

Pengaruh Risiko Investasi Berbasis Engineering Maturity pada Proyek Fast Track dengan Strategi Supplied by Owner

Gunawan Wibisono*, A.A. Bagus Dinariyana Dwi Putranta

Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

Email: gw777776@gmail.com*

Keywords:

*Engineering Maturity,
Front-End Loading,
Investment Risk,
Supplied By Owner,
Value Engineering*

Abstract

Over 67% of construction projects in the Batu Hijau area experience delays due to planning, procurement, contractor performance, and design changes. To address this issue, a fast-track strategy combined with the Supplied By Owner (SBO) approach and Value Engineering (VE) has been implemented. However, applying this strategy under low Engineering Maturity conditions may increase investment risk, which is commonly manifested through Variation Order/Change Order (VO/CO). This research aims to analyze the influence of Engineering Maturity on investment risk in fast-track projects using the SBO strategy. A case study approach is employed using an explanatory-descriptive method integrated with Pareto Analysis, Value Engineering, and Root Cause Analysis based on VO/CO data. The results show that VO/CO reaches IDR 12.03 billion (11.4% of the contract value), dominated by scope changes (64%) and design corrections (37%), particularly in piping works and the sewage water system. The main root causes include immature design basis, delayed vendor data, and discrepancies in site conditions. This study concludes that low Engineering Maturity significantly increases investment risk. Therefore, investment decisions are recommended to be made at a minimum of AACE Class 3 to ensure better cost accuracy and risk mitigation.

Kata Kunci:

Front-End Loading,
Engineering Maturity,
Risiko Investasi,
Supplied By Owner,
Value Engineering

Abstrak

Lebih dari 67% proyek konstruksi di kawasan Batu Hijau mengalami keterlambatan akibat faktor perencanaan, pengadaan, kinerja kontraktor, serta perubahan desain. Untuk mengatasinya, diterapkan strategi fast track dengan pendekatan *Supplied by Owner* (SBO) dan Value Engineering (VE). Namun, penerapan strategi ini pada tingkat Engineering Maturity yang rendah berpotensi meningkatkan risiko investasi, yang tercermin melalui *Variation Order/Change Order* (VO/CO). Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh Engineering Maturity terhadap risiko investasi pada proyek fast track dengan strategi SBO. Metode yang digunakan adalah studi kasus dengan pendekatan explanatory-descriptive melalui analisis terintegrasi Pareto Analysis, Value Engineering, dan Root Cause Analysis berbasis data VO/CO. Hasil menunjukkan nilai VO/CO sebesar Rp 12,03 miliar (11,4% dari kontrak), didominasi scope change (64%) dan design correction (37%), terutama pada pekerjaan piping dan sistem sewage water. Akar penyebab utama meliputi ketidakmatangan design basis, keterlambatan data vendor, dan ketidaksesuaian kondisi lapangan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa rendahnya Engineering Maturity meningkatkan risiko investasi, sehingga keputusan investasi direkomendasikan pada minimal AACE Class 3.

PENDAHULUAN

Pembangunan tambang batu hijau beserta infrastruktur pendukungnya telah diselesaikan pada tahun 1999, dengan operasi produksi komersial dimulai pada tahun 2000. Seiring berjalannya waktu, peningkatan kebutuhan operasional, tuntutan keberlanjutan, serta penerapan standar lingkungan yang semakin ketat mendorong perusahaan untuk mengembangkan fasilitas tambahan guna mendukung kegiatan pertambangan secara

berkelanjutan (Hasna et al., 2025; Kartikasari, 2025; Wulandari & Sisdianto, 2025). Salah satu kebutuhan strategis tersebut adalah penyediaan fasilitas utilitas bagi kawasan permukiman karyawan. Kawasan New Townsite seluas 58 hektare membutuhkan pengembangan sistem penyediaan air bersih dan pengelolaan air limbah yang andal dan memenuhi standar teknis, serta mampu melayani kebutuhan harian penduduk di sekitar area operasi tambang.

Namun, pengembangan infrastruktur di lingkungan pertambangan memiliki tingkat kompleksitas dan risiko yang tinggi (Suryanti, 2019). Penelitian yang dilakukan oleh Nugroho Adi (2014) menunjukkan bahwa lebih dari 67% proyek konstruksi di kawasan tambang batu hijau mengalami keterlambatan dibandingkan jadwal rencana. Penelitian tersebut mengidentifikasi faktor-faktor penyebab keterlambatan proyek, mengukur tingkat pengaruhnya berdasarkan persepsi klien dan kontraktor, serta menganalisis perbedaan persepsi antara kedua pihak. Hasil penelitian mengungkap bahwa keterlambatan proyek dipengaruhi oleh kombinasi faktor perencanaan, pengadaan, kinerja kontraktor, proses administrasi, serta perubahan desain. Berdasarkan temuan tersebut, penelitian merekomendasikan peningkatan kualitas perencanaan dan mitigasi risiko, percepatan proses persetujuan dokumen, penguatan sistem pemilihan dan evaluasi kontraktor, perbaikan sistem pengadaan material, serta penyederhanaan mekanisme perubahan desain (Ikmal, 2023; Perwiranegara, 2024). Kesimpulannya, pengelolaan manajemen proyek yang terintegrasi sejak tahap perencanaan hingga pelaksanaan memegang peranan penting dalam meminimalkan risiko keterlambatan proyek konstruksi di lingkungan pertambangan.

Sebagai tindak lanjut atas temuan tersebut, pada tahun 2025 perusahaan menerapkan strategi fast track dengan skema SBO dalam pengembangan infrastruktur utilitas kawasan new townsite seluas ±58 hektar. Pada tahap perencanaan proyek, diterapkan pendekatan VE dengan tujuan meningkatkan efisiensi biaya serta mengoptimalkan jadwal proyek (Putra, 2025; Wicaksono et al., 2026). Penerapan VE difokuskan pada finalisasi desain dan spesifikasi peralatan serta sistem perpipaan, optimasi ukuran dan jenis material pipa, penyesuaian kuantitas pekerjaan (MTO/BOQ), pembatalan item yang tidak kritis, serta rasionalisasi lingkup pekerjaan. Pendekatan ini menghasilkan penyederhanaan desain, pengurangan volume material dan pekerjaan sipil, serta eliminasi pekerjaan yang tidak memberikan nilai tambah. Secara keseluruhan, penerapan VE sejak fase perencanaan memberikan berkontribusi signifikan dalam menurunkan anggaran proyek (IDR 134 M – IDR 109 M), dan pendekatan ini sejalan dengan berbagai literatur yang menyatakan bahwa VE pada tahap perencanaan awal memiliki potensi besar dalam mereduksi biaya proyek tanpa mengurangi fungsi maupun kinerja sistem.

