



## Kestabilan Lereng Pada Pekerjaan Timbunan *Waterpond* Di Proyek PLTP Tawa Songa Wayau Halmahera Selatan

Tessi V. Matheos<sup>#a</sup>, Alva. N. Sarajar<sup>#b</sup>, Roski R. I. Legrans<sup>#c</sup>

<sup>#a</sup>Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia  
<sup>#b</sup>tessimatheos021@student.unsrat.ac.id, <sup>#c</sup>alva.sarajar@unsrat.ac.id, <sup>#c</sup>legransroski@unsrat.ac.id

### Abstrak

Proyek PLTP Tawa Songa Wayau di Halmahera Selatan berada pada kawasan dengan kondisi geoteknik kompleks akibat formasi vulkanik aktif dan topografi perbukitan, sehingga evaluasi kestabilan lereng pada pekerjaan timbunan waterpond menjadi aspek krusial dalam menjamin keamanan konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis Faktor Keamanan (FK) lereng pasca konstruksi, menilai pengaruh rembesan air terhadap stabilitas dan deformasi, serta merumuskan rekomendasi perkuatan sesuai kriteria SNI 8460:2017. Metode yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif melalui analisis numerik terintegrasi, yaitu GeoStudio (metode Bishop dan Morgenstern-Price) untuk analisis keseimbangan batas, serta Plaxis (metode elemen hingga) untuk analisis deformasi. Data tanah diperoleh dari hasil uji SPT dan pengujian laboratorium pada titik bor BH12 dan BH13. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada kondisi jangka pendek (undrained), lereng memiliki FK sebesar 1,619–2,967, memenuhi syarat aman  $FK \geq 1,5$ . Namun pada kondisi jangka panjang (drained) dengan muka air penuh, FK menurun menjadi 0,965–1,338, dan pada kondisi gempa ( $k_h = 0,24$ ) turun lebih lanjut menjadi 0,610–0,872, yang mengindikasikan ketidakstabilan lereng ( $FK < 1,5$ ). Rembesan air dari waterpond meningkatkan deformasi, dengan total displacement maksimum 0,1424 m pada titik H2. Pada kondisi rapid drawdown, FK berada pada rentang 1,509–1,578, masih memenuhi batas aman  $FK \geq 1,3$ . Penerapan perkuatan kombinasi gabion dan geogrid Miragrid GX 400/50 terbukti efektif meningkatkan stabilitas lereng, dengan FK statis mencapai 2,105–2,332 dan FK gempa mencapai 1,209–1,411. Evaluasi stabilitas internal menunjukkan bahwa tahanan putus dan tahanan cabut geogrid memenuhi persyaratan dengan  $FK > 20$ , sementara stabilitas eksternal terhadap guling, geser, dan daya dukung tanah juga memenuhi ketentuan SNI. Perbandingan hasil GeoStudio dan PLAXIS menunjukkan variasi nilai FK akibat perbedaan pendekatan analisis (LEM vs FEM), namun keduanya konsisten menyimpulkan bahwa perkuatan gabion-geogrid secara signifikan meningkatkan kestabilan lereng.

*Kata kunci: PLTP Tawa Songa Wayau, stabilitas lereng, timbunan waterpond, rembesan, geogrid, gabion, faktor keamanan*

### 1. Pendahuluan

Proyek Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Tawa Songa Wayau di Pulau Bacan, Kabupaten Halmahera Selatan, merupakan salah satu proyek strategis nasional dengan kapasitas terencana 10 MW dan target operasi komersial tahun 2030 sebagai pengganti pembangkit diesel pada Sistem Bacan. Wilayah prospek panas bumi ini dikontrol oleh beberapa struktur sesar aktif—antara lain Sesar Tawa, Sesar Banda-Hatuasa, Sesar Sibela, dan Sesar Bukit Bibino—yang berperan sebagai jalur migrasi fluida panas bumi pada kedalaman 0–500 meter. Kondisi tektonik aktif tersebut menjadikan kawasan ini memiliki tingkat kerentanan geologi dan geoteknik yang tinggi, sehingga setiap infrastruktur pendukung, termasuk waterpond, memerlukan perencanaan teknis yang cermat.

