

**SIMULASI MODEL RISIKO  
PEKERJAAN PERBAIKAN TANAH  
METODE KONSOLIDASI BERBASIS  
VALUE ENGINEERING**

**Mirnayani<sup>1,\*</sup>), Desiana Vidayanti<sup>2)</sup>,  
Irriene Indah Susanti<sup>3)</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil Fakultas  
Teknik Universitas Mercu Buana,  
mirnayani@mercubuana.ac.id

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil Fakultas  
Teknik Universitas Mercu Buana,  
desiana@mercubuana.ac.id

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Sipil Fakultas  
Teknik Universitas Mercu Buana,  
irriene.shanty@gmail.com

**ABSTRAK**

*Tanah lunak yang memiliki daya dukung rendah menjadi tantangan dalam konstruksi infrastruktur seperti Jalan Tol Kayu Agung–Palembang–Betung. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis metode perbaikan tanah yang paling efisien berbasis pendekatan Value engineering (VE), mengevaluasi risiko yang mungkin terjadi dari tiap metode, serta mensimulasikan model risikonya. Penelitian ini bersifat deskriptif kuantitatif, dengan data primer diperoleh melalui observasi lapangan dan kuesioner ahli, serta data sekunder berupa dokumen teknis proyek. Tiga metode yang dievaluasi adalah preloading tanpa drainase vertikal, preloading dengan drainase vertikal, dan vacuum preloading. Adanya perubahan metode, tentunya akan ada potensi risiko yang terjadi. Potensi risiko ini harus dikenali dari awal perencanaan sebelum memulai suatu metode pekerjaan agar risiko-risiko yang mungkin bisa terjadi dapat diminimalisir dan diantisipasi dengan baik. Simulasi risiko dilakukan*

*menggunakan metode Monte Carlo dengan bantuan software Crystal Ball. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode preloading tanpa drainase vertikal merupakan pilihan paling hemat biaya, namun memiliki risiko teknis lebih tinggi. Metode preloading dengan drainase vertikal memberikan keseimbangan terbaik antara biaya dan stabilitas tanah, sementara vacuum preloading memberikan stabilitas tanah optimal namun dengan biaya yang lebih besar.*

**Kata Kunci : Monte Carlo, Perbaikan Tanah, Risiko, Konsolidasi, Value Engineering**

**ABSTRACT**

*Soft soil with low bearing capacity presents challenges for infrastructure projects like the Kayu Agung–Palembang–Betung Toll Road. This study aims to identify the most efficient soil improvement method using the Value engineering (VE) approach and simulate associated risks. Using a descriptive quantitative method, data were collected through field observations, expert questionnaires, and project documents. Three methods were evaluated: preloading without vertical drains, with vertical drains, and vacuum preloading. Risk simulation was conducted using the Monte Carlo method with Crystal Ball software. Results show that preloading without vertical drains is the most cost-efficient but carries higher technical risks. Preloading with vertical drains offers a good balance between cost and stability, while vacuum preloading ensures optimal stability with higher costs.*

**Keyword : Monte Carlo, Soil Improvement, Risk, Consolidation, Value Engineering**

**1. PENDAHULUAN**

Proyek infrastruktur di Indonesia, seperti pembangunan Jalan Tol Trans-

Sumatera, menghadapi tantangan besar terutama ketika konstruksi dilakukan di atas tanah lunak dengan daya dukung rendah. Salah satu proyek penting adalah Jalan Tol Kayu Agung-Palembang-Betung, di mana sebagian besar trase melintasi lahan rawa dengan kondisi tanah lunak yang memerlukan perbaikan untuk meningkatkan stabilitas dan daya dukung. Tanah lunak memiliki karakteristik pemampatan yang besar, daya dukung tanah rendah, kadar air tinggi, dan sulit terdrainasi karena permeabilitas tanah relatif rendah. Jenis dan letak lapisan penahan pondasi mempengaruhi nilai daya dukungnya (Sari dkk., 2023). Maka, pada pelaksanaan konstruksi perlu dilakukan perbaikan tanah untuk mendapatkan daya dukung yang lebih baik, untuk memastikan bahwa struktur dapat berfungsi dengan aman dan efisien (Putra & Makarim, 2020).

Perbaikan tanah dengan metode konsolidasi, seperti *preloading*, drainase vertikal, dan *vacuum preloading*, sering digunakan untuk meningkatkan daya dukung tanah. Metode ini bertujuan untuk mempercepat konsolidasi tanah dengan mengeluarkan air dari pori-pori tanah, sehingga meningkatkan stabilitas tanah dalam jangka panjang (Aiyani & Parsa, 2019). Namun, setiap metode membawa risiko. Adanya potensi risiko harus dikenali dari awal perencanaan sebelum memulai suatu metode pekerjaan agar risiko-risiko yang mungkin bisa terjadi dapat diminimalisir dan diantisipasi dengan baik melalui pendekatan manajemen risiko yang efektif (Isnaeni & Herzanita, 2022).

Penelitian ini adalah integrasi antara pendekatan *Value engineering* (VE) dengan simulasi risiko Monte Carlo pada proyek perbaikan tanah. *Value engineering* digunakan untuk mengidentifikasi metode yang paling efisien dalam proyek konstruksi, sedangkan simulasi monte carlo untuk mengukur dan memitigasi risiko.

*Value engineering* (VE) atau yang biasa dikenal dengan Rekayasa Nilai adalah

suatu pendekatan kreatif dan terencana dengan tujuan untuk mengidentifikasi dan mengoptimalkan biaya-biaya yang tidak perlu. VE digunakan untuk mencari alternatif-alternatif atau ide – ide yang bertujuan untuk menghasilkan biaya yang paling baik atau lebih rendah dari harga yang telah direncanakan sebelumnya tanpa mengurangi fungsi dasar dan kualitas pekerjaan (Suwandari & Mirnayani, 2021). *Value engineering* (VE) merupakan pendekatan sistematis yang digunakan untuk mengidentifikasi dan mengurangi biaya yang tidak diperlukan tanpa mengorbankan kualitas dan fungsi proyek. Melalui VE, proyek perbaikan tanah dapat dievaluasi untuk menemukan metode yang paling efisien dari segi biaya.

Proses simulasi model risiko pekerjaan perbaikan tanah menggunakan metode Monte Carlo dengan bantuan perangkat lunak *Crystal Ball*. Metode Monte Carlo adalah teknik analisis yang digunakan untuk memperkirakan hasil dari suatu proses yang melibatkan ketidakpastian (Carlo dkk., n.d.), (Nabila Yusna dkk., 2024). Metode ini memodelkan berbagai hasil potensial berdasarkan variabel-variabel. Dengan mensimulasikan ribuan skenario, hasil penilaian bersifat komprehensif, sehingga memberikan gambaran yang lebih jelas tentang potensi risiko yang dihadapi (Suryadi & Garniwa M.K, 2023)

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan panduan yang lebih baik dalam memilih metode perbaikan tanah yang efisien dan minim risiko.

