

# Software Based Geotechnical Analysis of Spillway Slope Reinforcement

## Analisis Geoteknik Berbasis Perangkat Lunak pada Perkuatan Lereng Spillway

Ikhsan Fabyanto<sup>1\*</sup>, Muhammad Zaki<sup>2</sup>, Darmawan Pontan<sup>3</sup>, Tulus Widiarso<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Master of Civil Engineering, Universitas Trisakti, Indonesia

<sup>1</sup>ikhsan.fabiano@gmail.com, <sup>2</sup>m.zaki@trisakti.ac.id, <sup>3</sup>darmawan@trisakti.ac.id, <sup>4</sup>tulus@trisakti.ac.id

\*Penulis Korespondensi

### Artikel Info

#### Riwayat Artikel:

Penyerahan Mei 20, 2025

Revisi September 19, 2025

Diterima Oktober 23, 2025

Diterbitkan Oktober 28, 2025

#### Keywords:

Slope Stability

Reinforcement

Cost

Time

#### Kata Kunci:

Stabilitas Lereng

Perkuatan

Biaya

Waktu



### ABSTRACT

**The construction** of large-scale infrastructure such as dams requires precise planning and implementation to ensure structural stability and long-term operational safety. **This study** aims to analyze slope protection and embankment reinforcement at the spillway excavation area of the Dam Project in Surian District, located in the 137 km-long Cipunagara River Basin. **A quantitative** approach was applied, using geotechnical modeling software Plaxis 8.6 and Microsoft Excel for data processing. Three slope reinforcement methods were compared: geomat, shotcrete, and cocomesh. **Based on the analysis**, slope reinforcement using shotcrete achieved the highest safety factor, with short-term SF = 1.649 (34.50% increase) and long-term SF = 1.514 (23.49% increase). Geomat ranked second with SF = 1.544 (25.94%) and 1.418 (15.66%), while cocomesh obtained SF = 1.540 (25.61%) and 1.355 (10.52%). The unreinforced slope had an SF of 1.226. In terms of cost, shotcrete was the most expensive at IDR 4,331,068,967.23, followed by geomat (IDR 2,734,025,024.50) and cocomesh (IDR 906,745,000.00). However, shotcrete also required the longest construction time (30 days) compared to geomat (20 days) and cocomesh (16 days). **Shotcrete provides** the best technical performance for slope stability, but geomat and cocomesh are more efficient alternatives in terms of cost and time, offering a balanced solution for slope reinforcement projects.

This is an open access article under the [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.



### ABSTRAK

**Pembangunan infrastruktur** berskala besar seperti bendungan memerlukan perencanaan dan pelaksanaan yang cermat untuk menjamin stabilitas struktur dan keamanan operasional jangka panjang. **Penelitian ini bertujuan** untuk menganalisis proteksi lereng dan perkuatan tebing pada area galian spillway Proyek Bendungan di Kecamatan Surian, yang berada di Daerah Aliran Sungai Cipunagara sepanjang 137 km. **Pendekatan kuantitatif** digunakan dengan pemodelan geoteknik melalui perangkat lunak Plaxis 8.6 dan pengolahan data menggunakan Microsoft Excel. Tiga metode perkuatan lereng dibandingkan, yaitu geomat, shotcrete, dan cocomesh. **Hasil analisis** menunjukkan bahwa perkuatan lereng menggunakan shotcrete memberikan faktor keamanan tertinggi, yaitu SF jangka pendek = 1,649 (kenaikan 34,50%) dan SF jangka panjang = 1,514 (kenaikan 23,49%). Geomat memiliki SF = 1,544 (25,94%) dan 1,418 (15,66%), sedangkan cocomesh memiliki SF = 1,540 (25,61%) dan 1,355 (10,52%). Lereng tanpa perkuatan memiliki SF sebesar 1,226. Dari sisi biaya, shotcrete paling mahal yaitu Rp 4.331.068.967,23, dibanding geomat (Rp 2.734.025.024,50) dan cocomesh (Rp 906.745.000,00). Namun, waktu pelaksanaan shotcrete juga paling lama, yaitu 30 hari, sedangkan geomat dan cocomesh

membutuhkan masing-masing 20 dan 16 hari. **Shotcrete unggul** secara teknis dalam meningkatkan kestabilan lereng, namun geomat dan cocomesh lebih efisien dari sisi biaya dan waktu, sehingga layak dipertimbangkan sebagai alternatif dalam proyek perkuatan lereng.

*This is an open access article under the [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.*



DOI: <https://doi.org/10.33050/tmj.v10i2.2479>

Ini adalah artikel akses terbuka di bawah CC-BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

©Penulis memegang semua hak cipta

## 1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur besar seperti bendungan memerlukan perencanaan dan pelaksanaan yang teliti untuk menjamin stabilitas struktur dan keamanan operasional jangka panjang [1]. Keberhasilan proyek bendungan bergantung pada konstruksi yang sesuai spesifikasi teknis, penggunaan material berkualitas, serta pengawasan dan inspeksi berkala [2]. Salah satu proyek tersebut adalah Pembangunan Bendungan di Kecamatan Surian di Daerah Aliran Sungai Cipunagara sepanjang 137 km, yang menghadapi tantangan berupa kelongsoran pada galian *spillway*, tepatnya di STA 0+500 sampai 0+520, sehingga memerlukan proteksi lereng dan perkuatan tebing [3]. Tiga metode yang digunakan untuk mengatasi masalah tersebut adalah *geomat*, *shotcrete*, dan *cocomesh*. *Geomat* berbentuk matriks filamen nilon 3 dimensi dengan ruang terbuka yang memungkinkan akar tanaman terjalin di dalamnya, sehingga membantu menahan gaya geser dan menstabilkan permukaan tanah [4]. *Shotcrete* adalah beton semprot dengan kekuatan awal tinggi, mampu menempel ke permukaan dan mengeras dalam hitungan menit tanpa penyangga tambahan [5]. Sementara itu, *cocomesh* terbuat dari serat kelapa, merupakan alternatif ramah lingkungan dan ekonomis, namun kurang tahan lama dibandingkan material sintetis atau beton [6].