Penelitian ini selanjutnya mengkaji pelaksanaan proyek utilitas New Townsite yang meskipun menggunakan strategi pendekatan fast track dengan strategi SBO untuk mempercepat pengadaan peralatan kritis, namun penerapannya berpotensi menimbulkan tumpang tindih antara fase engineering, procurement, dan construction. Dimana keputusan investasi pada proyek fast track ini dilakukan ketika dokumen engineering belum mencapai tingkat maturity yang memadai sesuai standar AACE (Class 3–5). Tingkat Engineering Maturity yang rendah meningkatkan ketidakpastian teknis dan risiko perubahan desain pada fase eksekusi dan memicu VO/CO. Oleh karena itu, penelitian ini menekankan pentingnya pemahaman terhadap pengaruh tingkat Engineering Maturity terhadap risiko investasi, serta bagaimana integrasi VE dan strategi SBO dapat dimanfaatkan untuk meminimalkan ketidakpastian desain dan risiko biaya proyek.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa Engineering Maturity memiliki hubungan erat dengan risiko investasi dan keberhasilan proyek fast track. Batavia (1999) menegaskan bahwa tingkat kematangan engineering pada fase Front-End Loading (FEL) berkorelasi langsung dengan akurasi biaya dan jadwal, di mana keputusan investasi sebelum dokumen engineering matang memicu design growth dan peningkatan VO/CO. AACE International (1997a, 1997b) mengklasifikasikan tingkat kematangan engineering ke dalam Class 1–5, dengan Class 4–5 memiliki ketidakpastian teknis dan risiko biaya tertinggi. Williams, Vo, dan Bourne (2019) serta Hwang dan Ng (2013) menekankan pentingnya stage-gate decision framework dan front-end planning untuk mengurangi ketidakpastian proyek. Penelitian tentang dampak perubahan desain oleh Ibbs, Nguyen, dan Lee (2007) serta Shrestha dan Zeleke (2018) menemukan bahwa design change dan change order yang tidak terkendali dapat meningkatkan biaya proyek hingga 5–20%, menegaskan VO/CO sebagai indikator valid risiko investasi. Love, Edwards, dan Irani (2015) menambahkan bahwa optimisme bias dan misrepresentasi strategis pada fase perencanaan awal menjadi penyebab utama cost overrun. Sementara itu, penelitian tentang strategi fast track oleh Garrido Martins, Silva, dan Costa (2023) serta Abdul Aziz et al. (2025) menemukan bahwa phase overlapping meningkatkan risiko teknis dan koordinasi, dengan risiko terbesar berasal dari ketidakmatangan desain awal yang bergeser ke fase konstruksi. Dell'Isola (2007) dan SAVE International (2020) menjelaskan bahwa Value Engineering (VE) pada tahap perencanaan awal memiliki potensi besar dalam mereduksi biaya proyek tanpa mengurangi fungsi sistem.

Beberapa studi menunjukkan bahwa rendahnya maturity Front-End Engineering (FEL) meningkatkan ketidakpastian biaya dan risiko investasi, terutama pada proyek fast track. Keputusan investasi yang diambil sebelum dokumen engineering matang cenderung memicu design growth, rework, serta peningkatan VO/CO, sementara akurasi biaya sangat bergantung pada tingkat definisi engineering saat keputusan diambil. Data VO/CO terbukti sebagai indikator empiris yang valid untuk mengevaluasi risiko investasi, dengan perubahan desain sebagai penyebab utama cost overrun dan keterlambatan. Oleh karena itu, integrasi Pareto Analysis, Value Analysis, dan RCA dinilai efektif untuk mengidentifikasi risiko utama dan meningkatkan kualitas perencanaan pada proyek fast track berbasis engineering maturity.

Berdasarkan karakteristik proyek fast track dengan strategi SBO tersebut, risiko investasi dalam penelitian ini dipahami sebagai konsekuensi langsung dari keputusan investasi yang diambil pada tingkat Engineering Maturity yang belum optimal. Literatur AACE menegaskan bahwa pada proyek dengan engineering maturity setara Class 3–5, ketidakpastian teknis masih tinggi dan berpotensi terealisasi dalam bentuk design growth pada fase konstruksi, yang secara empiris tercermin melalui VO/CO. Oleh karena itu, VO/CO diposisikan sebagai indikator kuantitatif risiko investasi yang layak dianalisis. Untuk memfokuskan analisis pada faktor dominan yang paling berpengaruh terhadap risiko biaya, Pareto Analysis digunakan sebagaimana lazim diterapkan dalam manajemen risiko proyek dan studi cost overrun. Selanjutnya, pendekatan Value Analysis digunakan untuk memverifikasi apakah perubahan desain merupakan penambahan fungsi yang bernilai tambah (value-added design development) atau sekadar koreksi atas ketidakmatangan engineering pada fase awal. Analisis kemudian diperdalam melalui RCA untuk mengidentifikasi penyebab fundamental perubahan desain, baik yang bersumber dari kekurangan studi teknis FEL, pergeseran risiko interface akibat strategi SBO, maupun keputusan desain yang diambil sebelum tercapainya Engineering

Maturity yang memadai. Penelitian ini menggunakan pendekatan Pareto, VE, dan RCA untuk menganalisis risiko tersebut.

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh tingginya ketidakpastian pada proyek konstruksi fast track, rendahnya tingkat Engineering Maturity pada fase Front-End Loading (FEL), serta meningkatnya risiko investasi akibat penerapan strategi Supplied by Owner (SBO). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh Engineering Maturity terhadap risiko investasi, mengidentifikasi jenis dan sumber risiko yang timbul akibat keputusan Value Engineering (VE) pada kondisi Engineering Maturity yang belum optimal, mengevaluasi pengaruh strategi SBO terhadap pergeseran risiko dari fase engineering ke fase konstruksi, serta mengkaji mekanisme yang dapat mendukung pengambilan keputusan investasi yang lebih terukur pada proyek fast track. Penelitian dibatasi pada proyek infrastruktur utilitas air bersih dan air limbah dengan pendekatan fast track dan strategi SBO, menggunakan studi kasus Proyek New Townsite Batu Hijau periode 2024–2026. Risiko investasi direpresentasikan melalui perubahan desain (Variation Order/Change Order atau VO/CO) pada tingkat Engineering Maturity FEL Class 4–5 sesuai AACE Recommended Practice, dengan analisis yang bersifat deskriptif-analitis tanpa pengembangan model statistik maupun prediktif. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat praktis bagi pemilik proyek dalam meningkatkan pengendalian risiko investasi melalui pemahaman hubungan antara Engineering Maturity, VE, dan SBO, sekaligus memperkaya kajian akademis mengenai pengelolaan risiko investasi pada proyek fast track di sektor infrastruktur.

