.13.285.323.197	Rp.160.532.427.596	Tanpa Skema Percepatan
2	311	491	Rp.14.139.040.311	Rp.161.507.144.709	Kembali sesuai rencana kontrak
3	432	612	Rp.13.204.045.411	Rp.160.572.149.810	Paling Optimum
4	282	462	Rp.15.165.532.087	Rp.162.533.636.486	Percepatan Paling Maksimal

Simulasi Monte Carlo

Analisis *Time–Cost Trade-Off* (TCTO) yang telah dilakukan pada tahap sebelumnya menghasilkan beberapa alternatif percepatan proyek, termasuk skenario yang mampu mengembalikan durasi penyelesaian proyek sesuai target kontrak dengan menyelesaikan sisa pekerjaan dalam waktu 311 hari. Namun demikian, hasil TCTO tersebut diperoleh menggunakan pendekatan deterministik yang mengasumsikan bahwa seluruh aktivitas proyek dapat dilaksanakan sesuai durasi yang telah ditetapkan. Dalam praktiknya, pelaksanaan proyek konstruksi menghadapi berbagai sumber ketidakpastian yang dapat memengaruhi durasi aktivitas, seperti kondisi cuaca, produktivitas tenaga kerja, ketersediaan peralatan, keterlambatan material, serta faktor-faktor operasional lainnya.

Simulasi Monte Carlo digunakan untuk memodelkan ketidakpastian durasi aktivitas dengan pendekatan probabilistik. Setiap aktivitas direpresentasikan menggunakan tiga parameter durasi, yaitu durasi minimum (*optimistic*), durasi paling mungkin (*most likely*), dan durasi maksimum (*pessimistic*). Ketiga parameter tersebut digunakan untuk membentuk distribusi probabilitas yang menggambarkan variasi durasi aktivitas yang mungkin terjadi selama pelaksanaan proyek.

Melalui analisis ini akan diketahui seberapa besar probabilitas tercapainya durasi penyelesaian proyek setelah dilakukan crashing. Dengan demikian, simulasi Monte Carlo dapat memberikan gambaran yang lebih realistis mengenai tingkat risiko keterlambatan proyek serta probabilitas keberhasilan setiap skenario percepatan yang telah diperoleh dari analisis *Time–Cost Trade-Off*.

Penentuan Parameter Durasi Probabilistik

Penentuan parameter durasi dilakukan dengan mengacu pada data historis proyek yang sudah dilakukan di area lain, pengalaman lapangan, serta pertimbangan kondisi teknis masing-masing aktivitas. Setiap aktivitas didefinisikan menggunakan tiga parameter:

1. Durasi minimum (*Min*) : kondisi ideal (tanpa gangguan)
2. Durasi paling mungkin (*Most Likely*) : kondisi normal
3. Durasi maksimum (*Max*) : kondisi terburuk (*delay*, cuaca, dll)

Tabel 3. Parameter Durasi Probabilistik

Task Name	***Code***	***Duration Plan (days)***	***Min (days)***	***Most likely (days)***	***Max (days)***	**Kondisi yang Mempengaruhi**
Handling Spun Pile	A	75	65	75	90	alat
Preboring	B	306	275	306	340	alat
Piling	C	160	135	160	210	alat
Jointing	D	160	135	160	210	alat
Cutting Pile	E	160	135	160	210	alat
Install Rebar PHT	F	170	145	170	225	manpower
Install Formwork PHT	G	170	145	170	225	metode kerja
Pouring Concrete PHT	H	165	140	165	215	cuaca
Install Rebar Capping Beam	I	120	100	120	165	manpower
Install Bekisting Capping Beam	J	120	100	120	165	metode kerja
Pouring Concrete Capping Beam	K	120	100	120	165	cuaca

Pendekatan ini menggunakan distribusi *Triangular Distribution*, yang umum digunakan dalam analisis proyek karena sederhana dan realistis dalam merepresentasikan ketidakpastian.