Pemilihan metode proteksi lereng yang tepat tidak hanya memengaruhi keberhasilan proyek dalam jangka pendek, tetapi juga berdampak pada ketahanan serta efisiensi biaya pemeliharaan jangka panjang [7, 8]. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis dan membandingkan penggunaan *geomat*, *shotcrete*, dan *cocomesh* berdasarkan aspek biaya dan waktu dalam Proyek Pembangunan Bendungan di Kecamatan Surian [9, 10]. Penelitian ini juga sejalan dengan tujuan pembangunan berkelanjutan atau Sustainable Development Goals (SDGs), khususnya SDG 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur) dan SDG 11 (Kota dan Permukiman yang Berkelanjutan) [11]. Pemilihan metode perkuatan lereng yang efisien dan ramah lingkungan, seperti penggunaan *cocomesh*, mencerminkan upaya untuk membangun infrastruktur yang tangguh, inovatif, dan berkelanjutan [12]. Selain itu, efisiensi biaya dan waktu dalam proyek konstruksi mendukung terwujudnya pembangunan infrastruktur yang inklusif dan tahan terhadap risiko bencana, sekaligus meminimalkan dampak ekologis [13]. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya memberikan manfaat teknis, tetapi juga mendukung praktik manajemen proyek yang berwawasan lingkungan dan berorientasi pada pembangunan berkelanjutan.

## 2. LANDASAN TEORI

### 2.1. Tanah

Tanah adalah material yang terdiri dari butiran mineral padat yang tidak terikat secara kimia, serta bahan organik yang telah melapuk, dengan cairan dan gas yang mengisi ruang antarpartikelnya [14]. Tanah berperan penting dalam konstruksi teknik sipil dan sebagai penopang pondasi bangunan [15, 16]. Tanah residual terbentuk dari pelapukan batuan yang mengendap diatas batuan induk [17]. Umumnya, kuat geser tanah residual meningkat seiring kedalaman, karena pelapukan lebih besar terjadi di permukaan [18, 19]. Tanah residual dari pelapukan batuan breksi memiliki ketebalan 1–1,6 m dan terdiri dari lempung, lanau, pasir kasar, serta batuan induk, yang termasuk jenis tanah anorganik dengan plastisitas rendah [20].

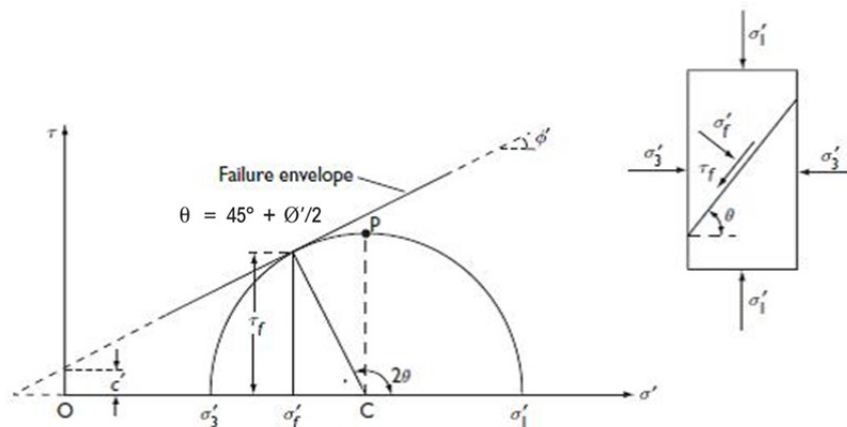
Berdasarkan tingkat kelekatan, tanah dibedakan menjadi:

1. Tanah kohesif adalah tanah yang mempunyai sifat lekatan antara butir-butirnya atau mengandung lempung cukup banyak [21].

2. Tanah non-kohefif adalah tanah yang tidak mempunyai atau sedikit sekali lekatan antara butir-butirnya atau hampir tidak mengandung lempung.
3. Tanah organik adalah tanah yang sifatnya sangat dipengaruhi oleh bahanbahan organik [22].

## 2.2. Kuat Geser Tanah

Kuat geser tanah merupakan kemampuan tanah menahan gaya geser pada permukaannya sebelum terjadi keruntuhan, yang dirumuskan sebagai  $\tau = c + \sigma \tan(\phi)$ , di mana  $\tau$  adalah kuat geser tanah,  $c$  merupakan kohesi tanah,  $\sigma$  adalah tegangan normal pada bidang geser, dan  $\phi$  adalah sudut geser dalam [23–25]. Kuat geser tanah ini dinyatakan dalam bentuk tegangan efektif  $\sigma'_1$  dan  $\sigma'_3$  pada saat keruntuhan terjadi, yang digambarkan melalui lingkaran Mohr dengan koordinat  $(\tau, \sigma')$  seperti pada Gambar 1 [26].



Gambar 1. Grafik Lingkaran Mohr

Gambar 1 menunjukkan Grafik Lingkaran Mohr yang menggambarkan hubungan antara tegangan normal ( $\sigma'$ ) dan tegangan geser ( $\tau$ ) pada saat keruntuhan tanah terjadi [27, 28]. Lingkaran Mohr digunakan untuk menentukan kondisi tegangan maksimum dan minimum pada elemen tanah [29, 30]. Garis singgung pada lingkaran mewakili bidang keruntuhan, dimana sudut antara bidang tegangan maksimum dan garis singgung merupakan sudut geser dalam ( $\phi$ ) [31]. Grafik ini membantu memahami stabilitas tanah terhadap gaya geser yang bekerja pada lereng [32].

## 2.3. Kelongsoran

Teori kelongsoran tanah mengacu pada analisis stabilitas tanah atau lereng terhadap keruntuhan akibat kegagalan geser, dimana tanah mengalami pergeseran atau penurunan secara tiba-tiba yang sering kali disebabkan oleh beban yang berlebihan atau kondisi lingkungan yang berubah [33, 34]. Kegagalan ini terjadi ketika tegangan geser pada bidang tertentu di dalam massa tanah melebihi kuat geser tanah tersebut [35, 36]. Dalam analisis geoteknik, teori kelongsoran bertujuan untuk memprediksi kondisi dimana tanah dapat kehilangan stabilitasnya dan mengalami kelongsoran atau longsor [37].

## 2.4. Stabilitas Lereng

Stabilitas lereng merupakan faktor penting dalam menilai keamanan tanah, dengan tujuan utama menentukan faktor keamanan bidang longsor [38, 39]. Faktor keamanan didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya penahan dan gaya penggerak, dimana massa tanah di atas bidang gelincir cenderung bergerak ke bawah akibat gravitasi [40, 41]. Nilai faktor keamanan dapat dihitung menggunakan persamaan  $FK = \frac{R}{\tau}$ , dengan  $FK$  sebagai angka keamanan terhadap kekuatan tanah,  $R$  adalah tahanan geser maksimum yang dapat dikerahkan oleh tanah, dan  $\tau$  merupakan tegangan geser akibat gaya berat tanah yang berpotensi menyebabkan longsor [42].