METODE

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan jenis penelitian deskriptif eksplanatori (explanatory descriptive) dengan pendekatan mixed method yang menggabungkan analisis kuantitatif dan kualitatif melalui desain studi kasus tunggal (single case study) pada Proyek New Townsite Batu Hijau. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk menganalisis distribusi dan nilai Variation Order/Change Order (VO/CO) sebagai indikator risiko investasi, sedangkan pendekatan kualitatif digunakan untuk mengidentifikasi penyebab teknis perubahan desain melalui analisis fungsi dan akar masalah. Penelitian ini bertujuan menjelaskan hubungan kausal antara Engineering Maturity, risiko engineering, perubahan desain, perubahan lingkup pekerjaan, dan dampaknya terhadap biaya proyek, tanpa menggunakan pengujian statistik inferensial, tetapi berdasarkan engineering judgement yang didukung data empiris proyek.

Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh dokumen engineering dan data perubahan pekerjaan pada proyek konstruksi utilitas yang menerapkan pendekatan fast track dengan strategi Supplied by Owner (SBO). Sampel penelitian ditentukan secara purposive sampling, yaitu berupa dokumen proyek New Townsite Batu Hijau periode 2024–2026 yang meliputi dokumen engineering, kontrak EPC, data VO/CO, serta dokumen teknis pendukung seperti Process Flow Diagram (PFD), Piping and Instrumentation Diagram (P&ID), equipment list, vendor datasheet, layout utilitas, dan basis of design. Pemilihan sampel dilakukan karena dokumen tersebut dianggap mampu merepresentasikan hubungan antara tingkat Engineering Maturity dan risiko investasi pada proyek fast track.

Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui studi dokumentasi terhadap berbagai dokumen proyek yang berkaitan dengan proses engineering dan pelaksanaan konstruksi. Data yang dikumpulkan meliputi dokumen desain engineering, kontrak EPC, data Variation Order/Change Order (VO/CO), spesifikasi teknis, serta vendor datasheet pada item SBO. Selain studi dokumentasi, dilakukan pula validasi hasil analisis melalui diskusi teknis terbatas dengan pihak yang memahami aspek engineering untuk memastikan kesesuaian interpretasi terhadap perubahan desain dan penyebab terjadinya risiko investasi. Penelitian ini tidak menggunakan kuesioner maupun survei sehingga seluruh data bersifat objektif dan berbasis bukti proyek.

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan secara bertahap menggunakan pendekatan terintegrasi yang menghubungkan data VO/CO dengan tingkat Engineering Maturity. Tahap pertama adalah Pareto Analysis untuk mengidentifikasi sistem, disiplin pekerjaan, dan faktor yang paling dominan menyebabkan risiko investasi. Tahap kedua menggunakan Value Analysis sebagai bagian dari Value Engineering untuk mengevaluasi fungsi perubahan desain serta mengklasifikasikan perubahan menjadi value-added change atau design correction. Tahap ketiga menggunakan Root Cause Analysis (RCA) dengan pendekatan fishbone diagram dan 5 Whys untuk mengidentifikasi akar penyebab perubahan desain. Selanjutnya, hasil analisis diinterpretasikan berdasarkan klasifikasi Engineering Maturity mengacu pada ACE Cost Estimate Classification System sehingga diperoleh hubungan antara tingkat kematangan engineering, perubahan lingkup pekerjaan, dan dampaknya terhadap biaya proyek yang direpresentasikan melalui nilai VO/CO.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Root Cause Analysis

Analisis Root Cause Analysis (RCA) dilakukan sebagai kelanjutan dari Pareto Analysis dan Analisis Fungsi untuk mengidentifikasi penyebab fundamental perubahan desain selama proyek. Proses ini dilaksanakan secara sistematis dengan mengintegrasikan pendekatan kualitatif dan kuantitatif melalui pengelompokan kasus dominan berdasarkan Pareto (dirangkum dalam Tabel 4.10), yang kemudian dianalisis menggunakan cause-effect relationship (fishbone diagram) dan why analysis untuk menelusuri akar penyebab hingga tingkat fundamental. Setiap kasus dikaji berdasarkan keterkaitan antara sumber permasalahan—meliputi design basis, data vendor, interface, dan kondisi lapangan—dengan jenis perubahan engineering serta dampaknya terhadap engineering deliverables. Hasil identifikasi tersebut selanjutnya disintesis dalam klasifikasi root cause (Tabel 4.11) dan matriks hubungan sebab-akibat (Tabel 4.12) yang menghubungkan aspek Engineering Maturity, Engineering Risk, Engineering Change, Scope Impact, hingga Cost Impact (VO/CO). Untuk memperkuat interpretasi, keseluruhan hasil analisis juga dirangkum dalam Tabel 4.13 yang menggambarkan pola hubungan dominan dan implikasi perubahan pada tingkat proyek. Melalui pendekatan ini, RCA tidak hanya mengidentifikasi penyebab langsung, tetapi juga mengungkap pola sistemik dalam perencanaan engineering, sehingga dapat menjadi dasar evaluasi dan rekomendasi peningkatan kualitas design basis, validasi data, serta pengendalian perubahan guna meminimalkan revisi desain pada tahap konstruksi.