### 1.1 Rumusan Masalah

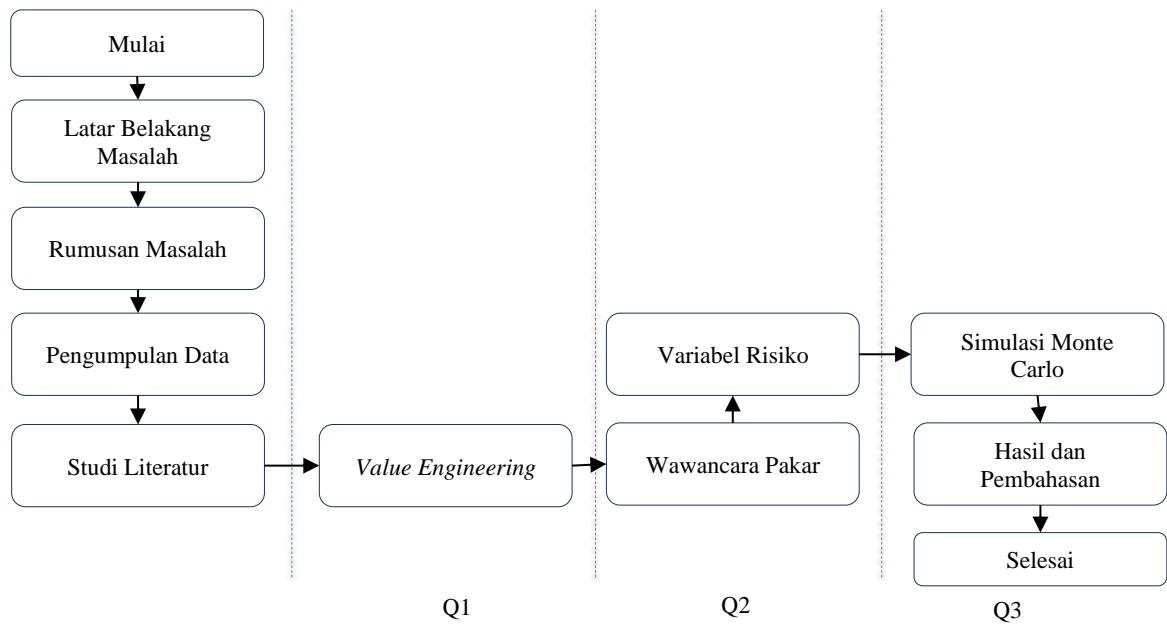
Adapun rumusan masalah penelitian ini adalah 1) Metode perbaikan tanah apa yang mempunyai nilai *value engineering* paling efisien; 2) Apa saja potensi risiko yang dapat ditimbulkan dari metode perbaikan tanah; 3) Bagaimana hasil simulasi model risiko pelaksanaan metode perbaikan tanah menggunakan Monte Carlo

**1.2 Tujuan Penulisan**

Tujuan penulisan adalah menjawab rumusan masalah yaitu 1) Menganalisis metode perbaikan tanah yang mempunyai nilai *Value Engineering* paling efisien 2) Menganalisis potensi risiko yang dapat ditimbulkan dari metode perbaikan tanah 3) Mengevaluasi hasil simulasi model risiko pelaksanaan metode perbaikan tanah menggunakan Monte Carlo.

**2. METODE PENELITIAN**

Penelitian menggunakan pendekatan *Value engineering* (VE) untuk mengidentifikasi alternatif perbaikan tanah yang efisien dan minim risiko dalam proyek pembangunan Jalan Tol Kayu Agung-Palembang-Betung. Gambar 1 merupakan diagram alir penelitian untuk menjawab rumusan masalah.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

**2.1 Pengumpulan Data**

Data pada penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder.

**Data Primer** Data primer diperoleh melalui observasi langsung di lapangan, termasuk analisis kondisi tanah di proyek tersebut. Selain itu, dilakukan wawancara dengan pakar konstruksi, dalam penelitian ini berjumlah 8 orang dengan pengalaman lebih dari 10 tahun untuk mengidentifikasi risiko-risiko terkait metode konsolidasi.

**Data Sekunder:** Data sekunder meliputi layout rencana, data tanah lapangan, RAB pekerjaan perbaikan tanah, dan metode kerja pekerjaan perbaikan tanah.

**2.2 Analisis Value engineering (VE)**

Metode *Value engineering* (VE) terdiri dari lima tahap utama, yaitu

- a. Tahap Informasi: Pengumpulan informasi mengenai biaya, fungsi, dan kualitas dari metode perbaikan tanah yang diterapkan. Tahap ini melibatkan peninjauan biaya pekerjaan proyek dan analisis fungsi dari tiap metode konsolidasi.
- b. Tahap Kreatif: Mengidentifikasi alternatif metode perbaikan tanah dengan menggunakan *brainstorming* untuk menemukan solusi yang lebih efisien dari segi biaya dan risiko

- c. Tahap Analisis: Alternatif yang dihasilkan dari tahap kreatif dievaluasi berdasarkan:
  1. Efisiensi biaya: Membandingkan biaya awal, biaya pemeliharaan, dan biaya siklus hidup (*life cycle cost*) untuk setiap alternatif.
  2. Manfaat fungsional: Menganalisis apakah setiap alternatif dapat memenuhi fungsi yang diperlukan dengan lebih baik atau sama dengan metode yang ada.
- d. Tahap Pengembangan: Pada tahap ini, alternatif terbaik dipilih berdasarkan analisis dari tahap sebelumnya. *Life Cycle Cost* (LCC) digunakan untuk menghitung biaya total dari setiap metode selama umur proyek, meliputi biaya implementasi dan biaya pemeliharaan. Alternatif yang memberikan nilai fungsional terbaik dengan biaya terendah diidentifikasi sebagai metode yang paling efisien.
- e. Tahap Rekomendasi: Tahap terakhir adalah merekomendasikan alternatif yang dipilih. Pada proyek ini, metode perbaikan tanah yang dipilih harus memenuhi kriteria:
  1. Mengurangi biaya yang tidak diperlukan
  2. Meminimalkan risiko teknis dan operasional
  3. Menjaga atau meningkatkan stabilitas tanah dan kualitas pekerjaan

### 2.3 Kuesioner Pakar

Kuesioner disebarakan kepada pakar di bidang konstruksi dengan pengalaman lebih dari 10 tahun untuk mendapatkan nilai probabilitas dan dampak dari variabel risiko yang diidentifikasi. Hasil kuesioner digunakan sebagai input untuk simulasi Monte Carlo. Kriteria pakar yaitu : memiliki pengalaman kerja di bidang konstruksi lebih dari 10 tahun, berasal dari praktisi lapangan, konsultan, dan/atau dosen ahli geoteknik, terlibat atau memiliki pengetahuan tentang proyek serupa di tanah lunak.