## 2.5. Perkuatan Lereng

Geomat merupakan material geosintetik yang berfungsi mengendalikan erosi dan memperkuat struktur tanah melalui serat sintesis berbentuk tiga dimensi yang membantu meningkatkan kohesi serta kekuatan

geser tanah [43]. Material ini bekerja dengan berinteraksi bersama partikel tanah untuk membentuk matriks yang stabil sehingga mampu mengurangi risiko longsor dan meningkatkan faktor keamanan lereng hingga 1,5 kali dibandingkan lereng tanpa perkuatan. Nilai kohesi efektif geomat dapat dirumuskan sebagai  $c' = c + c_{\text{geomat}}$ , di mana  $c'$  adalah kohesi asli tanah dan  $c_{\text{geomat}}$  merupakan tambahan kohesi yang diberikan oleh geomat.

*Shotcrete* adalah teknik penyemprotan beton atau mortar bertekanan tinggi ke permukaan lereng yang telah dipersiapkan untuk meningkatkan kestabilan dan mencegah longsor. Campuran semen, agregat, dan air disemprotkan melalui nozzle berkecepatan tinggi sehingga menempel kuat pada permukaan. Nilai kohesi efektif *shotcrete* dirumuskan sebagai  $c' = c + c_{\text{shotcrete}}$ , di mana  $c'$  merupakan kohesi asli tanah dan  $c_{\text{shotcrete}}$  adalah tambahan kohesi yang diberikan oleh material *shotcrete*.

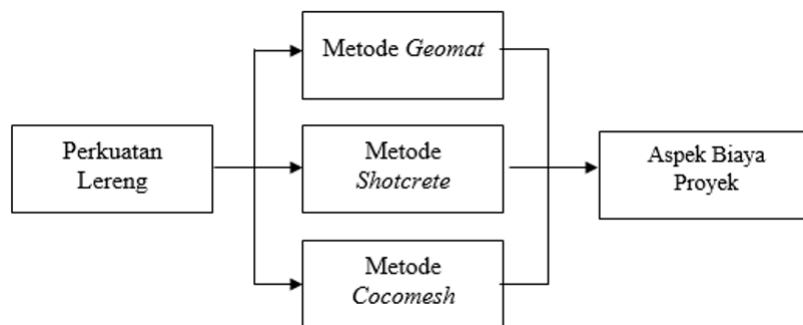
*Cocomesh* adalah material alami berbahan serat sabut kelapa yang digunakan untuk perkuatan lereng guna mencegah erosi dan kelongsoran. Material ini memiliki kekuatan tarik tinggi serta dapat terurai secara alami, sehingga menjadi pilihan ramah lingkungan dalam stabilisasi lereng. Nilai kohesi efektif *cocomesh* dirumuskan sebagai  $c' = c + c_{\text{cocomesh}}$ , di mana  $c'$  merupakan kohesi asli tanah dan  $c_{\text{cocomesh}}$  adalah tambahan kohesi yang diberikan oleh *cocomesh*.

## 2.6. Manajemen Proyek

Manajemen proyek merupakan kegiatan sementara untuk menghasilkan produk atau hasil yang unik, dengan awal dan akhir yang jelas. Dalam pelaksanaannya, manajemen proyek harus memperhatikan tiga aspek utama: biaya, mutu, dan waktu. Manajemen biaya mencakup perencanaan, penganggaran, dan pengendalian agar proyek sesuai anggaran, sedangkan manajemen waktu memastikan proyek selesai tepat jadwal melalui perencanaan dan pengendalian yang terstruktur.

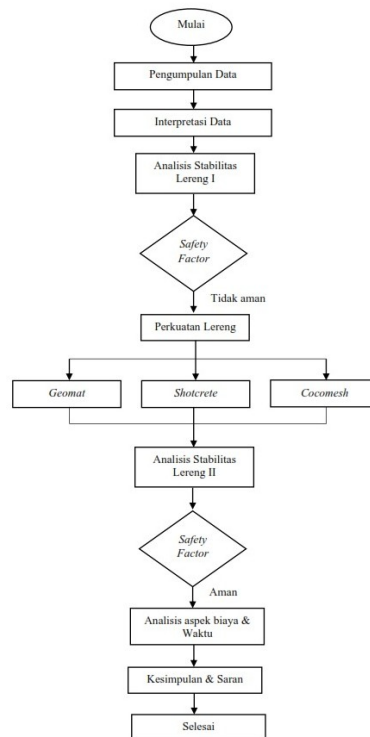
## 3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan data primer dan sekunder yang diperoleh dari dokumen geoteknik, proteksi lereng, perkuatan tebing, justifikasi teknis, evaluasi kelongsoran, dan data operasional proyek Bendungan di Kecamatan Surian, Kabupaten Subang [44, 45]. Lokasi penelitian berada pada area galian *spillway* di daerah aliran Sungai Cipunagara ( $6^{\circ}50'$  LS dan  $107^{\circ}50'$  BT) [46]. Penelitian ini meninjau hubungan antara kelongsoran lereng *spillway* dan aspek manajemen biaya proyek, di mana kejadian longsor mengharuskan kontraktor melakukan perbaikan untuk menstabilkan area terdampak. Kerangka dan tahapan penelitian ditampilkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Kerangka Penelitian

Gambar 2 menunjukkan bahwa penanganan perkuatan lereng mempertimbangkan tiga metode utama: *Geomat*, *Shotcrete*, dan *Cocomesh*. Setiap metode berkontribusi langsung terhadap aspek biaya proyek, sehingga pemilihannya akan memengaruhi total pengeluaran secara signifikan. Pemilihan metode perlu mempertimbangkan karakteristik biaya masing-masing, seperti material, peralatan, tenaga kerja, dan durasi pengerjaan. Oleh karena itu, pemahaman terhadap profil biaya tiap metode menjadi penting agar proyek dapat dijalankan secara efisien dan sesuai anggaran.



Gambar 3. Tahapan Penelitian

Gambar 3 menunjukkan diagram alir analisis stabilitas lereng dan evaluasi metode perkuatan berdasarkan aspek keamanan, biaya, dan waktu. Proses dimulai dari pengumpulan data dan analisis *safety factor*, dilanjutkan dengan penerapan metode *geomat*, *shotcrete*, atau *cocomesh* bila lereng tidak aman. Setelah lereng stabil, dilakukan analisis biaya dan waktu sebelum penarikan kesimpulan akhir.