Pemodelan Simulasi Monte Carlo

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Oracle Crystal Ball dengan konfigurasi sebagai berikut:

1. Jumlah iterasi (*trials*): 10.000
2. *Confidence level*: 95%
3. Distribusi: Triangular
4. Variabel output: total durasi proyek (total sim dur)

Dalam model ini, setiap aktivitas diperlakukan sebagai variabel acak dengan distribusi *triangular*. Nilai durasi simulasi dihasilkan secara acak pada setiap iterasi, kemudian dijumlahkan berdasarkan struktur pekerjaan untuk memperoleh total durasi proyek.

Selain itu, model juga mempertimbangkan faktor penyesuaian biaya (c*ost multiplier*) untuk merepresentasikan peningkatan biaya akibat ketidakpastian durasi.

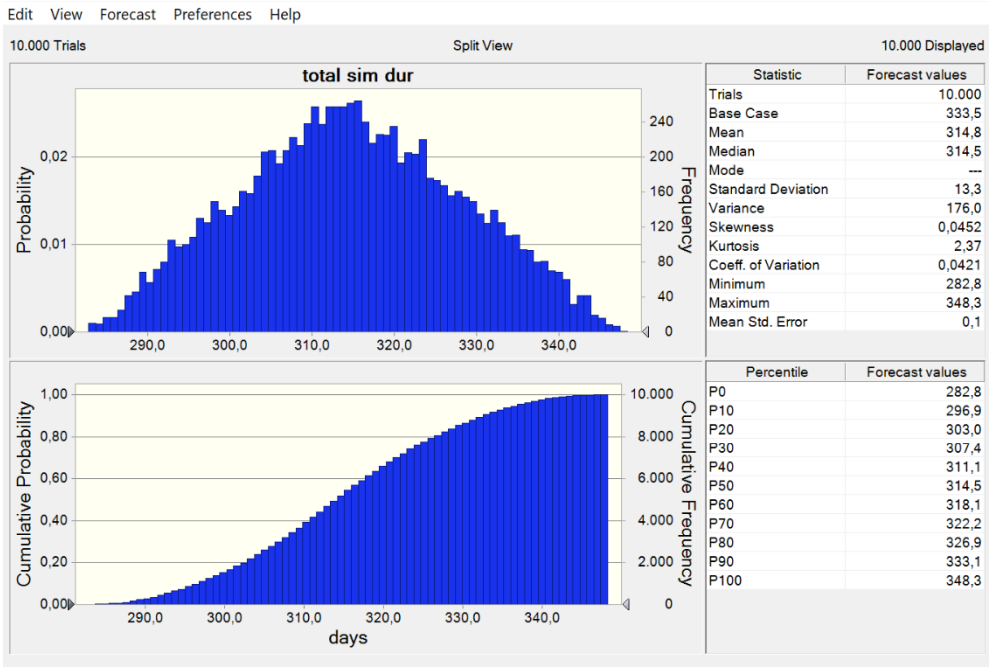
Tabel 4. Identifikasi Durasi dan Biaya Analisis Monte Carlo