### 2.4 Simulasi Risiko

Simulasi risiko dilakukan menggunakan metode Monte Carlo dengan bantuan perangkat lunak *Crystal Ball*. Simulasi ini bertujuan untuk memprediksi risiko yang mungkin terjadi pada setiap alternatif. Hasil simulasi Monte Carlo menghasilkan distribusi probabilitas untuk setiap risiko.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Analisis *Value engineering* (VE)

#### 3.1.1 Tahap Informasi

##### a. Identifikasi Pekerjaan Berbiaya Tinggi

Data umum berupa *cost breakdown* guna mengetahui pekerjaan dengan bobot tertinggi.

Tabel 1.

*Cost Breakdown* Proyek

No	Uraian	Jumlah Harga (Rp)	Persen(%)
1	Struktur Beton	262,120,108,147	38.96
2	Pekerjaan Tanah	219,727,619,376	32.66
3	Perkerasan	101,344,401,298	15.06
4	Lapis Pondasi Agregat ( <i>Sub Base</i> )	45,454,721,771	6.77
5	Pekerjaan Lain - Lain	21,889,475,125	3.26
6	Drainase	12,148,789,414	1.81
7	Umum	6,257,909,648	0.93
8	Pencahayaan, Lampu Lalu Lintas dan Pekerjaan Listrik	1,921,683,560	0.29
9	<i>Subgrade</i>	6,720,790,431	1.0

No	Uraian	Jumlah Harga (Rp)	Persen(%)
10	Pengalihan dan Perlindungan Utilitas yang Ada	576,647,697	0.09
11	Galian Struktur	34,076,383	0.01
12	Pembersihan Tempat Kerja	186,876,000	0.03
<b>Total</b>		<b>672,732,686,390</b>	<b>100</b>

b. Pemilihan item pekerjaan

Bobot tertinggi adalah pekerjaan struktur yang kemudian pekerjaan tanah. Dikarenakan yang akan dilakukan analisa adalah pekerjaan perbaikan tanah, maka dipilih item pekerjaan tanah dengan bobot 32.66% lanjut pada tahap analisa selanjutnya yaitu analisa fungsi.

c. Analisis Fungsi

Analisis fungsi dalam VE adalah proses untuk memastikan bahwa setiap fungsi dalam suatu proyek dijalankan secara efisien, baik dari segi biaya maupun kualitas.

Dengan memahami dan mengoptimalkan fungsi utama dan sekunder, VE memastikan bahwa proyek berjalan dengan biaya minimal sambil tetap memenuhi semua persyaratan fungsional yang diinginkan.

Definisi fungsi dilakukan melalui penggunaan dua kata, kata kerja (*verb*) dan kata benda (*noun*). Dalam tanap analisis fungsi jika nilai index diperoleh  $Index\ Fuction\ Analysis = Cost / Worth > 1$ , maka beberapa item pekerjaan tersebut memiliki potensi dilakukan rekayasa *Value Engineering* (Rani, 2022).

Tabel 2.  
Analisis Fungsi Pekerjaan Perbaikan Tanah

Analisis Fungsi	Item	Pekerjaan Perbaikan Tanah			
		Fungsi			
Komponen	Kata Kerja	Kata Benda	B/S	Cost (Rp)	Worth (Rp)
<i>Common Borrow Material</i>	Menimbun	Jalan	B	38,013,875,646.72	38,013,875,646.72
Timbunan Tanah untuk Tanggul Samping	Menimbun	Jalan	B	5,675,091,388.49	5,675,901,388.49
Urugan Material Berbutir ( <i>Granular Backfill</i> )	Pembatas	Jalan	B	937,151,368.85	937,151,368.85
Geotekstil Separator (Kelas 1)	Pembatas	Jalan	S	3,567,888,636.72	0
Urugan Tanah Di Bawah Lapis Kedap	Menimbun	Jalan	B	25,187,095,808.98	25,187,095,808.98
<i>Prefabricate d Vertical Drain</i>	Memperbaiki	Jalan	S	39,710,753,116.60	0
Pipa Drainase Horizontal (PHD)	Memperbaiki	Jalan	B	3,285,030,606.08	0
Sistem Vakum	Memperbaiki	Jalan	S	6,980,997,151.09	0,00
<b>Jumlah</b>				186,287,195,843.30	69.814.024.213,04
<b>Cost/Worth</b>				<b>2.67</b>	

Hasil rasio *cost/ worth* untuk pekerjaan perbaikan tanah > 1 , yang menandakan bahwa terdapat biaya yang tidak diperlukan pada item pekerjaan tersebut dan dapat dilanjutkan ketahap kreatif dalam *Value Engineering*.

**3.1.2 Tahap Kreatif**

Dalam tahap kreatif, terdapat tiga alternatif metode yang dipilih yaitu sebagai berikut : *Preloading* tanpa drainase vertikal

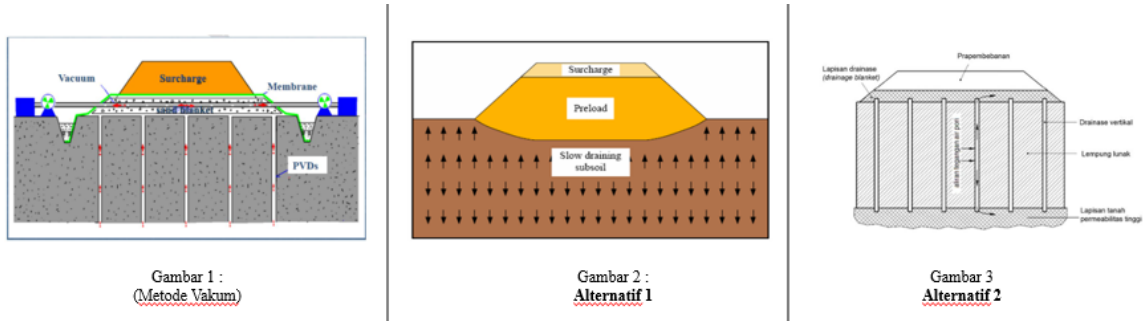
(**Alternatif 1**), *Preloading* dengan drainase vertikal (**Alternatif 2**) dan *Preloading* dengan drainase vertikal dan *vacuum preloading* (**Metode Vacuum**) yang merupakan desain awal.