Pembangunan waterpond pada lingkungan perbukitan vulkanik seperti Pulau Bacan membutuhkan pekerjaan timbunan pada lereng alamiah yang secara signifikan mengubah kondisi

geostatik lereng. Penambahan beban dari material timbunan meningkatkan tegangan geser dalam massa tanah, sementara parameter kuat geser tanah dasar—yang pada Titik Bor 12 dan 13 menunjukkan variasi nilai N-SPT 26–59—menentukan kemampuan lereng dalam menahan beban tersebut. Variasi ini mencerminkan karakteristik khas tanah vulkanik dengan struktur butiran angular dan ikatan semen akibat pelapukan batuan vulkanik, yang sering kali menyebabkan perilaku mekanik tanah menjadi tidak seragam.

Dengan kompleksitas tersebut, diperlukan pendekatan analisis yang lebih komprehensif melalui kombinasi metode keseimbangan batas (Limit Equilibrium Method) dan metode elemen hingga (Finite Element Method). Analisis kestabilan lereng menggunakan metode Bishop dan Morgenstern–Price melalui GeoStudio memberikan evaluasi terhadap keseimbangan gaya dan momen, sedangkan analisis deformasi dan distribusi tegangan menggunakan PLAXIS memberikan gambaran perilaku lereng akibat pembebanan, rembesan air, serta perubahan kondisi geometri.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan lereng pada area galian dan timbunan waterpond, termasuk pengaruh rembesan air pada kondisi muka air konstan maupun rapid drawdown, serta mengevaluasi deformasi lereng sebagai dasar perumusan rekomendasi teknis berupa desain perkuatan lereng. Fokus utama diarahkan pada upaya penambahan dan penguatan struktur pendukung, sehingga stabilitas lereng dapat ditingkatkan dan keberhasilan konstruksi serta keamanan lingkungan proyek dapat terjamin.

## 2. Metodologi Penelitian

### 2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif yang berfokus pada analisis kestabilan lereng galian dan timbunan pada area waterpond dalam pembangunan infrastruktur PLTP Tawa Songa. Tujuan utama penelitian adalah mengevaluasi tingkat kestabilan lereng terhadap berbagai kondisi pembebanan dengan mengkaji pengaruh rembesan air, kinerja dinding penahan tanah, serta stabilitas global lereng agar memenuhi standar geoteknik yang berlaku.

Data yang digunakan merupakan data sekunder dari proyek PLTP Tawa Songa, meliputi hasil penyelidikan tanah, data geometri lereng, serta parameter kuat geser tanah. Pendekatan analisis dilakukan melalui kombinasi metode empiris dan analisis numerik, sehingga mampu memberikan gambaran perilaku lereng yang lebih komprehensif. Analisis numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak geoteknik untuk mengevaluasi faktor keamanan, pola rembesan, dan deformasi lereng secara lebih akurat.

### 2.2 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari PT Intimkara melalui kegiatan penyelidikan tanah di area PLTP Tawa Songa, Halmahera Selatan. Data tersebut terdiri atas hasil Standard Penetration Test (SPT) dan uji laboratorium.

Data SPT digunakan untuk mengidentifikasi lapisan tanah, menentukan kondisi stratigrafi, serta menilai tingkat kepadatan tanah pada lokasi penelitian. Sementara itu, data uji laboratorium digunakan untuk memperoleh parameter geoteknik tanah, yaitu berat isi ( $\gamma$ ), kohesi ( $c$ ), dan sudut geser dalam ( $\phi$ ). Parameter-parameter ini merupakan input utama dalam analisis kestabilan lereng.