#### 4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

##### 4.1. Geoteknik Tanah Galian

Parameter input dalam analisis stabilitas lereng untuk mencari nilai *safety factor* dengan *plaxis* ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Input Parameter Tanah pada *Plaxis*

Parameter	Nama	Clay (0–6 m)	Clay Silt (6–15 m)	Silty Clay (15–21 m)	Batu Pasir (21–26 m)	Napal (26–28 m)	Batu Pasir (28–31 m)
<i>Material Model</i>	<i>Model</i>	<i>Mohr Coulomb</i>					
<i>Type of material behavior</i>	<i>Type</i>	<i>Undrained</i>			<i>Drained</i>		
<i>Soil unit weight apl</i>	$\gamma$ unsat	12	13	13	21	14	21
<i>Soil unit weight bpl</i>	$\gamma$ sat	16	17	16	22	15	22
<i>Permeability in hor. Direction</i>	Kx	$1 \times 10^{-6}$			$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$
<i>Permeability in ver. Direction</i>	Ky	$1 \times 10^{-6}$			$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$
<i>Modulus Elastisitas</i>	E ref	4000	6000	10000	8000	13000	
<i>Poisson ratio</i>	$\nu$ (nu)	0.3			0.33	0.35	0.33

<i>Cohesion (constant)</i>	<i>c</i>	30		28	1	23	1
<i>Friction angle</i>	$\varphi$	23	24	23	33	25	35
<i>Dilatancy angle</i>	$\psi$				0		

Berdasarkan Tabel 1, tiap jenis tanah memiliki karakteristik yang memengaruhi stabilitas lereng. Batu pasir memiliki berat isi jenuh tertinggi 22 kN/m<sup>3</sup> dan sudut geser dalam 35°, menunjukkan ketahanan geser tinggi, sedangkan clay memiliki kohesi tertinggi 30 kN/m<sup>2</sup>. Nilai modulus elastisitas tertinggi pada batu pasir dan napal menandakan material lebih kaku, sehingga parameter ini digunakan sebagai dasar analisis stabilitas lereng dengan Plaxis.

#### 4.2. Stabilitas Lereng Eksisting

Lereng galian disimulasikan tanpa adanya perkuatan terlebih dahulu. Hal ini dilakukan untuk mengetahui perilaku tanah tanpa adanya sistem perkuatan lereng. Kondisi eksisting lereng memiliki rincian sebagai berikut, Tinggi lereng: 30 meter, Panjang Lereng: 700 meter, Sudut kemiringan: 35°.

#### 4.3. Stabilitas Lereng Perkuatan Shotcrete

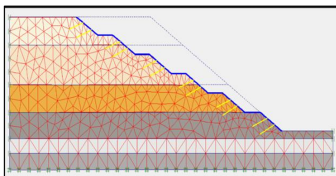
Analisis stabilitas lereng perkuatan shotcrete dilakukan dengan input parameter ke dalam plaxis seperti tampak pada Tabel 2.

Tabel 2. Input Parameter ST Shotcrete

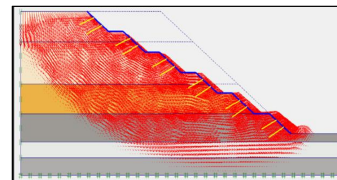
Properties	Nilai
EA (Axial Stiffness)	20000 kN/m
EI (Kekuatan Lentur)	1666,67 kN/m <sup>2</sup>
W	24 kN/m/m
$\nu$	0,2

Berdasarkan Tabel 2, parameter input *shotcrete* terdiri dari kekakuan aksial (EA) 20000 kN/m dan kekuatan lentur (EI) 1666,67 kN/m<sup>2</sup> yang menunjukkan kemampuan material menahan beban dan lenturan pada lereng. Nilai beban per satuan panjang (W) 24 kN/m/m dan rasio Poisson ( $\nu$ ) 0,2 menggambarkan perilaku elastis *shotcrete* dalam analisis stabilitas lereng.

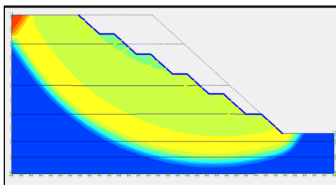
#### 1. Skenario Jangka Pendek



Gambar 4. Deformed Mesh ST (shotcrete)



Gambar 5. Arah Displacement ST (shotcrete)



Gambar 6. Area Displacement ST (shotcrete)

Informasi tambahan		Informasi langkah	
Informasi langkah	Langkah	104 dari 104	Faktor elastisitas
Langkah Plastis	Langkah Plastis		Kekakuan relatif
			0.000
Pengali			
Pengendalian tertentu	Misip	0.000	Faktor pengali total
Sistem beban A	MisadA	0.000	Z-Misip
Sistem beban B	MisadB	0.000	Z-MisadA
Berat tanah	Misagr	0.000	Z-MisadB
Percepatan	Misacc	0.000	Z-Misagr
Faktor reduksi kekuatan	Misfr	0.000	Z-Misacc
Waktu	Miswakt	0.000	Z-Misfr
Waktu dinamis	MiswaktD	0.000	Z-Miswakt
	MiswaktD	0.000	Z-MiswaktD

Gambar 7. Angka Keamanan ST (shotcrete)

Gambar 4 hingga Gambar 7 menunjukkan hasil analisis lereng dengan perkuatan *shotcrete*. Gambar 4 menampilkan deformasi lereng, Gambar 5 arah pergerakan tanah, dan Gambar 6 area pergeseran berdasarkan gradasi warna. Gambar 7 menunjukkan nilai *safety factor* di atas 1,5 yang menandakan kondisi lereng aman.

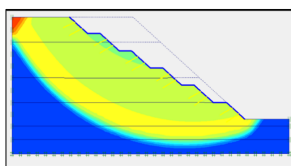
#### 2. Skenario Jangka Panjang

Analisis stabilitas lereng perkuatan *shotcrete* jangka panjang dilakukan dengan input parameter ke dalam plaxis seperti tampak pada Tabel 3.

Tabel 3. Input Parameter ST *Shotcrete*

Properties	Nilai
C (Kohesi)	13 kN/m <sup>2</sup>
Φ (Friction Angle)	12°

Tabel 3 menunjukkan parameter input *shotcrete* untuk analisis jangka panjang, yaitu kohesi sebesar  $c = 13 \text{ kN/m}^2$  dan sudut geser dalam sebesar  $\Phi = 12^\circ$ , yang menggambarkan kekuatan geser material terhadap gaya luar. Nilai parameter ini digunakan untuk memodelkan kondisi lereng dalam jangka panjang, di mana penurunan kohesi dan sudut geser mencerminkan pengaruh pelapukan serta perubahan sifat mekanik material seiring waktu.



Gambar 8. Deformed Mesh LT (*shotcrete*)

Informasi tambahan   Informasi lengkap		
Selama langkah	102 dari 102	Faktor elastisitas
Langkah Plaxis		Kekakuan relatif
		1,000
		0,000
Perigati		
	Peringatan faktor pengali	Faktor pengali total
Peringatan terburuk	Muati	0,000
Sistem beban A	Muadi	0,000
Sistem beban B	Muadi	0,000
Sistem beban C	Muadi	0,000
Sistem beban D	Muadi	0,000
Sistem beban E	Muadi	0,000
Peringatan	Muadi	0,000
Faktor reduksi beban	Muadi	0,000
Waktu	Peringatan	0,000
Waktu dinamis	Peringatan	0,000
		Waktu aktif
		0,000

Gambar 9. Angka Keamanan LT (*shotcrete*)

Gambar 8 menunjukkan deformasi lereng setelah analisis jangka panjang (*Deformed Mesh LT*), sedangkan Gambar 9 menampilkan nilai faktor keamanan lebih dari 1,5, menandakan bahwa lereng dengan perkuatan *shotcrete* tetap stabil dalam jangka panjang dan efektif meminimalkan pergerakan tanah.