**3.1.3 Tahap Analisis**

Tabel 3 berikut merupakan tahap analisis dari metode pekerjaan perbaikan tanah. Selanjutnya pada Gambar 2 diberikan ilustrasi dari Tabel 3.

Tabel 3.  
Analisis Alternatif Perbaikan Tanah Metode Konsolidasi

No	Metode Perbaikan	Jenis Pekerjaan	Ide Kreatif	Kelebihan	Kekurangan	Waktu	Faktor Keamanan	Ket
1	<b>Item Rencana :</b> <i>Preloading</i> dengan <i>drainage vertical</i> dan <i>vacuum preloading</i> (Metode <i>Vacuum</i> )	Pekerjaan Perbaikan Tanah	Kombinasi dengan metode lainnya	Waktu penurunan konsolidasi relatif lebih cepat. Kebutuhan material (timbunan) sedikit.	Total biaya mahal. Metode kerja membutuhkan keahlian khusus.	Standar (±150 hari)	Penurunan Konsolidasi ± 1 m – 1.6 m. Waktu Penurunan Konsolidasi ± 150 hari	Gbr 1
2	<b>Alternatif 1:</b> <i>Preloading</i> tanpa <i>drainage vertical</i>			Metode kerja lebih mudah. Total biaya relatif murah.	Kebutuhan material (timbunan) besar. Waktu penurunan konsolidasi sangat lama.	Lebih lama	Penurunan Konsolidasi ± 1.3 m – 1.4 m. Waktu Penurunan Konsolidasi ± 1,000 hari	Gbr 2
3	<b>Alternatif 2:</b> <i>Preloading</i> dengan <i>drainage vertical</i>			Metode kerja tidak serumit metode vakum. Total biaya tidak terlalu mahal.	Kebutuhan material (timbunan) besar. Waktu penurunan konsolidasi lama.	Standar	Penurunan Konsolidasi ± 1.3 m – 1.4 m. Waktu Penurunan Konsolidasi ± 500 hari	Gbr 3



Gambar 2.

Analisis Alternatif Perbaikan Tanah Metode Konsolidasi

3.1.4 Tahap Pengembangan

Tahap ini dilakukan dengan analisis *Life Cycle Cost* (LCC). Dalam perhitungan LCC dilakukan pada item pekerjaan RAB yang sudah dipilih, dalam perhitungan LCC menggunakan nilai suku bunga (*i*) sebesar 6% diambil dari nilai bunga rata-rata dari Bank Indonesia, umur rencana bangunan

adalah 40 tahun. Biaya perawatan yang dikeluarkan adalah sebesar 1% dari initial cost, sedang biaya replacement adalah 0 (nol) karena perbaikan tanah tidak dapat ditingkatkan selama masa pelayanan, kecuali dengan cara rekonstruksi menyeluruh.

Tabel 4.

*Life Cycle Cost* dari alternatif metode perbaikan tanah

No	Jenis Item	Initial Cost (Rp)	Maintenance Cost (Rp)	Replacement Cost (Rp)	LCC (Rp)
1	Metode Vacuum	186,287,195,844.33	28,017,594,254.99	-	214,304,790,099.32
2	Alternatif 1	152,992,653,955.73	23,010,095,154.94	-	176,002,749,110.68
3	Alternatif 2	154,689,315,625.61	23,265,273,070.09	-	177,954,588,695.71

3.1.5 Tahap Rekomendasi

Dari hasil perhitungan didapatkan item Alternatif 1, yaitu Metode *Preloading* tanpa drainase *vertical* memiliki selisih penghematan sebesar 17.8% terhadap biaya item rencana atau metode vakum atau sebesar Rp. 38,302,040,988.64, sedangkan item Alternatif 2 (Metode *Preloading* dengan drainase *vertical*) memiliki selisih penghematan sebesar 16.69% terhadap biaya item rencana atau sebesar Rp. 36,350,201,403.61.

3.2 Potensi Risiko Pekerjaan Perbaikan Tanah

Berikut adalah potensi risiko pekerjaan perbaikan tanah berdasarkan metode konsolidasi berbasis *Value engineering* yang diperoleh berdasarkan

studi literatur (I Made Kusuma Wiranata & I Nengah Sinarta, 2024)(Bundiani & Rahayu, 2023)(Gusnadi dkk., 2021)(Djunawan & Suhendra, 2021)(Hamdhan & Rahmanisa, 2023).

a) Risiko Teknis (X1)

Risiko teknis adalah kemungkinan terjadinya masalah atau kegagalan terkait dengan aspek teknis dari proyek. Dalam konteks ini, risiko teknis dapat mencakup berbagai aspek yang meliputi stabilitas tanah, perubahan sifat tanah, kegagalan struktur, efektivitas metode, dan kegagalan drainase.

b) Risiko Lingkungan (X2)

Risiko lingkungan adalah kemungkinan terjadinya dampak negatif terhadap lingkungan alam sebagai akibat dari kegiatan konstruksi dan perbaikan

tanah. Risiko ini mencakup berbagai aspek yang dapat mempengaruhi ekosistem, kualitas air, tanah, udara, dan kesehatan manusia serta makhluk hidup lainnya.

c) Risiko Operasional (X3)

Risiko operasional adalah berbagai potensi masalah yang dapat terjadi selama pelaksanaan proyek dan dapat mempengaruhi jadwal, biaya, kualitas, dan keselamatan.

d) Risiko Ekonomi (X4)

Risiko ekonomi adalah potensi kejadian-kejadian yang dapat menyebabkan kerugian finansial atau ketidakstabilan biaya proyek. Risiko ini dapat mempengaruhi anggaran, efisiensi biaya, dan keseluruhan keuangan proyek.

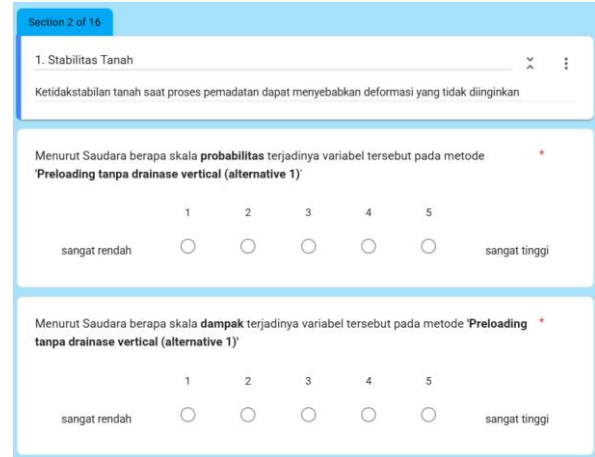
e) Risiko Keselamatan (X5)

Risiko keselamatan mengacu pada berbagai potensi bahaya yang dapat mengancam kesehatan dan keselamatan pekerja selama pelaksanaan proyek.

f) Risiko Proses dan Metode (X6)

Risiko proses dan metode dalam pekerjaan perbaikan tanah mengacu pada berbagai potensi masalah yang terkait dengan teknik, prosedur, dan strategi yang digunakan dalam proyek.