Seluruh data tersebut kemudian digunakan dalam proses analisis menggunakan perangkat lunak GeoStudio (metode Bishop Simplified dan Morgenstern–Price) serta PLAXIS untuk mengevaluasi stabilitas lereng baik sebelum maupun sesudah penerapan perkuatan. Dengan demikian, data sekunder yang diperoleh memberikan dasar teknis yang memadai untuk menilai kondisi lereng secara menyeluruh dan mendukung perumusan rekomendasi perkuatan yang tepat.

#### 2.2.1 Parameter Tanah

Pemodelan tanah pada penelitian ini menggunakan kriteria keruntuhan Mohr–Coulomb, yang menyatakan bahwa kekuatan tanah dikontrol oleh parameter geser tanah, yaitu kohesi ( $c$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ). Parameter-parameter tersebut diperoleh dari hasil uji laboratorium

terhadap sampel tanah yang diambil pada lokasi penelitian.

Analisis dilakukan dalam dua kondisi, yaitu undrained dan drained, untuk merepresentasikan perilaku tanah pada kondisi jangka pendek (short-term) dan jangka panjang (long-term). Pendekatan ini penting karena perubahan tekanan pori dan kondisi rembesan air sangat memengaruhi stabilitas lereng, terutama pada area timbunan waterpond.

Data tanah yang diperoleh kemudian digunakan sebagai input utama dalam analisis kestabilan lereng dengan dua pendekatan, yaitu:

- Limit Equilibrium Method (LEM) menggunakan metode Bishop Simplified dan Morgenstern–Price melalui perangkat lunak GeoStudio, untuk mengevaluasi faktor keamanan berdasarkan keseimbangan gaya dan momen.
- Finite Element Method (FEM) menggunakan PLAXIS, untuk menganalisis deformasi, distribusi tegangan, dan pengaruh rembesan air terhadap perilaku lereng.

Parameter tanah yang digunakan dalam analisis dipisahkan yakni data tanah timbunan dan data tanah berdasarkan hasil uji laboratorium terhadap contoh tanah yang diperoleh melalui uji boring.

**Tabel 1.** Parameter Tanah Timbunan Pilihan

HASIL	Kedalaman	Jenis Tanah	$\gamma$	$\gamma_{sat}$	$c'$	Cu	$\phi$	w	Gs	e	Es
	(m)		(g/cm <sup>3</sup> )	(Kn/m <sup>3</sup> )	(Kn/m <sup>3</sup> )	(Kn/m <sup>3</sup> )	(Kn/m <sup>3</sup> )				
Lab Dan Buku Pedoman Geoteknik	H1 Dan L2 = 9,5 m	Pasir	20	20,5	5	50	30	0,21	2,72	0,585	35000
	H2 = 12,5 m										

**Tabel 2.** Parameter Tanah Timbunan Pilihan untuk Analisis Rembesan

Kedalaman	Jenis Tanah	D10	D60	LL	n	k
(m)				%		m/det
H1 Dan L2 = 9,5 m	Pasir	0,100	1,2383	21,27	0,369	0,00008
H2 = 12,5 m						

**Tabel 3.** Parameter Tanah pada Titik Bor BH12

Kedalaman	Jenis Tanah	$\gamma_{bulk}$		$\gamma_{sat}$	$c'$	Cu	$\phi$	w	Gs	e	Es
		(g/cm <sup>3</sup> )	(Kn/m <sup>3</sup> )	(Kn/m <sup>3</sup> )	(Kn/m <sup>3</sup> )	(Kn/m <sup>3</sup> )	(°)				
0	Tanah Berpasir Padat, Berbatu Halus. Abu-abu Coklat. Lepas.	1,73	17,3	20,7	10,59	105,9	35,84	0,177	2,63	0,466	6307,48
1											
2											
3	Tanah lempung, pasir kasar halus. Coklat merah. Lepas.	1,70	17,00	17,8	28,54	285,4	18,05	0,373	2,61	0,974	7568,98
4											
5	Tanah Berpasir, Berbatu Halus. Abu-abu Kehitaman. Lepas.	1,81	18,10	22	4,1	41	43,52	0,4352	2,66	0,333	23127,4
6											
7	Tanah Berpasir Kasar Padat. Abu-abu Kehitaman. Lepas.	1,81	18,10	22	4,1	41	43,52	0,4352	2,66	0,333	23127,4
8											
9	Tanah Berpasir Kasar, Berbatuan Halus. Hitam Kehijauan. Lepas	1,81	18,10	22	4,1	41	43,52	0,4352	2,66	0,333	23127,4
10											
11	Tanah Berpasir Kasar, Berbatuan Halus. Hitam Kehijauan. Lepas	1,81	18,10	22	4,1	41	43,52	0,4352	2,66	0,333	23127,4
12											