1. Analisis Penyebab (fishbone dan 5 why)

Tabel 1. Tabel Analisis RCA dengan 5 Way Analysis dan Fish Bone

No	System	Problem	Fishbone (Cause)	5 Why Analysis (Cause Chain)	
1	SW	Penambahan pipa <i>temporary</i> dan <i>permanent</i>	Interface Definition – Keterlambatan drawing vendor dan revisi datasheet	→ Terjadi karena keterlambatan vendor → Drawing belum final → Desain awal belum lengkap	→ Koordinasi engineering belum optimal → Ketergantungan tinggi pada data vendor
2	SW	Penambahan jaringan pipa transfer STP	Design Basis – Perubahan kebutuhan operasional dan penambahan lingkup	→ Terjadi karena perubahan kebutuhan operasional → Adanya peningkatan demand → Scope berkembang saat proyek berjalan	→ Requirement owner bertambah → Scope awal belum mengakomodasi kondisi aktual
3	SW	<i>Upgrade</i> diameter pipa	Design Basis – Perhitungan hidraulik awal tidak representatif	→ Terjadi karena kapasitas sistem tidak mencukupi → Debit aktual lebih tinggi dari desain → Perhitungan hidraulik awal kurang akurat	→ Data awal masih bersifat preliminary → Design basis belum mature
4	SW	Penambahan pompa dan jalur outfall baru	Design Basis – Kondisi aktual tidak sesuai dengan asumsi desain	→ Terjadi karena sistem outfall awal tidak memadai → Perbedaan kondisi lapangan → Aliran tidak optimal	→ Asumsi desain tidak sesuai kondisi lapangan → Validasi data lapangan kurang
5	FW	Penambahan ARV	Design Basis – Deviasi kondisi aktual dan perhitungan awal	→ Terjadi karena deviasi hidraulik → Timbul potensi air pocket/vacuum → Desain awal belum mengakomodasi kondisi aktual	→ Perhitungan awal tidak representatif → Data elevasi dan tekanan belum akurat
6	FW	Penambahan PRV	Compliance Design Safety – kebutuhan pemenuhan standar NFPA dan aspek keselamatan	→ Terjadi akibat kondisi overpressure → Tekanan sistem melebihi batas aman → Persyaratan NFPA tidak terpenuhi	→ Proteksi sistem belum memadai → Desain awal belum memenuhi standar
7	CW	Penambahan isolation valve	Design Basis – Kebutuhan maintainability dan operability	→ Terjadi karena kebutuhan maintenance meningkat → Sistem memerlukan fungsi isolasi → Operabilitas sistem belum optimal	→ Kebutuhan maintenance meningkat → Desain awal belum mengakomodasi aspek operability
8	CW	Routing ke MBR tank	Interface Definition –	→ Terjadi karena kebutuhan integrasi STP	→ Koordinasi vendor belum

			Interface belum jelas dan integrasi sistem eksisting	→ Interface antar sistem belum jelas → Terjadi perubahan konfigurasi system	optimal → Integrasi sistem eksisting belum mature
9	RW	Upgrade PN16 menjadi PN20	Design Basis – Perubahan data performa pompa	→ Terjadi karena peningkatan tekanan sistem → Discharge pompa lebih tinggi dari asumsi awal → Data performa diperbarui oleh vendor	→ Desain awal masih menggunakan data preliminary → Spesifikasi tidak sesuai kondisi aktual
10	RW	Upgrade Class 150 ke 300	Compliance Design Safety – Ketidaksesuaian kondisi aktual dan persyaratan keselamatan	→ Terjadi karena tekanan operasi lebih tinggi dari desain → Tekanan melebihi batas desain (design limit) → Safety margin tidak mencukupi	→ Tidak sesuai dengan kondisi aktual → Desain awal cenderung underestimated
11	RW	Upgrade PRV ke double pilot	Design Basis – Perubahan spesifikasi berdasarkan instruksi Owner	→ Terjadi akibat instruksi Owner → Adanya perubahan spesifikasi → Dibutuhkan kontrol tekanan yang lebih stabil	→ Standar internal/perusahaan harus dipenuhi → Requirement berubah saat fase desain berjalan
12	RW	Penambahan ARV akibat elevasi	Design Basis – Perbedaan elevasi antara kondisi aktual dan desain	→ Terjadi karena perbedaan elevasi → Terbentuk air pocket dalam sistem → Kinerja sistem menjadi tidak stabil	→ Data topografi awal tidak cukup akurat → Survei lapangan belum final saat desain dibuat

Sumber: Data primer proyek diolah (2024)

2. Pola Akar Masalah

Berdasarkan hasil penelusuran menggunakan pendekatan Fish bone dan 5 Why Analysis yang dirangkum pada Tabel 1, serta didukung oleh analisa kuantitatif pada Tabel 2, dapat diidentifikasi bahwa akar permasalahan perubahan desain memiliki pola yang bersifat sistemik dan berulang.

Tabel 2. Tabel Project Data dan klasifikasi estimasi

<i>General Project Data:</i>	<i>QTY Issue</i>	<i>Estimate Classification</i>				
		<i>Class 5</i>	<i>Class 4</i>	<i>Class 3</i>	<i>Class 2</i>	<i>Class 1</i>
<i>Interface Definition</i>	2	<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Design Basis</i>	8	<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Compliance Design Safety</i>	2	<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>

Sumber: Data primer proyek diolah (2024)

Secara kualitatif, terdapat empat pola utama penyebab perubahan desain, yaitu ketidakmatangan data, kelemahan design basis, kesenjangan antara kondisi lapangan dan asumsi desain, serta perubahan kebutuhan operasional dan standar. Secara kuantitatif, dari 12 kasus, mayoritas (67%) berasal dari kategori Design Basis, sementara Interface Definition dan Compliance Design Safety masing-masing menyumbang 17%. Dominasi pada Design Basis menunjukkan bahwa penggunaan data awal yang belum matang, ketidakakuratan perhitungan, dan lemahnya dasar perencanaan menjadi penyebab utama perubahan desain. Permasalahan pada Interface Definition menggambarkan tingginya ketergantungan terhadap data vendor serta kurang optimalnya koordinasi antar sistem, sedangkan Compliance Design Safety berkaitan dengan penyesuaian terhadap standar keselamatan. Walaupun tingkat estimasi menunjukkan desain telah masuk tahap lanjut (Class 3–Class 1), masih banyak perubahan yang terjadi, menandakan bahwa kematangan desain belum sesuai dengan kondisi aktual proyek. Secara keseluruhan, permasalahan ini bersifat sistematis dan berulang, sehingga diperlukan penguatan pada tahap perencanaan awal, terutama dalam pematangan data, validasi design basis, dan pengendalian perubahan kebutuhan untuk meminimalkan revisi saat konstruksi.