Dari potensi risiko, dilakukan breakdown variable serta penyebaran kuesioner. Kuesioner yang disebarkepada 8 orang untuk memperoleh nilai probabilitas dan dampak dari setiap variabel potensi risiko dari ketiga alternatif.



Gambar 3. Contoh Instrumen Penelitian

Dari hasil probabilitas dan dampak, dihitung nilai risiko dengan rumus :

$$\text{Risiko} = \text{probabilitas} \times \text{dampak} \dots\dots\dots(1)$$

Tabel 5 merupakan faktor, variabel serta hasil analisis risiko. Nilai mean dan standar deviasi menjadi input pada metode Monte Carlo.

Tabel 5. Faktor, Variabel dan Hasil Analisis Risiko

Faktor	Variabel	Alternatif 1			Alternatif 2			Alternatif Vacuum		
		mean	stdev	rank	mean	stdev	rank	mean	stdev	rank
Risiko Teknis (X1)	X1.1 Stabilitas Tanah	0.425	0.206	1	0.169	0.119	4	0.093	0.116	11
	X1.2 Perubahan Sifat Tanah	0.336	0.255	6	0.159	0.103	5	0.110	0.109	9
	X1.3 Kegagalan Struktur	0.400	0.275	2	0.174	0.235	3	0.124	0.244	8
	X1.4 Efektivitas Metode	0.336	0.255	5	0.074	0.036	14	0.044	0.035	14
	X1.5 Kegagalan Drainase	0.245	0.240	10	0.114	0.072	11	0.083	0.089	12
Risiko Lingkungan (X2)	X2.1 Drainase yang Tidak Efektif	0.368	0.270	4	0.130	0.096	9	0.200	0.145	3
	X2.2 Pengaruh Terhadap Ekosistem	0.239	0.309	12	0.092	0.058	13	0.073	0.092	13
	X2.3 Polusi Air	0.064	0.092	14	0.116	0.108	10	0.107	0.112	10

Faktor	Variabel	Alternatif 1			Alternatif 2			Alternatif Vacuum		
		mean	stdev	rank	mean	stdev	rank	mean	stdev	rank
Risiko Operasional (X3)	X3.1 Kesalahan Manusia	0.242	0.307	11	0.133	0.098	8	0.198	0.247	4
	X3.2 Gangguan Proyek	0.394	0.246	3	0.259	0.213	1	0.274	0.294	1
Risiko Ekonomi (X4)	X4.1 Biaya Tak Terduga	0.274	0.294	8	0.114	0.072	12	0.150	0.111	6
	X4.2 Efisiensi Biaya	0.260	0.294	9	0.150	0.111	6	0.202	0.233	2
Risiko Keselamatan (X5)	X5.1 Kesehatan dan Keselamatan Kerja	0.146	0.236	13	0.147	0.116	7	0.147	0.116	7
Risiko Proses dan Metode (X6)	X6.1 Kegagalan Metode Konsolidasi	0.314	0.269	7	0.195	0.119	2	0.174	0.139	5

Hasil analisis risiko dari tiga alternatif sebagai berikut :

3.1 Alternatif 1 (*Preloading* tanpa Drainase Vertikal).

Risiko teknis (stabilitas tanah dan kegagalan struktur) mendominasi, menunjukkan bahwa metode ini memiliki potensi kegagalan paling tinggi dalam mendukung beban struktural. Risiko operasional seperti gangguan proyek juga tinggi, yang mengindikasikan kurang stabilnya metode ini dalam kondisi lapangan yang kompleks.

3.2 Alternatif 2 (*Preloading* dengan Drainase Vertikal)

Alternatif ini memiliki risiko yang tersebar lebih merata, namun gangguan proyek dan efektivitas metode tetap menjadi tantangan utama. Risiko teknis masih ada, tapi lebih rendah dibanding Alternatif 1.

3.3 Alternatif Vacuum (*Preloading* dengan drainage vertical dan vacuum preloading)

Meski secara teknis lebih stabil, biaya dan potensi gangguan proyek menjadi risiko dominan. Ini mencerminkan bahwa metode ini cocok untuk proyek dengan toleransi biaya tinggi, namun

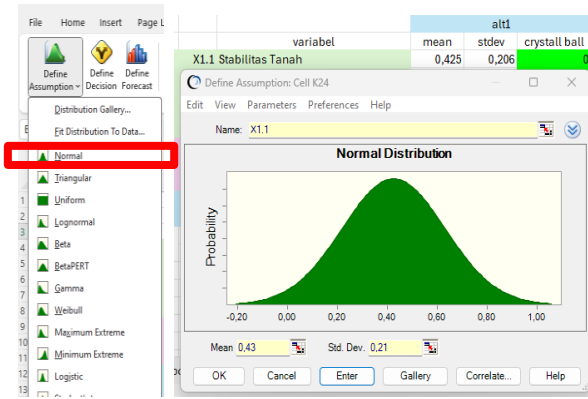
tetap rentan terhadap kendala eksternal di lapangan.

3.3 Simulasi Monte Carlo

Simulasi Monte Carlo merupakan alat yang kuat dalam analisis dan pengambilan keputusan yang didasarkan pada probabilitas, yang telah diterapkan secara luas di berbagai bidang, termasuk manajemen proyek, analisis risiko, dan teknik geoteknik. Adapun urutan analisisnya sebagai berikut :

a. *Define Assumption*

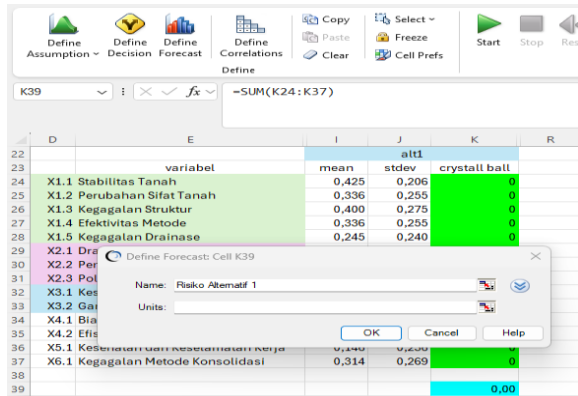
Untuk mendefinisikan asumsi dari setiap variabel input dalam model simulasi. Pada penelitian ini distribusi yang dipakai adalah Distribusi Normal (*Distribusi Gaussian*). Distribusi ini berbentuk lonceng simetris, dengan rata-rata sebagai nilai tengahnya, di mana sebagian besar hasil akan mendekati rata-rata dan variasi terjadi di sekitar nilai tersebut