**Tabel 4.** Parameter Tanah pada Titik Bor BH12 untuk Analisis Rembesan

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	D10	D60	LL %	n	k m/det
0	Tanah Berpasir Padat, Berbatu Halus. Abu-abu Coklat. Lepas.	0,0350	0,6271	25,07	0,318	0,000068
1						
2						
3	Tanah lempung, pasir kasar halus. Coklat merah. Lepas.	0,0178	0,1474	50,39	0,493	0,0000011
4						
5	Tanah Berpasir, Berbatu Halus. Abu-abu Kehitaman. Lepas.	0,1786	1,2040	20,47	0,250	0,00026
6						
7	Tanah Berpasir Kasar Padat. Abu-abu Kehitaman. Lepas.	0,1786	1,2040	20,47	0,250	0,00026
8						
9	Tanah Berpasir Kasar, Berbatuan Halus. Hitam Kehijauan. Lepas.	0,1786	1,2040	20,47	0,250	0,00026
10						
11	Tanah Berpasir Kasar, Berbatuan Halus. Hitam Kehijauan. Lepas.	0,1786	1,2040	20,47	0,250	0,00026
12						

**Tabel 5.** Parameter Tanah pada Titik Bor BH13

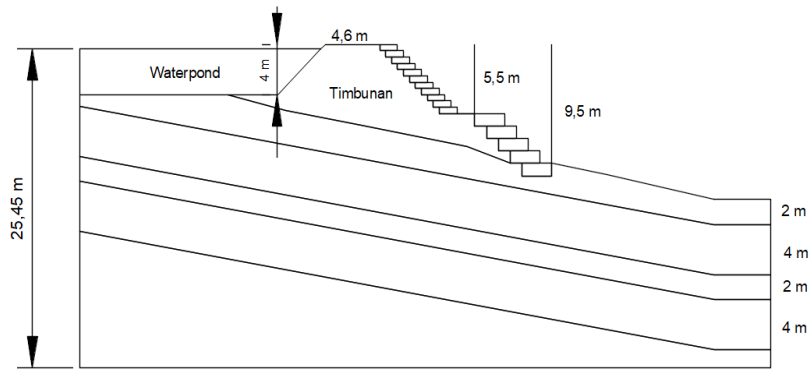
Kedalaman (m)	Jenis Tanah	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (Kn/m <sup>3</sup> )	$c'$ (Kn/m <sup>3</sup> )	Cu (Kn/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	w	Gs	e	Es
0	Tanah Lempung	18,41	18,41	14,44	144,42	38,65	-	-	0,60	12194,46
1	Padat. Coklat abu-abu.									
2	Kenyal									
3	Tanah Berpasir Bercampur Batu. hitam	1,80	18	19,2	8,02	80,20	39,63	0,27	2,63	0,706
4										
5	Tanah Berpasir Bercampur Batu. hitam	1,75	17,5	20,9	3,60	36,00	43,37	0,16	2,61	0,426
6										
7	Tanah Berpasir, Berbatuan Halus. Hitam	1,82	18,2	21,8	2,12	21,20	44,86	0,14	2,66	0,360
8										
9	Tanah Berpasir Kasar, Berbatuan Halus. Hitam	1,82	18,2	21,8	2,12	21,20	44,86	0,14	2,66	0,360
10										
11	Tanah Berpasir Kasar, Berbatuan Halus. Hitam	1,82	18,2	21,8	2,12	21,20	44,86	0,14	2,66	0,360
12										