#### 4.4. Stabilitas Lereng Perkuatan Geomat

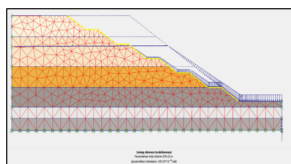
Analisis stabilitas lereng perkuatan geomat dilakukan dengan input parameter ke dalam plaxis seperti tampak pada Tabel 4.

Tabel 4. Input Parameter ST *Geomat*

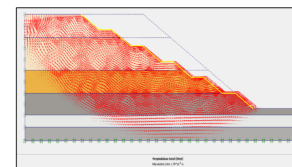
Properties	Nilai
EA ( <i>Axial Stiffness</i> )	38,1 kN
EI ( <i>Kekuatan Lentur</i> )	1,776 kN/m

Tabel 4 menunjukkan parameter input *geomat* yang digunakan dalam analisis stabilitas lereng. Nilai kekakuan aksial (EA) sebesar 38,1 kN dan kekuatan lentur (EI) sebesar 1,776 kN/m menggambarkan kemampuan material *geomat* dalam menahan gaya tarik dan lentur yang bekerja pada permukaan lereng, sehingga berperan penting dalam meningkatkan kestabilan dan mengurangi potensi deformasi tanah.

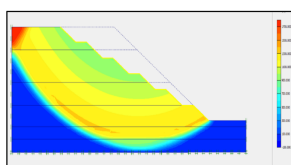
##### 1. Skenario Jangka Pendek



Gambar 10. Deformed Mesh ST (*geomat*)



Gambar 11. Arah Displacement ST (*geomat*)



Gambar 12. Area Displacement ST (*geomat*)

Informasi tambahan   Informasi lengkap		
Selama langkah	103 dari 103	Faktor elastisitas
Langkah Plaxis		Kekakuan relatif
		1,000
		0,000
Perigati		
	Peringatan faktor pengali	Faktor pengali total
Peringatan terburuk	Muadi	0,000
Sistem beban A	Muadi	0,000
Sistem beban B	Muadi	0,000
Sistem beban C	Muadi	0,000
Sistem beban D	Muadi	0,000
Sistem beban E	Muadi	0,000
Peringatan	Muadi	0,000
Faktor reduksi beban	Muadi	0,000
Waktu	Peringatan	0,000
Waktu dinamis	Peringatan	0,000
		Waktu aktif
		0,000

Gambar 13. Angka Keamanan ST (*geomat*)

Gambar 10 menunjukkan deformasi lereng setelah perkuatan *geomat*, sedangkan Gambar 11 memperlihatkan arah perpindahan massa tanah. Gambar 12 menggambarkan area distribusi deformasi lereng, dan Gambar 13 menampilkan nilai faktor keamanan (*safety factor*) yang menunjukkan lereng berada dalam kondisi stabil setelah diperkuat dengan *geomat*.

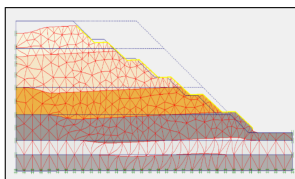
## 2. Skenario Jangka Panjang

Analisis stabilitas lereng perkuatan *geomat* jangka panjang dilakukan dengan input parameter ke dalam plaxis seperti tampak pada Tabel 5.

Tabel 5. Input Parameter LT *Geomat*

Properties	Nilai
C (Kohesi)	14 kN/m <sup>2</sup>
$\Phi$ (Friction Angle)	12°

Tabel 5 menampilkan parameter input *geomat* untuk analisis jangka panjang, yaitu kohesi sebesar 14 kN/m<sup>2</sup> dan sudut geser dalam ( $\Phi$ ) sebesar 12°, yang merepresentasikan kekuatan geser material terhadap gaya luar.



Gambar 14. *Deformed Mesh LT (geomat)*

Gambar 15. Angka Keamanan LT (*geomat*)

Gambar 14 memperlihatkan hasil deformasi lereng (*Deformed Mesh*) setelah perkuatan dengan *geomat*, sedangkan Gambar 15 menunjukkan nilai faktor keamanan (*safety factor*) lebih dari 1,4, menandakan kondisi lereng cenderung stabil namun masih berada dekat ambang batas aman.

## 4.5. Stabilitas Lereng Perkuatan *Cocomesh*

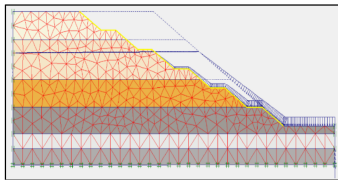
Analisis stabilitas lereng perkuatan *cocomesh* dilakukan dengan input parameter ke dalam plaxis seperti tampak pada Tabel 6.

Tabel 6. Input Parameter *Cocomesh*

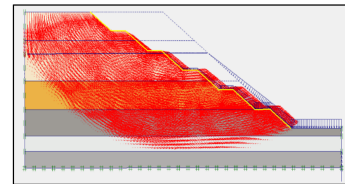
Properties	Nilai
EA ( <i>Axial Stiffness</i> )	23,05 kN
EI (Kekuatan Lentur)	11,77 kN/m

Tabel 6 menampilkan parameter input *cocomesh* dengan kekakuan aksial (EA) sebesar 23,05 kN dan kekuatan lentur (EI) sebesar 11,77 kN/m, yang menggambarkan kemampuan material dalam menahan gaya tarik dan lentur pada permukaan lereng.

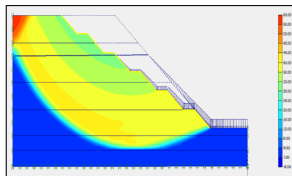
## 1. Skenario Jangka Pendek



Gambar 16. Deformed Mesh ST (cocomesh)



Gambar 17. Arah Displacement ST (cocomesh)



Gambar 18. Area Displacement ST (cocomesh)



Gambar 19. Angka Keamanan ST (cocomesh)

Gambar 16 menunjukkan deformasi lereng setelah perkuatan *cocomesh*, Gambar 17 memperlihatkan arah pergeseran tanah, Gambar 18 menampilkan distribusi area perpindahan, sedangkan Gambar 19 memperlihatkan nilai faktor keamanan lebih dari 1,5 yang menandakan lereng berada dalam kondisi stabil pada skenario jangka pendek.