3. Sintesis Cause and Effect terhadap Engineering Deliverable

Berdasarkan hasil sintesis Cause and Effect yang dirangkum dalam Tabel 4.13 dan Tabel 4.14, terlihat hubungan kausal yang konsisten antara kematangan engineering hingga dampak biaya, yaitu dari Engineering Maturity hingga Cost Impact (VO/CO). Dari 12 kasus dominan, masalah yang berasal dari data vendor (SBO) dan perubahan kebutuhan operasional umumnya menyebabkan perubahan lingkup pekerjaan dan keterlambatan commissioning, akibat keterlambatan finalisasi datasheet, gambar vendor, serta perubahan requirement yang menghambat pelaksanaan konstruksi. Dampaknya adalah penambahan pekerjaan instalasi dan kebutuhan revisi dokumen engineering. Sementara itu, masalah pada ketidakmatangan design basis dan ketidaksesuaian kondisi lapangan memiliki dampak teknis yang lebih kritis, seperti risiko overload, ketidakstabilan aliran, vacuum, dan overpressure. Permasalahan ini berpotensi mengganggu kinerja sistem serta integritas aset, sehingga perubahan yang terjadi dikategorikan sebagai design correction dan memerlukan revisi engineering yang lebih mendasar. Implikasi langsung dari kondisi tersebut tercermin pada perubahan terhadap engineering deliverables sebagaimana ditunjukkan pada table 3 berikut:

Tabel 3. Tabel Engineering Deliverable dan klasifikasi estimasi

Document Issue	QTY Issue	Engineering Deliverables	Status	Estimate Classification				
				Class 5	Class 4	Class 3	Class 2	Class 1
P&ID	9	Piping and Instrument Diagrams (P&IDs)	Standard		S	P/C	C	C
			Required	S	P/C	C	C	C
Piping Layout	3	Plot Plans	Standard		S	P/C	C	C
			Required	S	P/C	C	C	C
MTO/BOQ	4	Utility Equipment List	Standard		S/P	P/C	C	C
			Required	S/P	P/C	C	C	C
Datasheet	2	Specification and datasheets	Standard		S	P/C	C	C
			Required	S/P	P/C	C	C	C
	1		Standard		S	P/C	C	C

Material Spec	Specification and datasheets	Required	S/P	P/C	C	C	C
---------------	------------------------------	----------	-----	-----	---	---	---

Sumber: Data primer proyek diolah (2024)

Berdasarkan tabel tersebut, dapat diidentifikasi bahwa dokumen yang paling terdampak adalah:

- P&ID (Piping and Instrument Diagram) sebagai dokumen utama yang merepresentasikan konfigurasi sistem proses dan perpipaan
- Piping layout (plot plan) terkait perubahan routing dan integrasi sistem
- MTO/BOQ akibat perubahan kuantitas material dan lingkup pekerjaan
- Datasheet dan material specification sebagai konsekuensi dari perubahan kondisi operasional dan spesifikasi teknis

Secara kuantitatif, Tabel 3 menunjukkan bahwa:

- Perubahan P&ID terjadi pada 9 dari 12 kasus dominan (75%)
- Update MTO/BOQ terjadi pada 4 dari 12 kasus (33%)
- Perubahan layout terjadi pada 3 dari 12 kasus (25%)

Distribusi ini mengindikasikan bahwa P&ID merupakan deliverable paling sensitif terhadap perubahan desain, karena berfungsi sebagai basis integrasi seluruh disiplin engineering. Perubahan pada P&ID secara simultan akan memicu perubahan turunan pada dokumen lain seperti layout, sizing, hingga estimasi kuantitas material.

Selain itu, jika dikaitkan dengan klasifikasi AACE terhadap tingkat Engineering Maturity, sebagian besar deliverable pada tahap awal masih berada pada status Started (S) atau Preliminary/Partially Complete (P/C) untuk Class 4–5, sehingga tingkat ketidakpastian desain masih tinggi. Kondisi ini menjelaskan mengapa perubahan signifikan masih terjadi pada fase konstruksi, dan memperkuat temuan bahwa rendahnya maturity pada tahap FEED berkontribusi langsung terhadap meningkatnya risiko perubahan desain dan VO/CO.

Dengan demikian, sintesis ini menegaskan bahwa kualitas dan kelengkapan engineering deliverables pada tahap awal memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap stabilitas pelaksanaan proyek. Ketidaksiharian antara tingkat kematangan dokumen dan keputusan investasi dalam proyek fast track menyebabkan terjadinya design iteration, rework, serta eskalasi biaya. Oleh karena itu, peningkatan Engineering Maturity hingga minimal AACE Class 3 menjadi krusial untuk mengurangi ketidakpastian teknis, meminimalkan perubahan dokumen, serta meningkatkan keandalan perencanaan proyek secara keseluruhan

Tabel 4. Tabel *Cause and Effect*

No	System	Issue	Reason	Cause	Effect	Document Impact
1	SW	Keterlambatan vendor dan incomplete data (Vendor/Input)	Data STP/WTP tidak lengkap dan tidak tervalidasi	Keterlambatan dan ketidaklengkapan data vendor	Scope berubah dan commissioning terhambat	<ul style="list-style-type: none"> • Update P&ID • Layout
2	SW	Scope change akibat kebutuhan	Perubahan kebutuhan operasional STP	Perubahan demand operasional	Sistem eksisting tidak mampu	<ul style="list-style-type: none"> • Update P&ID • Layout

No	System	Issue	Reason	Cause	Effect	Document Impact
		operasional dan owner			support kapasitas baru	
3	SW	Incomplete design basis (hydraulic mismatch)	Kapasitas hidrolis eksisting tidak mencukupi	Underdesign hydraulic capacity	Risiko overload sistem	<ul style="list-style-type: none"> • Update P&ID • Line Sizing
4	SW	Ketidaksesuaian kondisi aktual (Site condition)	Tidak tersedia jalur pembuangan memadai	Revisi desain tidak mempertimbangkan disposal	Sistem tidak dapat beroperasi optimal	<ul style="list-style-type: none"> • Update P&ID • Layout
5	FW	Gap hydraulic design vs actual	Perhitungan hidrolis tidak sesuai kondisi elevasi real	Perbedaan asumsi elevasi	Risiko vacuum dan pipe collapse	<ul style="list-style-type: none"> • Update P&ID • MTO
6	FW	Compliance gap (NFPA and safety)	Tekanan sistem fire water melebihi standar	Overpressure kondisi desain	Risiko kegagalan sistem	<ul style="list-style-type: none"> • Update P&ID, • MTO & BoQ
8	CW	Maintainability requirement gap	Sistem tidak fleksibel untuk maintenance	Tidak ada isolasi jaringan	Shutdown sebagian besar sistem saat maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Update P&ID • MTO
9	CW	Interface definition belum lengkap	Tidak tersedia jalur service water ke fasilitas tertentu	Integrasi sistem tidak lengkap	Supply tidak terdistribusi	<ul style="list-style-type: none"> • Update P&ID
10	RW	Update data teknis vendor (late data)	Spesifikasi pompa tidak sesuai tekanan	Pump discharge tidak memenuhi	Sistem tidak mencapai pressure required	<ul style="list-style-type: none"> • Update Datasheet • MTO
11	RW	Keterlambatan vendor dan incomplete data (Vendor/Input)	Tekanan shutoff pompa terlalu tinggi	Over design pump	Risiko kegagalan pipa (Class mismatch)	<ul style="list-style-type: none"> • Update Material Spec
12	RW	Scope change akibat kebutuhan operasional dan owner	Spesifikasi awal vendor tidak sesuai requirement	Cause: Data approval kurang tepat	Effect: Deviasi terhadap desain awal	<ul style="list-style-type: none"> • Update Datasheet
13	RW	Incomplete design basis (hydraulic mismatch)	Perbedaan elevasi aktual vs desain	Cause: Survey tidak akurat	Effect: Risiko vacuum pipeline	<ul style="list-style-type: none"> • Update P&ID