**Tabel 6.** Parameter Tanah pada Titik Bor BH13 untuk Analisis Rembesan

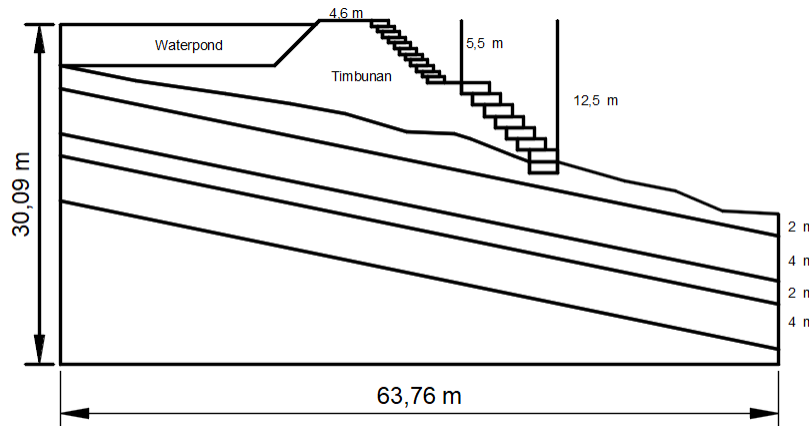
Kedalaman (m)	Jenis Tanah	D10	D60	LL %	n	k m/det
0	Jenis : Tanah Lempung Padat. Warna : Coklat abu-abu. Sifat : Kenyal.	-	-	-	0,38	0,000001
1						
2						
3	Jenis : Tanah Berpasir Bercampur Batu Warna:	0,0502	1,3277	36,58	0,4139	0,00024
4						
5	Jenis : Tanah Berpasir Bercampur Batu Warna:	0,0621	1,1364	19,55	0,299	0,00043
6						
7	Jenis : Tanah Berpasir Kasar, Berbatuan Halus	1,0079	2,8065	16,25	0,2648	0,00813
8						
9	Jenis : Tanah Berpasir Kasar, Berbatuan Halus	1,0079	2,8065	16,25	0,2648	0,00813
10						
11	Jenis : Tanah Berpasir Kasar, Berbatuan Halus	1,0079	2,8065	16,25	0,2648	0,00813
12						

### 2.2.2 Geometri Lereng

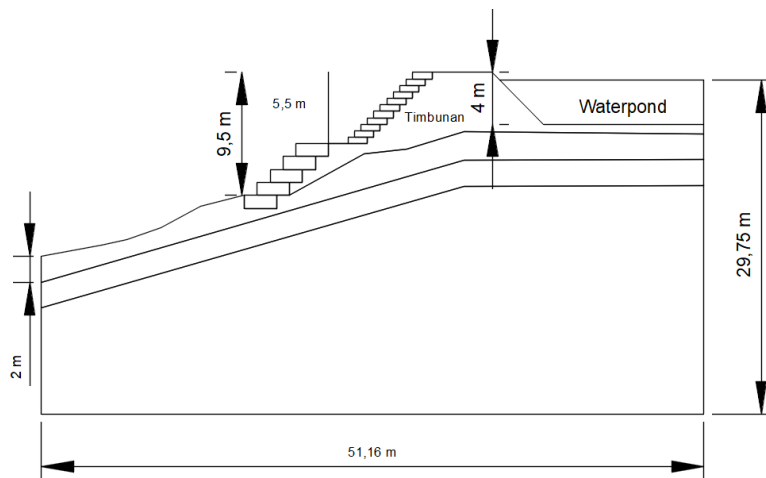
Geometri lereng yang digunakan dalam analisis merupakan konfigurasi aktual pada area pekerjaan galian dan timbunan waterpond di PLTP Tawa Songa, Halmahera Selatan. Bentuk dan kemiringan lereng dirancang sesuai rencana pemanfaatan lahan serta mempertimbangkan kondisi topografi setempat. Desain kemiringan lereng dan dimensi struktur gabion yang digunakan dalam pemodelan telah disesuaikan dengan kebutuhan stabilisasi lereng pada area proyek, sehingga mampu merepresentasikan kondisi lapangan secara akurat. Geometri ini selanjutnya dijadikan dasar dalam analisis kestabilan lereng menggunakan pendekatan Limit Equilibrium Method (LEM) dan Finite Element Method (FEM) untuk mengevaluasi faktor keamanan, pola rembesan, serta deformasi yang terjadi pada lereng.