Gambar 4.  
Proses *Define Assumption*

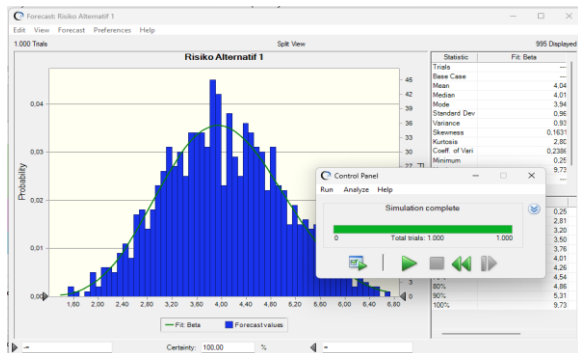
b. *Define Forecast*

Digunakan untuk menentukan *output* atau hasil yang diproyeksikan dari simulasi.



Gambar 5.  
Proses *Define Forecast*

c. Simulasi Monte Carlo



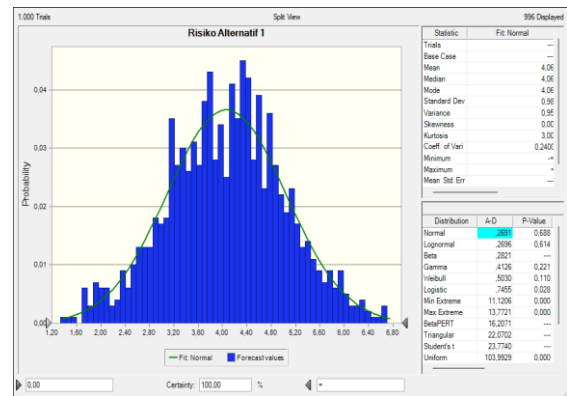
Gambar 6.  
Proses Iterasi Monte Carlo

### 3.4 Analisis Hasil

*Crystal Ball* akan menghasilkan output statistik seperti *mean*, *standard deviation*, dan *percentiles* untuk setiap variabel ramalan. Analisis ini membantu mengidentifikasi kemungkinan hasil dan risiko terkait.

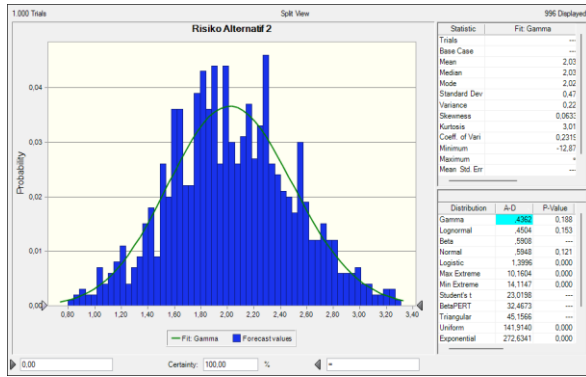
#### 3.4.1 Distribusi Probabilitas

Hasil simulasi berupa distribusi probabilitas digunakan untuk memodelkan variabilitas dan ketidakpastian dari input atau faktor risiko yang memengaruhi hasil akhir dari suatu proses atau sistem. Gambar 7, 8, 9 dan Tabel 6 berikut merupakan hasil distribusi probabilitas risiko dari tiga alternatif.

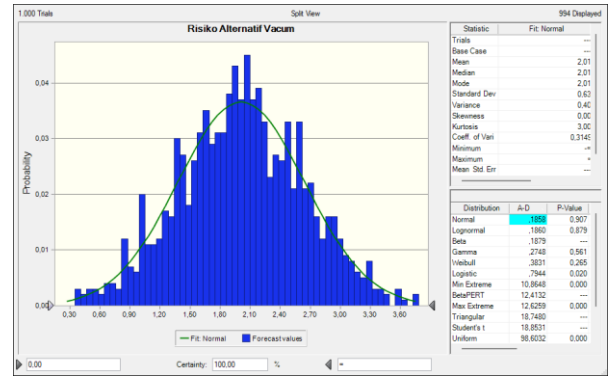


Gambar 7.  
Model Risiko Alternatif 1

Distribusi risiko pada Alternatif 1 menunjukkan sebaran normal, dengan rata-rata (mean) risiko sekitar 4.04. Ini adalah nilai risiko tertinggi di antara ketiga alternatif. Sedangkan distribusi risiko pada Alternatif 2 memiliki rata-rata 2.01, dengan bentuk distribusi yang cenderung *positively skewed* (agak miring ke kanan). Ini menandakan bahwa sebagian besar nilai risiko terkonsentrasi pada tingkat risiko sedang ke rendah. Distribusi risiko pada Alternatif 3 menunjukkan rata-rata risiko 1.97, yang merupakan terendah di antara ketiganya dengan sebaran normal.



Gambar 8.  
Model Risiko Alternatif 2



Gambar 9.  
Model Risiko Alternatif Vacuum

Tabel 6.  
Statistik Model Risiko

Statistics	Risiko Alternatif 1	Risiko Alternatif 2	Risiko Alternatif Vacuum
<i>Trials</i>	1000	1000	1000
<i>Base Case</i>	0.00	0.00	0.00
<i>Mean</i>	4.04	2.01	1.97
<i>Median</i>	3.98	1.98	1.95
<i>Standard Deviation</i>	0.96	0.47	0.62
<i>Variance</i>	0.93	0.22	0.38
<i>Skewness</i>	0.1628	0.0891	0.0742
<i>Kurtosis</i>	2.80	2.91	2.82
<i>Coeff. of Variation</i>	0.2387	0.2348	0.3131
<i>Minimum</i>	1.21	0.39	0.18
<i>Maximum</i>	7.06	3.55	3.98
<i>Range Width</i>	5.85	3.15	3.80
<i>Mean Std. Error</i>	0.03	0.01	0.02

Hasil analisis berdasarkan statistik risiko pada Tabel 6 dari tiga alternatif perbaikan tanah menggunakan simulasi Monte Carlo adalah sebagai berikut:

- a) Alternatif 1 (*Preloading* tanpa drainase vertikal) memiliki rata-rata dan variabilitas risiko tertinggi dengan rentang risiko paling lebar, menunjukkan ketidakpastian besar dalam pelaksanaan. Penyebaran risiko (*Standard Deviation*) 0.96, menunjukkan variasi yang lebih besar dalam risiko yang dihadapi, dengan rentang dari 1.21 hingga 7.06.
- b) Alternatif 2 (*Preloading* dengan drainase vertikal) menghasilkan risiko paling terkendali dengan nilai rata-rata,

standar deviasi, dan variansi paling kecil. Ini menunjukkan kestabilan dalam pelaksanaan dan prediktabilitas risiko. Penyebaran risiko (*Standard Deviation*) 0.47, menandakan bahwa penyebaran risiko lebih kecil dan lebih konsisten dibandingkan Alternatif 1. Rentang risiko antara 0.39 hingga 3.55 juga lebih sempit, menunjukkan stabilitas yang lebih baik.