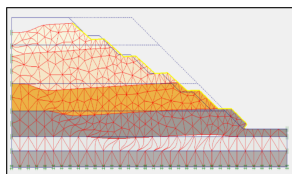
## 2. Skenario Jangka Panjang

Analisis stabilitas lereng perkuatan *cocomesh* jangka panjang dilakukan dengan input parameter ke dalam plaxis seperti tampak pada Tabel 7.

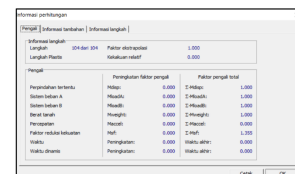
Tabel 7. Input Parameter LT *Cocomesh*

Properties	Nilai
C (Kohesi)	15 kN/m <sup>2</sup>
Φ (Friction Angle)	14°

Tabel 7 menunjukkan parameter input *cocomesh* untuk analisis jangka panjang, dengan kohesi (*c*) sebesar 15 kN/m<sup>2</sup> dan sudut geser dalam (Φ) sebesar 14°. Nilai ini mencerminkan kemampuan material *cocomesh* dalam meningkatkan kekuatan geser tanah dan menjaga kestabilan lereng terhadap gaya eksternal dalam periode waktu yang lebih lama.



Gambar 20. Deformed Mesh LT (cocomesh)



Gambar 21. Angka Keamanan LT (cocomesh)

Gambar 20 menunjukkan deformasi lereng yang kecil setelah perkuatan *cocomesh*, menandakan peningkatan kestabilan. Gambar 21 memperlihatkan nilai *safety factor* di atas 1,3, menunjukkan lereng stabil namun tetap perlu perhatian jangka panjang.

## 4.6. Pembahasan

### 1. Perbandingan Faktor Keamanan

Faktor keamanan atau safety factor (SF) adalah ukuran yang digunakan untuk menilai stabilitas lereng dengan membandingkan kekuatan tanah terhadap gaya-gaya yang berpotensi menyebabkan kelongsoran. Perbandingan FK ditunjukkan oleh Tabel 8.

Tabel 8. Perbandingan Faktor Keamanan/SF

No	Perkuatan Lereng	Batas Aman	Jangka Pendek ( <i>Short Term</i> )			Jangka Panjang ( <i>Long Term</i> )		
			SF	Keterangan	Kenaikan Nilai SF	SF	Keterangan	Kenaikan Nilai SF
1	Tanpa Perkuatan	1,5	1,226	Kritis & Runtuh	-	-	-	-
2	<i>Shotcrete</i>	1,5	1,649	Aman	34,50%	1,514	Aman	23,49%
3	<i>Geomat</i>	1,5	1,544	Aman	25,94%	1,418	Kritis & Runtuh	15,66%
4	<i>Cocomesh</i>	1,5	1,540	Aman	25,61%	1,355	Kritis & Runtuh	10,52%

Berdasarkan Tabel 8, lereng tanpa perkuatan memiliki SF 1,226 yang tergolong kritis. Setelah diperkuat, *shotcrete* mencapai SF 1,649 (jangka pendek) dan 1,514 (jangka panjang) dengan kondisi aman, sedangkan *geomat* dan *cocomesh* hanya 1,418 dan 1,355, masih kritis. Keunggulan *shotcrete* terletak pada perlindungan mekanis langsung, sementara dua metode lainnya bergantung pada vegetasi.

## 2. Aspek Biaya

Tabel 9 menunjukkan bahwa metode *shotcrete* memiliki biaya tertinggi Rp 4.331.068.697,23, dibanding *geomat* Rp 2.734.025.024,50 dan *cocomesh* Rp 906.745.000,00, sehingga menjadi metode perkuatan paling mahal.

Tabel 9. Perbandingan Biaya Perkuatan Lereng

No	Perkuatan	Jumlah	Unit	Harga Satuan	Biaya Total
1	<i>Geomat</i>	3500	m <sup>2</sup>	Rp781.150,01	<b>Rp 2.734.025.024,50</b>
2	<i>Cocomesh Hydroseeding</i>	3500	m <sup>2</sup>	Rp259.070,00	<b>Rp 906.745.000,00</b>
3	<i>Shotcrete</i>				
	a. <i>Wiremesh</i>	3500	m <sup>2</sup>	Rp89.763,00	Rp314.170.500,00
	b. <i>Anchor</i>	14000	m	Rp150.873,00	Rp2.112.222.000,00
	c. <i>Weep pipe</i>	3500	bh	Rp167.354,00	Rp585.739.000,00
	d. <i>Shotcrete</i> 100mm	3500	m <sup>2</sup>	Rp376.839,20	Rp1.318.937.197,23
<b>Jumlah biaya shotcrete</b>					<b>Rp4.331.068.697,23</b>

Tabel 9 menunjukkan bahwa metode *shotcrete* memiliki biaya tertinggi sebesar Rp 4.331.068.697,23, diikuti *geomat* Rp 2.734.025.024,50 dan *cocomesh* Rp 906.745.000,00. Meskipun *shotcrete* paling efektif secara teknis, biayanya juga paling besar.

## 3. Aspek Waktu pelaksanaan

Waktu pelaksanaan berpengaruh terhadap efisiensi proyek. Berdasarkan Tabel 10, metode *shotcrete* memerlukan waktu paling lama yaitu 30 hari, sedangkan *geomat* 20 hari dan *cocomesh* 16 hari. Pekerjaan terlama pada *shotcrete* adalah pemasangan angkur selama 19 hari, menunjukkan bahwa meskipun efektif secara teknis, metode ini memerlukan waktu pelaksanaan lebih panjang dibanding lainnya.



## 8. DEKLARASI

### 8.1. Tentang Penulis

Ikhsan Fabyanto (IF)  <https://orcid.org/0009-0007-5562-8136>

Muhammad Zaki (MZ)  <https://orcid.org/0000-0002-5746-2359>

Darmawan Pontan (DP)  <https://orcid.org/0000-0001-7875-6105>

Tulus Widiarso (TW)  <https://orcid.org/0009-0002-6345-3608>

### 8.2. Kontribusi Penulis

Konseptualisasi: IF; Metodologi: MZ; Perangkat Lunak: DP; Validasi: TW dan IF; Analisis Formal: MZ dan DP; Investigasi: TW; Sumber Daya: IF; Kurasi Data: MZ; Penulisan Draf Asli Persiapan: DP dan TW; Penulisan Tinjauan dan Penyuntingan: IF dan MZ; Visualisasi: DP; Semua penulis, TW, IF, MZ dan DP, telah membaca dan menyetujui versi naskah yang diterbitkan.

### 8.3. Pernyataan Ketersediaan Data

Data yang disajikan dalam studi ini tersedia atas permintaan dari penulis terkait.