Task Name	Code	Duration Plan (days)	Min (days)	Most likely (days)	Max (days)	Sim. Dur (days)	Direct Cost (plan)	Cost factor	Cost Multiplier	Direct Cost (simulation)	Indirect Cost/day	Kondisi yang Mempengaruhi
Handling Spun Pile	A	75	65	75	90	84	Rp 806.025.000	1,10	1,12	Rp 902.758.369	Rp 1.924.421	alat
Preboring	B	306	275	306	340	325	Rp 1.610.000.000	1,10	1,06	Rp 1.873.575.426		alat
Piling	C	160	135	160	210	191	Rp 7.978.500.000	1,10	1,19	Rp 10.411.385.612		alat
Jointing	D	160	135	160	210	191	Rp 476.160.000	1,10	1,19	Rp 621.355.565		alat
Cutting Pile	E	160	135	160	210	191	Rp 379.470.000	1,10	1,19	Rp 495.181.864		alat
Install Rebar PHT	F	170	145	170	225	204	Rp 122.349.010	1,06	1,20	Rp 156.225.307		manpower
Install Formwork PHT	G	170	145	170	225	204	Rp 42.172.690	1,05	1,20	Rp 53.230.633		metode kerja
Pouring Concrete PHT	H	165	140	165	215	196	Rp 32.617.220	1,12	1,19	Rp 43.412.190		cuaca
Install Rebar Capping Beam	I	120	100	120	165	148	Rp 462.487.320	1,06	1,23	Rp 606.454.189		manpower
Install Bekisting Capping Beam	J	120	100	120	165	148	Rp 201.631.680	1,05	1,23	Rp 261.358.325		metode kerja

Task Name	Code	Duration Plan (days)	Min (days)	Most likely (days)	Max (days)	Sim. Dur (days)	Direct Cost (plan)	Cost factor	Cost Multiplier	Direct Cost (simulation)	Indirect Cost/day	Kondisi yang Mempengaruhi
Pouring Concrete Capping Beam	K	120	100	120	165	148	Rp 155.891.304	1,12	1,23	Rp 215.676.608		cuaca

Hasil Simulasi dan Distribusi Durasi Proyek

Hasil simulasi Monte Carlo menghasilkan distribusi probabilistik durasi proyek sebagai berikut.



Gambar 2. Grafik Analisis Simulasi Monte Carlo

Berdasarkan hasil simulasi diperoleh parameter statistik utama sebagai berikut:

1. Mean (rata-rata) = 314,8 hari
2. Median = 314,5 hari
3. Standar deviasi = 13,3 hari
4. Minimum = 282,8 hari
5. Maximum = 348,3 hari

Distribusi menunjukkan bentuk yang mendekati normal (simetris), dengan nilai *skewness* mendekati nol. Hal ini mengindikasikan bahwa model simulasi relatif stabil dan tidak bias ke arah keterlambatan atau percepatan ekstrem.

Analisis Probabilistik

Untuk mendukung proses pengambilan keputusan, hasil simulasi Monte Carlo dianalisis menggunakan pendekatan *percentile*, yang menunjukkan tingkat keyakinan (*confidence level*) terhadap pencapaian durasi proyek tertentu. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi terhadap peluang keberhasilan masing-masing skenario percepatan yang telah diperoleh dari analisis *Time–Cost Trade-Off* (TCTO).

Forecast: total sim dur (cont'd)	Cell: B14
Percentiles:	Forecast values
P0	282,8
P10	296,9
P20	303,0
P30	307,4
P40	311,1
P50	314,5
P60	318,1
P70	322,2
P80	326,9
P90	333,1
P100	348,3
End of Forecasts	

Gambar 3. Hasil Simulasi Monte Carlo

Berdasarkan hasil simulasi, dilakukan perbandingan antara durasi yang dihasilkan dari analisis TCTO dengan distribusi probabilistik durasi proyek. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa:

1. Durasi penyelesaian 529 hari sangat mungkin dicapai dengan probabilitas lebih dari P100, namun total durasi proyek akan terlambat 218 hari dari kontrak.
2. Skenario 1 (penyelesaian sesuai kontrak) dengan target durasi sisa pekerjaan selama 311 hari berada pada rentang probabilitas P40 (40%), yang menunjukkan bahwa peluang pencapaian durasi tersebut masih mungkin dicapai namun peluang keberhasilan dan kegagalan untuk mencapai target durasi tersebut hampir seimbang .
3. Skenario 2 (*optimal crashing*) dengan durasi 432 hari berada di atas rentang hasil simulasi monte carlo. Dengan demikian seluruh hasil simulasi menunjukkan durasi penyelesaian yang lebih cepat dibandingkan target optimum tersebut, sehingga probabilitas penyelesaian dalam waktu 432 hari atau kurang mendekati 100%
4. Skenario 3 (*maximum crashing*) dengan durasi 282 hari berada pada batas bawah distribusi hasil simulasi Monte Carlo. Hal ini menunjukkan bahwa target tersebut merupakan kondisi yang sangat sulit dicapai dan hanya mungkin terjadi pada kombinasi kondisi yang paling menguntungkan. Oleh karena itu probabilitas pencapaiannya sangat kecil.