- c) Alternatif *Vacuum* (*Preloading* dengan drainase vertikal dan *vacuum*) memiliki risiko rata-rata paling rendah 1.97, namun variasi hasil masih cukup tinggi, sehingga hanya cocok jika proyek memiliki toleransi biaya tinggi untuk mengejar kestabilan teknis maksimal.

**3.4.2 Probabilitas Nilai Risiko Dari Hasil Model Risiko Berdasarkan Faktor Risikonya**

Nilai risiko dikelompokkan berdasarkan faktornya, kemudian dimasukkan ke model risiko untuk mendapatkan prosentase.

Tabel 7 berikut merupakan besar nilai risiko berdasarkan faktor risiko dan prosentase terjadinya berdasarkan hasil analisis Monte Carlo menggunakan *crystall ball*.

Tabel 7.  
Analisis Prosentase Faktor Risiko Dari Ketiga Alternatif

Faktor Risiko	Alternatif 1		Alternatif 2		Alternatif Vacuum	
	Nilai	Prosentase	Nilai	Prosentase	Nilai	Prosentase
1 Risiko Teknis	1.74	99.25	0.69	99.80	0.45	99.08
2 Risiko Lingkungan	0.67	100.00	0.34	99.87	0.38	99.36
3 Risiko Operasional	0.64	100.00	0.39	99.86	0.47	99.06
4 Risiko Ekonomi	0.53	100.00	0.26	99.89	0.35	99.51
5 Risiko Keselamatan	0.15	100.00	0.15	100.00	0.15	99.81
6 Risiko Proses dan Metode	0.31	100.00	0.20	99.90	0.17	99.77

Risiko berdasar pada PMBOK, dikelompokkan menjadi 3 yaitu (Kholida dkk., 2020)

Risiko Rendah, skala 0.01 – 0.05

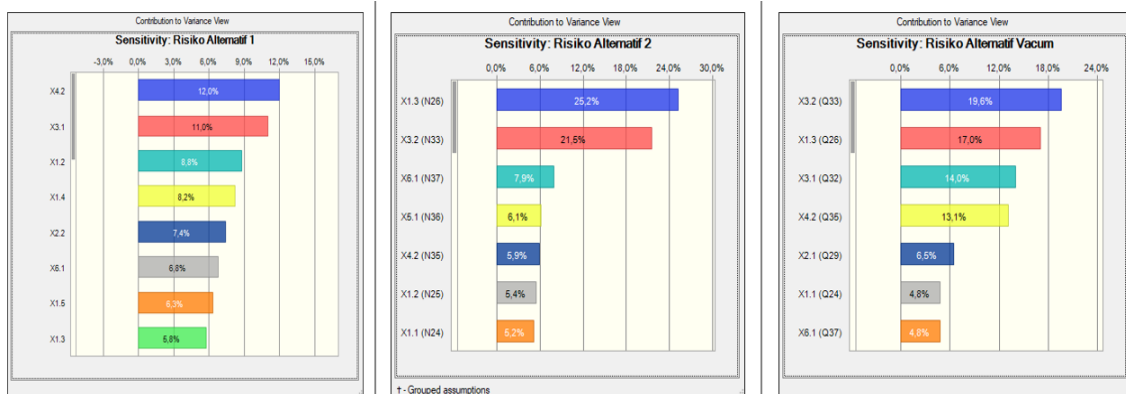
Risiko Sedang, skala 0.06 – 0.14

Risiko Tinggi, skala 0.18 – 0.72

Berdasarkan hasil simulasi dan tabulasi kontribusi risiko dari enam kategori utama (Tabel 7), ditemukan bahwa risiko teknis merupakan penyumbang terbesar terhadap total risiko pada ketiga alternatif metode perbaikan tanah. Hal ini sesuai dengan temuan Wijaya & Makarim (2022) yang menegaskan bahwa karakteristik teknis tanah lunak, terutama stabilitas dan efektivitas metode konsolidasi, sangat menentukan keberhasilan proyek perbaikan

tanah. Sedangkan risiko keselamatan tergolong risiko sedang pada ketiga alternatif, menunjukkan perlunya perlakuan setara pada aspek K3 tanpa tergantung pada jenis metode teknis yang digunakan.

- a) Alternatif 1 memiliki nilai risiko tertinggi pada hampir semua kategori, terutama teknis dan operasional.
- b) Alternatif 2 memiliki risiko yang relatif rendah di semua kategori, terutama dalam risiko ekonomi dan teknis, menjadikannya alternatif yang paling aman dari segi risiko.
- c) Alternatif Vacuum memiliki risiko operasional tertinggi, tetapi risiko yang lebih rendah dalam teknis dan proses dan metode.



Gambar 10.  
Grafik Sensitivitas Hasil Monte Carlo

### 3.4.3 Analisis Sensitivitas Risiko

Grafik sensitivitas dari analisis Monte Carlo digunakan untuk mengidentifikasi variabel yang paling berpengaruh terhadap hasil atau risiko dalam suatu proyek. Fungsi utama dari grafik sensitivitas adalah untuk menentukan kontribusi relatif dari setiap faktor risiko terhadap total risiko, sehingga dapat membantu dalam proses pengambilan keputusan dan mitigasi.

Gambar 10 merupakan sensitivitas hasil analisis Monte Carlo. Berdasarkan tiga grafik sensitivitas, didapat variable risiko yang paling berpengaruh dari ketiga alternatif.