### 8.4. Pendanaan

Penulis tidak menerima dukungan finansial untuk penelitian, kepenulisan, dan/atau penerbitan artikel ini.

### 8.5. Deklarasi Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan bahwa mereka tidak memiliki konflik kepentingan, konflik kepentingan finansial yang diketahui, atau hubungan pribadi yang dapat memengaruhi pekerjaan yang dilaporkan dalam makalah ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. P. D. Sari and D. Dharmawansyah, "Evaluasi penggunaan vegetasi dengan media tanam cocomesih untuk stabilitas lereng pada area tebing saluran irigasi di bintang bano sumbawa barat," *Jurnal Tambora*, vol. 7, no. 1, pp. 276–281, 2023.
- [2] D. R. Morgan and M. Jolin, *Shotcrete: materials, performance and use*. CRC Press, 2022.
- [3] H. Ruanda, M. Cakrawala, and C. Aditya, "Analisis perbandingan biaya dan waktu metode konvensional dan pracetak: Studi kasus: Cluster villa puncak landung sari malang," *BOUWPLANK Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 5, no. 1, pp. 30–39, 2025.
- [4] P. H. P. Tan, M. Tukiran, and D. Wuisan, "Innovation practices and external support for msme performance and survival in indonesia," *International Journal of Cyber and IT Service Management*, vol. 5, no. 2, pp. 120–133, 2025.
- [5] B. Göküz and İ. Akiner, "Investigating key factors influencing the success of construction projects at international level," *Discover Civil Engineering*, vol. 2, no. 1, p. 30, 2025.
- [6] D. P. Tegarden, B. Samuel, R. Lukyanenko, A. Dennis, and B. H. Wixom, *Systems Analysis and Design, with EEPUB Access: An Object-Oriented Approach with UML*. John Wiley & Sons, 2025.
- [7] R. Supriati, S. A. Anjani, R. W. Anugrah, R. McCarthy *et al.*, "Enhancing network security with quantum cryptography: A study on future-proofing computer networks against quantum attacks," *Journal of Computer Science and Technology Application*, vol. 2, no. 1, pp. 24–35, 2025.
- [8] T. Hidayat, D. Manongga, Y. Nataliani, S. Wijono, S. Y. Prasetyo, E. Maria, U. Raharja, I. Sembiring *et al.*, "Performance prediction using cross validation (gridsearchcv) for stunting prevalence," in *2024 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Mechatronics Systems (AIMS)*. IEEE, 2024, pp. 1–6.
- [9] R. Damayanti, H. Setiadi, P. Laksono, and J. Triyono, "Strategi analisis swot pada pengembangan website pusat studi: Dukungan diseminasi persebaran informasi: Swot analysis and research centre website development for supporting dissemination and information spread out," *Technomedia Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 285–295, 2025.
- [10] U. Rahardja, Q. Aini, A. S. Bist, S. Maulana, and S. Millah, "Examining the interplay of technology readiness and behavioural intentions in health detection safe entry station," *JDM (Jurnal Dinamika Manajemen)*, vol. 15, no. 1, pp. 125–143, 2024.

- [11] N. R. Afifah, M. Sholeh, and I. Hanggara, "Analisis stabilitas lereng hilir spillway proyek bendungan bagong trenggalek menggunakan dinding penahan tanah tipe counterfort," *Jurnal Online Skripsi Manajemen Rekayasa Konstruksi (JOS-MRK)*, vol. 5, no. 4, pp. 42–49, 2024.
- [12] D. B. Lomi, J. K. Nasjono, and D. S. Krisnayanti, "Analisis kestabilan lereng pada inlet dan outlet dengan perkuatan shotcrete dan soil nailing (studi kasus: Bangunan pengambilan bendungan manikin)," in *JURNAL FORUM TEKNIK SIPIL (J-ForTekS)*, vol. 5, no. 1, 2025, pp. 1–12.
- [13] N. Santoso and C. A. Makarim, "Analisis dinding penahan tanah pemikul beban vertikal dan horizontal di atas tanah sangat lunak," *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, pp. 99–112, 2022.
- [14] T. K. Win and N. I. M. Pauzi, "Investigation of the optimum shotcrete mixing ratio for slope protection using fly ash," in *MATEC Web of Conferences*, vol. 384. EDP Sciences, 2023, p. 02004.
- [15] B. Yuan, Z. Li, W. Chen, J. Zhao, J. Lv, J. Song, and X. Cao, "Influence of groundwater depth on pile–soil mechanical properties and fractal characteristics under cyclic loading," *Fractal and Fractional*, vol. 6, no. 4, p. 198, 2022.
- [16] H. E. Sari, B. Tumanggor, and D. Efron, "Improving educational outcomes through adaptive learning systems using ai," *International Transactions on Artificial Intelligence*, vol. 3, no. 1, pp. 21–31, 2024.
- [17] B. A. Tulung, A. N. Sarajar, and J. E. Sumampouw, "Analisis pengaruh penambahan campuran belerang dan arang tempurung terhadap kuat geser tanah lempung ekspansif," *TEKNO*, vol. 19, no. 77, 2021.
- [18] S. A. Anjani and I. A. Mutiara, "Mengintegrasikan teknologi blockchain dalam pendidikan tinggi: Meningkatkan transparansi dan keamanan dalam kredensial akademik," *ADI Pengabdian Kepada Masyarakat*, vol. 5, no. 1, pp. 65–71, 2024.
- [19] D. P. A. P. Bujung, O. Sompie, and S. Rondonuwu, "Analisis geoteknik pada lokasi pariwisata mangatasik terhadap potensi likuifaksi," *Jurnal Teknik Sipil Terapan*, vol. 6, no. 2, pp. 78–88, 2024.
- [20] M. Z. A. Irbadhsyah, S. N. Faizah, A. K. Somantri, H. Kasyanto, A. Febriansya *et al.*, "Analisis stabilitas galian dalam dengan soldier pile pada perencanaan new pendopo tonny soewandito politeknik negeri bandung," in *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, vol. 16, no. 1, 2025, pp. 97–103.
- [21] K.-K. Phoon, "What geotechnical engineers want to know about reliability," *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, vol. 9, no. 2, p. 03123001, 2023.
- [22] G. Khanna, M. G. Ilham, T. W. Rafiuddin *et al.*, "Developing digipreneurship ecosystem in local communities to enhance digital innovation," *Startupreneur Business Digital (SABDA Journal)*, vol. 4, no. 1, pp. 55–63, 2025.
- [23] W. I. Ervianto, *Manajemen proyek konstruksi*. Penerbit Andi, 2023.
- [24] D. Bamford, P. Forrester, and I. Reid, *Essential guide to operations management: concepts and case notes*. Routledge, 2023.
- [25] S. Pricillia and R. A. Ramadhan, "Eksekusi canvas miring pada startup dalam menghadapi kompetisi," *ADI Bisnis Digital Interdisiplin Jurnal*, vol. 5, no. 1, pp. 26–33, 2024.
- [26] C. A. Siregar, F. A. S. Ashidik, and H. Garnida, "Perbandingan stabilitas lereng antara metode keseimbangan batas (lem) dan metode elemen hingga (fem)," in *Seminar Nasional Ketekniksipilan, Infrastruktur dan Industri Jasa Konstruksi (KIIJK)*, vol. 1, no. 1, 2021, pp. 335–343.
- [27] R. Abianto, R. D. Purnomoasri, and N. M. Wibisono, "Analisis stabilitas dinding penahan tanah pada lereng spillway bendungan jlantah menggunakan software plaxis," *Journal of Civil Engineering and Infrastructure Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 19–26, 2025.
- [28] A. Rachmawati *et al.*, "Analysis of machine learning systems for cyber physical systems," *International Transactions on Education Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9, 2022.
- [29] A. Valerry, L. Pasha, and T. S. Goh, "Optimasi desain visual untuk peningkatan tingkat konversi pada platform digital," *ADI Bisnis Digital Interdisiplin Jurnal*, vol. 5, no. 2, pp. 64–71, 2024.
- [30] D. P. Solin and A. Y. H. Rouf, "Analisa komparasi penurunan pondasi tiang tunggal menggunakan metode analitis dan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga pada slab on pile proyek pembangunan jalan tol," *AGREGAT*, vol. 10, no. 1, pp. 1251–1256, 2025.
- [31] B. Santoso, E. Noerhayati, and W. Warsito, "Studi alternatif perkuatan lereng pada sisi pelimpah bendungan jlantah kabupaten karanganyar," *Jurnal Rekayasa Sipil (e-journal)*, vol. 13, no. 1, pp. 344–353, 2023.
- [32] D. R. Daniswara, A. P. Hendrawan, and R. Asmaranto, "Analisa stabilitas lereng menggunakan perkuatan soil nailing pada sisi kanan pelimpah bendungan rotiklot kabupaten belu provinsi nusa tenggara timur,"