Sumber: Data primer proyek diolah (2024)

Evaluasi Engineering Maturity terhadap Risiko

Berdasarkan hasil analisis, sebagian besar perubahan desain pada fase konstruksi berakar pada rendahnya Engineering Maturity pada tahap awal proyek (FEL), di mana dokumen masih

berada pada level Estimate Class 5–4. Pada level ini, desain baru mencapai tingkat definisi $\pm 0-15\%$ dengan akurasi rendah dan ketidakpastian tinggi, sehingga masih berbasis asumsi dan data terbatas.

Kondisi tersebut menyebabkan parameter kritikal seperti data hidraulik, spesifikasi peralatan, dan kondisi lapangan belum terdefinisi secara memadai, sehingga memicu engineering change pada fase konstruksi. Dampaknya meliputi rework, cost overrun, VO/CO, gangguan jadwal, serta risiko terhadap kinerja sistem.

Dengan demikian, Engineering Maturity dalam kerangka AACE dan FEL dapat diposisikan sebagai faktor hulu yang menentukan kualitas estimasi biaya, akurasi keputusan investasi, serta tingkat eksposur risiko proyek.

Integrasi Analisis

Integrasi Pareto Analysis, Value Engineering (VE), dan Root Cause Analysis (RCA) menunjukkan bahwa rendahnya Engineering Maturity pada fase awal (FEL Class 5–4) menyebabkan ketidakpastian desain yang memicu engineering change dan berdampak pada biaya dalam bentuk VO/CO. Pada proyek fast track dengan strategi SBO, kondisi ini diperburuk oleh overlapping fase dan kompleksitas interface, sehingga keputusan investasi sering dilakukan sebelum desain mencapai tingkat maturity memadai (Class 3). Hal ini menegaskan belum optimalnya mekanisme stage-gate, sehingga diperlukan risk gate berbasis Engineering Maturity yang mengaitkan keputusan investasi dengan kelengkapan dokumen engineering dan klasifikasi estimasi AACE. Dalam konteks ini, VE berfungsi sebagai alat verifikasi untuk memastikan perubahan desain memberikan nilai berdasarkan fungsi dan biaya.

Decision Framework Berbasis Engineering Maturity

1. Konsep Risk Gate Berbasis Engineering Maturity

Risk Gate merupakan titik kontrol keputusan investasi yang mengintegrasikan Engineering Maturity (AACE) dengan proses phase gating dalam PMBOK, terdiri dari:

- a. Gate 1 – Conceptual (Class 5–4 / Initiating–Concept Phase): Ketidakpastian tinggi, digunakan untuk validasi awal, belum layak komitmen biaya.
- b. Gate 2 – Technical Validation (Class 3 / Planning Phase): Tahap kritis go/no-go decision, di mana desain telah terdefinisi (Issued for Design), analisis teknis tervalidasi, dan data vendor tersedia.
- c. Gate 3 – Execution Readiness (Class 2 / Executing Readiness): Desain telah matang untuk konstruksi, dengan risiko perubahan relatif rendah dan kontrol biaya lebih akurat.

2. Kriteria Keputusan Investasi

Berdasarkan hasil analisis keputusan investasi direkomendasikan dilakukan apabila: (1) Engineering Maturity minimal Class 3, (2) Parameter desain kritikal (hidraulik, tekanan, kapasitas) telah tervalidasi, (3) Interface antar sistem dan data vendor telah tersinkronisasi, (4) Risiko teknis teridentifikasi, (5) Variabilitas biaya berada dalam rentang toleransi AACE.

Implikasi terhadap Pengendalian Risiko Investasi

Berdasarkan analisis VO/CO, Value Engineering, dan Root Cause Analysis, tingkat Engineering Maturity terbukti berpengaruh signifikan terhadap risiko investasi, khususnya pada proyek fast track dengan strategi SBO. Rendahnya kematangan engineering pada tahap keputusan investasi (Class 4–5) menyebabkan pergeseran risiko ke tahap konstruksi, yang tercermin dalam bentuk design correction dan scope change sebagai komponen utama VO/CO. Risiko investasi dalam proyek ini tidak hanya dipengaruhi oleh kompleksitas teknis, tetapi

lebih dominan oleh ketidakmatangan dokumen engineering, ketidaksinkronan data vendor, serta belum optimalnya definisi interface pada tahap awal. Hal ini menunjukkan bahwa kelemahan pada front-end loading—terutama pada aspek perhitungan hidraulik, desain perpipaan, dan integrasi sistem—menjadi faktor utama yang meningkatkan potensi perubahan dan biaya proyek.

1. Accelerated Fast Track dengan Risk Mitigation (Tetap mulai di Class 4–5 dengan kontrol ketat)

Pendekatan ini sejalan dengan karakteristik proyek dalam penelitian, yaitu proyek fast track dengan strategi Supplied By Owner (SBO) yang memiliki tuntutan percepatan pelaksanaan meskipun tingkat Engineering Maturity masih berada pada level awal (Class 4–5). Dalam pendekatan ini, proyek tetap dijalankan dengan penguatan kontrol risiko secara intensif untuk mengelola potensi engineering risk yang telah teridentifikasi melalui Root Cause Analysis. Upaya mitigasi difokuskan pada percepatan finalisasi dokumen engineering kritikal—seperti P&ID, piping layout, dan hydraulic calculation—serta peningkatan sinkronisasi data vendor dalam skema SBO dan penguatan interface management antar sistem. Selain itu, penerapan Value Engineering secara berkelanjutan menjadi instrumen penting untuk memastikan bahwa setiap engineering change tidak hanya bersifat korektif, tetapi juga memberikan nilai tambah terhadap kinerja dan biaya proyek. Namun demikian, sebagaimana ditunjukkan dalam hasil analisis VO/CO dan RCA, pendekatan ini memiliki keterbatasan karena akar permasalahan utama berupa rendahnya Engineering Maturity belum sepenuhnya dieliminasi, melainkan hanya dikelola. Kondisi ini menyebabkan risiko rework, cost overrun, serta potensi design correction dan scope change tetap relatif tinggi pada tahap konstruksi. Dengan demikian, pendekatan ini lebih bersifat risk containment strategy dibandingkan solusi preventif, sehingga efektivitasnya sangat bergantung pada ketatnya pengendalian engineering dan koordinasi lintas disiplin selama pelaksanaan proyek