Gambar 1. Geometri Lereng H1



Gambar 2. Geometri Lereng H2



Gambar 3. Geometri Lereng L2

2.3 Tahap Analisis

Tahap analisis dalam penelitian ini diawali dengan studi literatur mengenai mekanika tanah, stabilitas lereng, rembesan air, serta standar perencanaan geoteknik yang relevan. Selanjutnya dilakukan pengumpulan dan pengolahan data sekunder, meliputi data topografi, hasil uji SPT, hasil uji laboratorium, serta geometri waterpond. Data tersebut digunakan untuk memperoleh parameter tanah yang diperlukan dalam pemodelan, seperti berat volume tanah, kohesi, sudut geser dalam, parameter efektif dan undrained, permeabilitas, modulus elastisitas, dan angka Poisson. Selain itu, koefisien gempa ditentukan berdasarkan nilai PGA dari Puskim PUPR menggunakan koordinat lokasi penelitian.

Tahap berikutnya adalah perencanaan geometri lereng dan desain awal dinding penahan tanah gabion pada beberapa potongan lereng kritis. Stabilitas eksternal gabion dianalisis secara manual terhadap guling, geser, dan daya dukung tanah sesuai kriteria faktor keamanan yang dipersyaratkan. Setelah itu dilakukan analisis stabilitas lereng menggunakan GeoStudio dengan

metode Bishop Simplified dan Morgenstern–Price pada beberapa kondisi, yaitu jangka pendek (undrained), jangka panjang (drained), kondisi gempa, serta rapid drawdown. Apabila nilai faktor keamanan belum memenuhi syarat, dilakukan penyesuaian geometri lereng dan penambahan perkuatan geogrid.

Perkuatan geogrid dirancang berdasarkan kebutuhan kuat tarik, panjang penjangkaran, dan jarak pemasangan, kemudian dianalisis terhadap stabilitas internal berupa tahanan putus dan tahanan cabut. Desain gabion dan geogrid yang telah memenuhi persyaratan selanjutnya diverifikasi kembali menggunakan GeoStudio pada kondisi statis dan dinamis. Tahap akhir adalah analisis deformasi menggunakan PLAXIS untuk mengevaluasi total displacement, perpindahan horizontal, dan perpindahan vertikal pada beberapa tahap konstruksi. Seluruh hasil analisis yang memenuhi kriteria kemudian dirangkum menjadi desain akhir, dan penelitian ditutup dengan penyusunan kesimpulan serta rekomendasi teknis.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Stabilitas Gabion

##### 3.1.1 Momen Guling dan Geser terhadap Gabion

Analisis stabilitas eksternal terhadap momen guling dan gaya geser dilakukan pada dua konfigurasi gabion, yaitu gabion atas dan gabion bawah, yang digunakan sebagai dinding penahan tanah pada lereng. Untuk gabion bagian atas, tinggi timbunan dan dimensi elemen gabion memiliki ukuran yang sama, yaitu  $1,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ , sehingga nilai Faktor Keamanan (FK) terhadap guling dan geser pada potongan lereng H1, H2, dan L2 menghasilkan nilai yang identik.