- Eternitas: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 4, no. 2, pp. 1–5, 2025.
- [33] M. D. Anggraini, M. Ningsih, Z. Arifin, and R. H. Salam, “Pemberdayaan masyarakat dan penanaman tanaman tahunan di lahan miring sebagai upaya mitigasi bencana longsor di desa guntur macan kabupaten lombok barat,” *Bhakti: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, vol. 2, no. 1, pp. 29–38, 2025.
- [34] T. R. Widyaningrum, A. K. Catur, A. T. Ayu, and J. Ziyi, “Pendampingan pencatatan transaksi keuangan pada kios bunga mekar kasih banyuwangi,” *ADI Pengabdian Kepada Masyarakat*, vol. 3, no. 2, pp. 114–120, 2023.
- [35] F. Alfiana, N. Khofifah, T. Ramadhan, N. Septiani, W. Wahyuningsih, N. N. Azizah, and N. Ramadhona, “Apply the search engine optimization (seo) method to determine website ranking on search engines,” *International Journal of Cyber and IT Service Management*, vol. 3, no. 1, pp. 65–73, 2023.
- [36] Q. Aini, D. Manongga, U. Rahardja, I. Sembiring, and Y.-M. Li, “Understanding behavioral intention to use of air quality monitoring solutions with emphasis on technology readiness,” *International Journal of Human–Computer Interaction*, pp. 1–21, 2024.
- [37] A. Y. Paembonan, A. S. Sigalingging, P. P. Andika, S. M. Irawati, E. Y. Nathania, and M. R. Jaya, “C-ria: Perangkat lunak inversi dan analisis data resistivitas berbasis cloud,” *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, vol. 10, no. 1, pp. 65–77, 2024.
- [38] A. Pambudi, N. Lutfiani, M. Hardini, A. R. A. Zahra, and U. Rahardja, “The digital revolution of startup matchmaking: Ai and computer science synergies,” in *2023 Eighth International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*. IEEE, 2023, pp. 1–6.
- [39] U. Rahardja, M. L. Daeli, S. A. Anjani, L. Pasha, A. Asri, and H. Zainarhu, “Enhancing trust and efficiency in e-commerce transactions through blockchain ai synergy,” *ADI Journal on Recent Innovation*, vol. 7, no. 1, pp. 25–37, 2025.
- [40] A. Nuche, E. T. Persada, P. A. Sunarya, and R. S. Pamungkas, “Meningkatkan kinerja umkm melalui strategi digital dan kemampuan pemasaran terpadu,” *ADI Bisnis Digital Interdisiplin Jurnal*, vol. 5, no. 2, pp. 9–16, 2024.
- [41] B. Tiara, J. Suwita, T. Nurhaeni, A. Asmawati, D. Apriliasari, S. A. Anjani *et al.*, “Blockchain trust and risk perception influencing millennial cryptocurrency investment decisions,” in *2025 4th International Conference on Creative Communication and Innovative Technology (ICCIT)*. IEEE, 2025, pp. 1–7.
- [42] C. S. Bangun, H. Hetilaniar, A. Faturahman, S. Jackson, S. A. Anjani, E. A. Natasya *et al.*, “Analyzing opportunities and challenges of artificial intelligence integration in indonesian innovation and education,” in *2025 4th International Conference on Creative Communication and Innovative Technology (ICCIT)*. IEEE, 2025, pp. 1–7.
- [43] R. Lesmana, I. Wijaya, E. A. Nabila, H. Agustian, S. Audiah, and A. Faturahman, “Enhancing market trend analysis through ai forecasting models,” *International Journal of Cyber and IT Service Management*, vol. 4, no. 2, pp. 105–113, 2024.
- [44] M. D. Cahyono, M. Sholeh, and M. Zenurianto, “Analisis stabilitas lereng spillway sisi kiri bendungan bagong sta 0+ 225,” *Jurnal Online Skripsi Manajemen Rekayasa Konstruksi (JOS-MRK)*, vol. 4, no. 3, pp. 244–250, 2023.
- [45] S. P. Putra, A. Rochim, and Sumirin, “Studi metode perkuatan lereng menggunakan geomat, shotcrete, dan soil nailing: Studi kasus lereng spillway bendungan sadarwana paket ii subang,” *Wahana Teknik Sipil*, vol. 28, no. 1, pp. 65–77, 2023. [Online]. Available: <https://jurnal.polines.ac.id/index.php/wahana/article/view/4562>
- [46] A. Manawar, C. Lukita, and L. Meria, “The evolution of financial technology in indonesia,” *Startupreneur Business Digital (SABDA Journal)*, vol. 2, no. 2, pp. 192–206, 2023.