Tabel 5. Tabel Matriks Fast Track dengan Risk Mitigation

<i>General Project Data:</i>		<i>Estimate Classification</i>				
		<i>Class 5</i>	<i>Class 4</i>	<i>Class 3</i>	<i>Class 2</i>	<i>Class 1</i>
<i>Project Scope Definition</i>		<i>General</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Plant Capacity</i>		<i>Assumed</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Plant Location</i>		<i>General</i>	<i>Approximately</i>	<i>Specific</i>	<i>Specific</i>	<i>Specific</i>
<i>Soil and hydrology</i>		<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Integrated Project Plan</i>		<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Project Master Schedule</i>		<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Escalation Strategy</i>		<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Work Breakdown Structure</i>		<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Project Code Of accounts</i>		<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Contracting Strategy</i>		<i>Assumed</i>	<i>Assumed</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Interface Definition</i>		<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Maintenance Design (Isolation)</i>		<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Compliance Design Safety</i>		<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>

General Project Data:	Estimate Classification				
	Class 5	Class 4	Class 3	Class 2	Class 1
Engineering Deliverable:					
Block Flow Diagrams	S/P	P/C	C	C	C
Plot Plans	S	P/C	C	C	C
Process flow diagram (PFDs)	S/P	P/C	C	C	C
Utility Flow Diagrams (UFDs)	S/P	P/C	C	C	C
Piping and Instrument Diagrams (P&IDs)	S	P/C	C	C	C
Heat and Material Balances	S	P/C	C	C	C
Piping Layout	S	P/C	C	C	C
Hydraulic Calculation	S	P/C	C	C	C
Line Sizing	S/P	P/C	C	C	C
Equipment List	S/P	P/C	C	C	C
Process Equipment list	S/P	P/C	C	C	C
General Project Data:	Estimate Classification				
	Class 5	Class 4	Class 3	Class 2	Class 1
Utility Equipment List	S/P	P/C	C	C	C
Electrical One-Line Drawings	S/P	P/C	C	C	C
Specification and datasheets		S	P/C	C	C
General Equipment Arrangement Drawings		S	P/C	C	C
Spare Part Listings			S/P	P	C
Project Scope Definition	General	Preliminary	Defined	Defined	Defined
Plant Capacity	Assumed	Preliminary	Defined	Defined	Defined
Plant Location	General	Approximately	Specific	Specific	Specific
Soil and hydrology	None	Preliminary	Defined	Defined	Defined

Sumber: Data primer proyek diolah (2024)

2. Delayed Commitment berbasis Engineering Maturity (Recommended)

Pendekatan ini menekankan bahwa keputusan investasi dilakukan setelah tingkat kematangan engineering mencapai minimal AACE Class 3 sesuai prinsip Front End Loading (FEL), sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.16 Tabel Matriks Estimasi menurut AACE RP 18R-97. Pada tahap ini, desain telah berada pada kondisi defined, sehingga akurasi estimasi biaya meningkat dan risiko engineering dapat ditekan secara signifikan. Kondisi tersebut memungkinkan pengurangan potensi design correction, scope change, serta rework, sekaligus meningkatkan sinkronisasi data antar vendor dalam skema SBO, sehingga risiko interface mismatch dapat dihindari. Dengan demikian, sebagian besar risiko dapat diselesaikan pada fase engineering dan tidak berkembang menjadi dampak biaya berupa Variation Order (VO) atau Change Order (CO) pada tahap konstruksi.

Tabel 6. Tabel Matriks Estimasi menurut AACE RP 18R 97

General Project Data:	Estimate Classification				
	Class 5	Class 4	Class 3	Class 2	Class 1
<i>Project Scope definition</i>	<i>General</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Plant Production/Facility Capacity</i>	<i>Assumed</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Plant Location</i>	<i>General</i>	<i>Approximate</i>	<i>Specific</i>	<i>Specific</i>	<i>Specific</i>
<i>Soils and Hydrology</i>	<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Integrated Project Plan</i>	<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Project Master Schedule</i>	<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Escalation Strategy</i>	<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Work Breakdown Structure</i>	<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
General Project Data:	Estimate Classification				
	Class 5	Class 4	Class 3	Class 2	Class 1
<i>Project Code of Accounts</i>	<i>None</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
<i>Contracting Strategy</i>	<i>Assumed</i>	<i>Assumed</i>	<i>Preliminary</i>	<i>Defined</i>	<i>Defined</i>
Engineering Deliverable:					
<i>Block Flow Diagrams</i>	<i>S/P</i>	<i>P/C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>
<i>Plot Plans</i>		<i>S</i>	<i>P/C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>
<i>Process flow diagram (PFDs)</i>		<i>S/P</i>	<i>P/C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>
<i>Utility Flow Diagrams (UFDs)</i>		<i>S/P</i>	<i>P/C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>
<i>Piping and Instrument Diagrams (P&IDs)</i>		<i>S</i>	<i>P/C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>
<i>Heat and Material Balances</i>		<i>S</i>	<i>P/C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>
<i>Process Equipment list</i>		<i>S/P</i>	<i>P/C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>
<i>Utility Equipment List</i>		<i>S/P</i>	<i>P/C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>
<i>Electrical One-Line Drawings</i>		<i>S/P</i>	<i>P/C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>
<i>Specification and datasheets</i>		<i>S</i>	<i>P/C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>
<i>General Equipment Arrangement Drawings</i>		<i>S</i>	<i>P/C</i>	<i>C</i>	<i>C</i>
<i>Spare Part Listings</i>			<i>S/P</i>	<i>P</i>	<i>C</i>
<i>Mechanical Discipline drawings</i>			<i>S</i>	<i>P</i>	<i>P/C</i>
<i>Electrical Discipline Drawings</i>			<i>S</i>	<i>P</i>	<i>P/C</i>
<i>Instrumentation/Control system discipline drawings</i>			<i>S</i>	<i>P</i>	<i>P/C</i>
<i>Civil/Structure/Site discipline Drawings</i>			<i>S</i>	<i>P</i>	<i>P/C</i>

Sumber: Data primer proyek diolah (2024)