Berdasarkan hasil analisis TCTO diperoleh beberapa alternatif skenario percepatan. Skenario pertama mampu mengembalikan proyek ke target kontrak dengan menyelesaikan sisa pekerjaan dalam durasi 311 hari. Skenario kedua menghasilkan kombinasi durasi dan biaya yang paling optimum, yaitu durasi 432 hari dengan total biaya proyek minimum. Sementara itu, skenario ketiga menghasilkan durasi tercepat, yaitu 282 hari, namun memerlukan biaya yang lebih besar dibandingkan skenario optimum, atau tidak melakukan percepatan sama sekali sehingga sisa aktivitas proyek akan selesai dengan durasi 529 hari. Hasil ini menunjukkan bahwa durasi tercepat tidak selalu menghasilkan keputusan terbaik karena tambahan biaya

percepatan yang dikeluarkan belum tentu sebanding dengan pengurangan durasi yang diperoleh.

Meskipun analisis TCTO mampu menghasilkan solusi optimum dari sisi waktu dan biaya, pendekatan tersebut masih bersifat deterministik dan belum mempertimbangkan ketidakpastian yang terjadi selama pelaksanaan proyek. Oleh karena itu, penelitian ini mengintegrasikan Simulasi Monte Carlo untuk mengevaluasi tingkat probabilitas pencapaian setiap skenario percepatan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa skenario optimum dengan durasi 432 hari memiliki probabilitas pencapaian tertinggi, yaitu lebih dari P100. Sebaliknya, skenario percepatan maksimum yang menghasilkan durasi tercepat memiliki probabilitas terendah jika dibandingkan skenario yang lain. Temuan ini menunjukkan bahwa percepatan yang terlalu agresif cenderung meningkatkan tingkat risiko proyek meskipun mampu menghasilkan durasi yang lebih pendek.

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa keputusan percepatan proyek sebaiknya tidak hanya didasarkan pada pertimbangan biaya minimum atau durasi tercepat semata. Faktor risiko dan probabilitas keberhasilan penyelesaian proyek juga perlu menjadi pertimbangan utama dalam proses pengambilan keputusan. Integrasi antara TCTO dan Simulasi Monte Carlo memberikan pendekatan yang lebih komprehensif karena mampu mengevaluasi aspek waktu, biaya, dan ketidakpastian secara bersamaan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa alternatif percepatan pada Proyek Shoring Protection dilakukan melalui percepatan aktivitas kritis dengan beberapa skenario, yaitu mengembalikan jadwal penyelesaian proyek sesuai rencana awal, memperoleh biaya percepatan yang paling optimum, dan mencapai durasi penyelesaian paling singkat. Integrasi metode Time–Cost Trade-Off (TCTO) dan Simulasi Monte Carlo dilakukan dengan menggunakan hasil optimasi TCTO sebagai input analisis probabilistik Monte Carlo. Hasil analisis menunjukkan bahwa skenario durasi 311 hari memiliki probabilitas pencapaian pada rentang P40, skenario optimum 432 hari berada di atas P100, sedangkan skenario 282 hari berada di sekitar P0. Temuan ini menunjukkan bahwa keputusan percepatan proyek dapat mempertimbangkan aspek waktu, biaya, dan risiko secara bersamaan. Berdasarkan kombinasi biaya total proyek dan probabilitas keberhasilan, skenario optimum dengan durasi 432 hari merupakan alternatif yang paling direkomendasikan karena menghasilkan biaya total terendah sekaligus memiliki tingkat probabilitas keberhasilan tertinggi dibandingkan skenario lainnya. Oleh karena itu, manajemen proyek disarankan menerapkan pendekatan risk-based scheduling dengan mengacu pada durasi probabilistik di atas P80 serta menyediakan contingency buffer untuk mengantisipasi ketidakpastian proyek. Selain itu, penelitian selanjutnya disarankan mengembangkan model dengan memasukkan variabel tambahan, seperti risiko finansial, serta menerapkan metode optimasi yang lebih lanjut guna meningkatkan akurasi dan fleksibilitas model.