Sementara itu, untuk gabion bagian bawah dengan dimensi yang lebih besar, yaitu  $2,5 \times 1,0 \text{ m}^2$ , dilakukan perhitungan terpisah. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai FK guling dan FK geser pada potongan lereng H1, H2, dan L2 juga memberikan hasil yang sama karena konfigurasi geometri dan pembebanan yang seragam pada ketiga potongan tersebut.

Seluruh hasil perhitungan stabilitas eksternal gabion, baik untuk bagian atas maupun bagian bawah, dirangkum dalam tabel berikut sebagai dasar evaluasi kelayakan desain terhadap kriteria guling, geser, dan daya dukung tanah.

**Tabel 7.** Guling dan Geser Gabion Atas Potongan H1, H2 dan L2

LERENG	FK GULING GABION ATAS	FK GESER GABION ATAS	KONTROL
H1	7,45	3,21	OK
H2	7,45	3,21	OK
L2	7,45	3,21	OK

**Tabel 8.** FK Geser Gabion Bawah Potongan H1, H2 dan L2

LERENG	FK GULING GABION BAWAH	FK GESER GABION BAWAH	KONTROL
H1	3,40	3,2	OK
H2	3,32	2,3	OK
L2	3,41	2,41	OK

##### 3.1.2 Daya Dukung Tanah

Perhitungan daya dukung tanah dilakukan untuk memastikan bahwa tekanan yang bekerja pada pondasi gabion masih berada di bawah kapasitas dukung tanah dasar, sehingga tidak terjadi keruntuhan geser maupun penurunan berlebih. Evaluasi dilakukan pada setiap potongan lereng yang dianalisis, yaitu H1, H2, dan L2. Berdasarkan hasil perhitungan, kapasitas daya dukung tanah untuk masing-masing potongan lereng dirangkum dalam tabel berikut, yang menjadi dasar penilaian kelayakan desain gabion terhadap stabilitas eksternal, khususnya terhadap daya dukung (*bearing capacity*).

**Tabel 9.** Kapasitas Daya Dukung Tanah H1, H2 dan L2

LERENG	$q_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	$q_{desain}$ (kN/m <sup>2</sup> )	Faktor Keamanan	KONTROL
H1	5009,757	389,322	12,868	OK
H2	5079,925	1617,685	3,140	OK
L2	1890,677	389,5939	4,853	OK

### 3.2 Stabilitas Lereng Timbunan

Analisis kestabilan lereng timbunan dilakukan menggunakan perangkat lunak GeoStudio dengan menerapkan dua metode keseimbangan batas, yaitu Bishop Simplified dan Morgenstern-Price. Kedua metode ini digunakan untuk mengevaluasi faktor keamanan terhadap potensi keruntuhan internal pada berbagai kondisi pembebanan yang direpresentasikan dalam pemodelan. Hasil analisis stabilitas untuk setiap potongan lereng disajikan pada tabel berikut sebagai dasar penilaian kelayakan desain lereng timbunan sebelum dan sesudah penerapan perkuatan.