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa pengendalian risiko investasi pada proyek fast track tidak cukup dilakukan pada tahap eksekusi, melainkan harus dimulai dari peningkatan kualitas front-end engineering melalui pencapaian Engineering Maturity yang memadai sebelum keputusan investasi diambil. Oleh karena itu, penerapan maturity-based decision gate dengan batas minimal AACE Class 3 menjadi strategi kunci dalam meningkatkan akurasi biaya, mengurangi ketidakpastian teknis, serta meminimalkan risiko investasi secara sistematis.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis menggunakan Pareto Analysis, Value Analysis, dan Root Cause Analysis (RCA), penelitian ini menyimpulkan bahwa rendahnya Engineering Maturity berpengaruh langsung terhadap peningkatan risiko investasi pada proyek fast track melalui rangkaian proses yang dimulai dari ketidakpastian desain, munculnya berbagai jenis risiko (technical, interface, vendor, dan decision-related risk), terjadinya perubahan engineering, perubahan lingkup pekerjaan, hingga peningkatan biaya proyek yang tercermin dalam Variation Order/Change Order (VO/CO). Hasil analisis menunjukkan bahwa VO/CO didominasi pada sistem Sewage Water dan Fire Water, terutama pada pekerjaan perpipaan, yang sebagian besar disebabkan oleh design correction akibat ketidakakuratan perhitungan teknis awal, ketidaksesuaian desain dengan kondisi aktual, perubahan data vendor dalam skema Supplied by Owner (SBO), serta kompleksitas integrasi sistem. Strategi SBO juga terbukti meningkatkan risiko interface sehingga risiko teknis pada fase engineering bergeser ke fase konstruksi dan memicu perubahan lingkup maupun biaya proyek.

Berdasarkan temuan tersebut, penelitian merumuskan kerangka pengambilan keputusan investasi berbasis Engineering Maturity yang merekomendasikan keputusan investasi dilakukan minimal pada AACE Estimate Class 3 dengan penerapan risk gate, interface readiness check, serta validasi desain dan risiko sebelum eksekusi proyek. Secara praktis, penelitian menyarankan penerapan Engineering Maturity-based stage gate, pemenuhan engineering deliverable minimum, pelaksanaan Value Engineering sebelum proses tender, dan penguatan manajemen interface pada proyek dengan strategi SBO. Sementara itu, dari sisi akademik disarankan pengembangan model kuantitatif menggunakan regresi atau Structural Equation Modeling (SEM), perluasan studi pada berbagai jenis proyek, integrasi analisis risiko dengan analisis finansial seperti NPV dan IRR, serta penyusunan maturity-based decision gate framework yang dapat dijadikan acuan dalam pengambilan keputusan investasi pada proyek fast track.

REFERENSI

- Abdul Aziz, A., Rahman, M., Karim, R., & Hassan, N. (2025). Risk analysis and mitigation strategies in fast-track construction projects: A literature review. *International Journal of Construction Management*.
- Garrido Martins, J., Silva, M., & Costa, A. (2023). Risk identification due to phase overlapping in fast-track construction projects. *International Journal of Construction Management*.
- Hasna, F., Subekti, R., & Candrakirana, R. (2025). Peran kebijakan lingkungan dalam pengelolaan limbah di PT Aneka Tambang Tbk dalam mendukung penerapan green business di Indonesia. *Jembatan Hukum: Kajian Ilmu Hukum, Sosial dan Administrasi Negara*, 2(1), 226–237.

- Hwang, B. G., & Ng, W. J. (2013). Project management knowledge and skills for green construction: Overcoming challenges in Singapore. *International Journal of Project Management*, 31(2), 272–284.
- Ikmal, T. (2023). *Analisis keterlambatan proyek terhadap cost overruns berbasis project risk management pada proyek pembangunan infrastruktur pabrik NPK Chemical PT Pupuk Iskandar Muda* (Skripsi, Universitas Malikussaleh).
- Jarkas, A. M., & Bitar, C. G. (2012). Factors affecting construction cost in Lebanon. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(9), 1005–1013.
- Kartikasari, F. I. (2025). Strategi regulasi untuk mendorong hilirisasi pertambangan yang berwawasan lingkungan. *Jurnal Rechtsvinding: Media Pembinaan Hukum Nasional*, 14(1).
- Love, P. E. D., Edwards, D. J., & Irani, Z. (2015). Moving beyond optimism bias and strategic misrepresentation: An explanation for social infrastructure project cost overruns. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 62(4), 560–571.
- Project Management Institute. (2021). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide)* (7th ed.). Project Management Institute.
- Perwiranegara, A. F. (2024). *Strategi manajemen risiko dan percepatan pekerjaan untuk mereduksi waktu dan biaya pada proyek konstruksi (Studi kasus: Proyek pengendalian banjir dan rob Sungai Loji–Banger Paket 1)* (Tesis, Universitas Islam Sultan Agung).
- Putra, I. (2025). *Optimalisasi biaya proyek melalui pendekatan value engineering (Studi kasus: Pekerjaan arsitektur proyek pembangunan Apartment Premier Global Development Berawa)* (Tugas akhir, Politeknik Negeri Bali).
- Ramadhan, R., & Waty, M. (2025). The impact of change order on cost overrun and schedule delay in construction projects. *Journal of Construction Economics and Building*.
- SAVE International. (2020). *Value methodology standard*. SAVE International.
- Shrestha, P. P., & Zeleke, H. (2018). Effects of change orders on cost and schedule performance. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(6).
- Suryanti, N. (2019). Urgensi manajemen risiko pada pembangunan infrastruktur dan implikasinya terhadap perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup. *Bina Hukum Lingkungan*, 3(2), 218–233.
- Thoengsal, J. (2018). Application of value engineering to reduce loss cost in construction projects. *International Journal of Value Engineering*.
- Wicaksono, R. T., Fuadi, M. H., Ardiansyah, M. A., Mauludin, S., Gumilang, R. R., & Elfaiz, E. A. (2026). Perencanaan manajemen proyek dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas penjadwalan mata kuliah. *Jurnal Media Informatika*, 7(1), 356–362.
- Williams, T., Vo, H., & Bourne, L. (2019). The front-end phase in project investment decision-making. *International Journal of Project Management*, 37(8), 1056–1070.
- Wulandari, W., & Sisdianto, E. (2025). Praktik terbaik tata kelola lingkungan dalam industri pertambangan di Kalimantan. *Jurnal Ilmiah Ekonomi, Manajemen, Bisnis dan Akuntansi*, 2(1), 232–244.