REFERENSI

Abbas Hassan, El-Rayes, K., & Attalla, M. (2023). Stochastic scheduling optimization of repetitive construction projects to minimize project duration and cost. *International Journal of Construction Management*, *23*(9), 1447–1456.

Ahmed, A., Khaled, A.A. dan Sameh, M. (2025), "Time-cost quality risk trade-off for infrastructure projects in Egypt", HBRC Journal, 21(1), pp. 234–246. DOI: 10.1080/16874048.2025.2473774.

Al-Sayegh, S.M. dan Al-Haj, R. (2016), "A new framework for time-cost trade-off considering float loss impact", Journal of Financial Management of Property and Construction, 22(1), pp. 20–36. DOI: 10.1108/JFMPC-02-2016-0007.

Chen, X. et al., (2021), "Project duration-cost-quality prediction model based on Monte Carlo simulation", Journal of Physics: Conference Series, 1978(1), p. 012048. DOI: 10.1088/1742-6596/1978/1/012048.

El-Sayegh, S. dan Al-Haj, R. (2015), "Time-cost trade-off considering float loss impact", Journal of Financial Management of Property and Construction, 20(1), pp. 45–61.

Gouda, A., Ali, A.H. dan Abdelhady, A.A. (2025), "Integrated decision support system for optimizing time and cost trade-offs in linear repetitive construction projects", Scientific Reports, 15(20099), pp. 1–15. DOI: 10.1038/s41598-025-02837-8.

Hosseinpour, M., Roghanian, E. dan Weber, G.W. (2023), "The time-cost trade-off problem and its extensions: A state-of-the-art survey and outlook", Journal of Project Management, 8, pp. 141–164. DOI: 10.5267/j.jpm.2023.4.001.

Larson, E.W. dan Gray, C.F. (2020) Project Management: The Managerial Process. Ed. ke-8. New York: McGraw-Hill Education.

Neha, T. dan Manoj, S. (2020), "Literature review: Project time-cost trade-off in construction projects", International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR), 10(3), pp. 30–33.

Pratama, A.R., Djakfar, L. dan Negara, K.P. (2025), "Monte Carlo mathematical model simulation: An evaluation of the probability of construction project acceleration", Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science, 5(2), pp. 644–650. DOI: 10.47352/jmans.2774-3047.269.

Project Management Institute (PMI). (2019) The Practice Standard for Scheduling. Ed. ke-2. Pennsylvania: Project Management Institute, Inc.

Project Management Institute. (2017). A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) (6th ed.). Newtown Square, PA: Project Management Institute.

Project Management Institute. (2021). A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) (7th ed.). Newtown Square, PA: Project Management Institute.

Turkoglu, H., Polat, G. dan Akin, F.D. (2023), "Crashing construction projects considering schedule flexibility: an illustrative example", International Journal of Construction Management, 23(4), pp. 619–628. DOI: 10.1080/15623599.2021.1901559.

Zygiaris, S., Velu, S. dan Alqatari, M.A. (2022), "The role of Monte Carlo simulation in optimizing uncertainty: Project management in construction contract", Central European Journal of Management, 30(3), pp. 1016–1023