- a) Sensitivitas Risiko Alternatif 1  
X4.2 (Efisiensi Biaya): Berkontribusi sebesar 12% terhadap variabilitas risiko, menunjukkan bahwa efisiensi biaya merupakan faktor utama yang mempengaruhi risiko pada Alternatif 1.
- b) Sensitivitas Risiko Alternatif 2  
X1.3 (Stabilitas Tanah): Menjadi faktor dominan dengan kontribusi sebesar 25.2% terhadap variabilitas risiko. Stabilitas tanah merupakan faktor risiko yang sangat mempengaruhi hasil proyek.  
X3.2 (Gangguan Proyek): Berkontribusi sebesar 21.6%, yang menunjukkan bahwa gangguan pada jadwal proyek sangat mempengaruhi risiko pada Alternatif 2.
- c) Sensitivitas Risiko Alternatif Vacuum  
X3.2 (Gangguan Proyek): Faktor utama yang mempengaruhi variabilitas risiko, dengan kontribusi sebesar 19.6%, menandakan bahwa gangguan pada jadwal proyek mempengaruhi risiko secara signifikan pada Alternatif Vacuum.  
X1.3 (Stabilitas Tanah): Berkontribusi sebesar 17%, menandakan bahwa stabilitas tanah juga sangat mempengaruhi hasil pada metode *vacuum*.

## 4. KESIMPULAN

Metode *preloading* dengan drainase vertikal (Alternatif 2) merupakan pilihan paling efisien berdasarkan pendekatan *Value Engineering*. Meskipun tidak memiliki biaya paling rendah seperti Alternatif 1 (*preloading* tanpa drainase vertikal), metode ini menunjukkan keseimbangan terbaik antara penghematan biaya (penghematan sebesar 16.69%) dan tingkat risiko yang lebih rendah, menjadikannya solusi yang optimal dari sisi efisiensi biaya dan teknis.

Risiko yang diidentifikasi dalam metode perbaikan tanah dibagi ke dalam enam kategori utama yaitu risiko teknis, risiko lingkungan, risiko operasional, risiko ekonomi, risiko keselamatan, risiko proses dan metode.

Simulasi Monte Carlo dilakukan dengan 1.000 iterasi menggunakan *software Crystal Ball*. Hasilnya Alternatif 1 (*preloading* tanpa drainase vertikal) memiliki risiko tertinggi dengan mean risiko sebesar 4.04, menunjukkan variasi hasil yang besar. Alternatif 2 (*preloading* dengan drainase vertikal) memiliki mean risiko 2.01 dengan sebaran risiko lebih terkendali. Alternatif *Vacuum* menunjukkan risiko terendah dengan mean 1.97, namun disertai biaya tertinggi.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- Aiyani, N. M. D., & Parsa, I. W. (2019). Konsolidasi Tanah Sebagai Upaya Meningkatkan Efisiensi dan Produktivitas Pemanfaatan Tanah Perkotaan Secara Optimal. *E-Jurnal Universitas Udayana*.
- Bundiani, N., & Rahayu, S. (2023). Analisis Pencegahan Kecelakaan Kerja Menggunakan Metode *Job Safety Analysis* Pada Dinding Penahan Tanah Di Proyek CWP-02 Gedung FPEB UPI. 5(1), 1–10.
- Carlo, S. M., Wijaya, B., & Jacob, I. (n.d.). *Monte Carlo Simulation* Dipublikasikan Oleh *Risk Identification Risk Evaluation Risk*

- Analysis: Consequences Probability Level of Risk.* www.lspmks.co.id
- Djunawan, S., & Suhendra, A. (2021). Analisis Pengaruh Metode Perbaikan Tanah Vacuum Preloading Terhadap Struktur Abutment Di Sekitarnya. 4(3), 641.
- Gusnadi, Z., Rahardjo, P. P., & Lim, A. (2021). Perbandingan Perilaku Perbaikan Tanah Metode Preloading Vakum Dan Preloading Timbunan Dengan Elemen Hingga 2d. 11(2), 363.
- Hamdhan, I. N., & Rahmanisa, N. L. (2023). Pemodelan Perbaikan Tanah Lempung Lunak Menggunakan Vacuum Preloading. 775–786.
- I Made Kusuma Wiranata, N., & I Nengah Sinarta, N. (2024). Analisis Konsolidasi Dan Nilai Angka Aman Pada Usaha Stabilisasi Tanah Lempung Lunak Dengan Prefabricated Vertical Drain (Pvd). 1(6).
- Isnaeni, S., & Herzanita, A. (2022). Analisis Manajemen Risiko Pada Pekerjaan Box Girder Cast In-Situ Studi Kasus Proyek Pembangunan Kereta Cepat Jakarta-Bandung Stasiun Halim (Risk Management Analysis on Box Girder Cast-In Situ Work Study Case Halim Station Jakarta-Bandung High Speed Railway). Jurnal Artesis, 2(2), 175–184.
- Kholida, L., Kinanti, N. A., & Yoseva, P. B. (2020). Simulasi Model Resiko Pengendalian Pekerjaan Erection PCI Girder Proyek Pembangunan Jalan Tol Kunciran-Cengkareng. Rekayasa Sipil, 9(2), 59.
- Nabila Yusna, S., Suharyanto, A., & Wijatmiko, I. (2024). *Scheduling Analysis With Monte Carlo Simulation and Statistic Method on a Building Construction Project.* Kne Social Sciences.
- Putra, C. E., & Makarim, C. A. (2020). Analisis Alternatif Perbaikan Tanah Lunak Dan Sangat Lunak Pada Jalan Tol. JMTS Jurnal Mitra Teknik Sipil, 3(4), 1137.
- Rani, H. A. (2022). Konsep *Value engineering* Dalam Manajemen Proyek Konstruksi (Vol. 1). Deepublish
- Sari, U. C., Wardani, S. P. R., Muntohar, A. S., Partono, W., & Sadono, K. W. (2023). Consolidation Settlement Prediction and Monitoring of Toll Road Embankment at STA 23+650 Semarang–Demak Toll Road Section. E3s Web of Conferences, 429, 04026.
- Suryadi, N., & Garniwa M.K, I. (2023). *Economic Analysis of Remaining Geothermal Reserves to Increase Geothermal Power Plant Capacity in Achieving National Energy Mix Target.* International Journal of Engineering Business and Social Science, 1(06), 654–665.
- Suwandari, Y. D., & Mirnayani, M. (2021). *Evaluation of Historical Building Economic Value To Improve Company Revenue With Value engineering Method.* Jurnal Teknik Sipil Dan Perencanaan, 23(1), 1–8.
- Wijaya, A. K., & Makarim, C. A. (2022). Studi Perbandingan Tekanan Lateral Tanah Sedang Dan Tanah Amat Lunak. JMTS Jurnal Mitra Teknik Sipil, 401–414.



Copyright© by the authors. Licensee Jurnal Ilmiah MITSU, Indonesia. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike (CC BY-NC-SA 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)