**Tabel 10.** Rekapitulasi FK untuk 5 Kondisi Analisis Tanpa Perkuatan

Rekapitulasi Faktor Keamanan (FK) untuk 5 kondisi Analisis Sebelum Perkuatan						
Lereng	Metode	Kondisi	Analisis	Hasil Analisis		
				FK	KONTROL	KETERANGAN
H1	Bishop	statis	Undrained	2,967	1,5	MEMENUHI
			Undrained + W	2,958		MEMENUHI
			Drained + W	1,277		TIDAK MEMENUHI
			Rapid Drawdown	1,524	1,3	MEMENUHI
		Dinamis	Drained + Q	0,799	1,1	TIDAK MEMENUHI
	Morgenstern-Price	statis	Undrained	2,967	1,5	MEMENUHI
			Undrained + W	2,965		MEMENUHI
			Drained + W	1,286		TIDAK MEMENUHI
			Rapid Drawdown	1,521	1,3	MEMENUHI
		Dinamis	Drained + Q	0,825	1,1	TIDAK MEMENUHI
H2	Bishop	statis	Undrained	1,683	1,5	MEMENUHI
			Undrained + W	1,619		MEMENUHI
			Drained + W	0,965		TIDAK MEMENUHI
			Rapid Drawdown	1,578	1,3	MEMENUHI
		Dinamis	Drained + Q	0,610	1,1	TIDAK MEMENUHI
	Morgenstern-Price	statis	Undrained	1,683	1,5	MEMENUHI
			Undrained + W	1,622		MEMENUHI
			Drained + W	0,968		TIDAK MEMENUHI
			Rapid Drawdown	1,575	1,3	MEMENUHI
		Dinamis	Drained + Q	0,620	1,1	TIDAK MEMENUHI
L2	Bishop	statis	Undrained	2,388	1,5	MEMENUHI
			Undrained + W	2,388		MEMENUHI
			Drained + W	1,330		TIDAK MEMENUHI
			Rapid Drawdown	1,511	1,3	MEMENUHI
		Dinamis	Drained + Q	0,853	1,1	TIDAK MEMENUHI
	Morgenstern-Price	statis	Undrained	2,388	1,5	MEMENUHI
			Undrained + W	2,388		MEMENUHI
			Drained + W	1,338		TIDAK MEMENUHI
			Rapid Drawdown	1,509	1,3	MEMENUHI
		Dinamis	Drained + Q	0,872	1,1	TIDAK MEMENUHI

Berdasarkan hasil rekapitulasi Faktor Keamanan (FK) sebelum penerapan perkuatan, dapat disimpulkan bahwa kondisi lereng masih menunjukkan beberapa ketidakstabilan, terutama pada kondisi drained. Nilai FK mengalami penurunan signifikan ketika pengaruh muka air tanah dan beban gempa diperhitungkan, sehingga beberapa kondisi analisis tidak memenuhi persyaratan stabilitas sesuai SNI 8460:2017. Hal ini menunjukkan bahwa lereng belum mampu mempertahankan kestabilannya pada kondisi jangka panjang maupun kondisi dinamis.

Dengan demikian, penggunaan gabion saja belum cukup untuk meningkatkan stabilitas lereng hingga mencapai kriteria keamanan yang dipersyaratkan. Diperlukan penambahan sistem perkuatan berupa pemasangan geogrid, yang berfungsi meningkatkan kuat geser tanah, memperbaiki interaksi tanah-struktur, serta menahan gaya lateral. Penambahan geogrid diharapkan mampu meningkatkan nilai FK sehingga lereng dapat memenuhi standar keamanan baik pada kondisi statis maupun dinamis.

### 3.2 Perkuatan Lereng dengan Geogrid

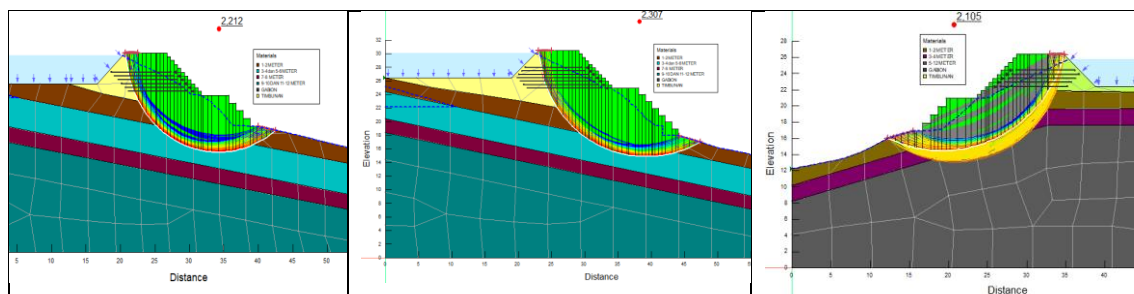
Perkuatan lereng dengan geogrid merupakan salah satu metode stabilisasi tanah yang banyak digunakan pada konstruksi geoteknik modern, terutama pada area dengan kondisi tanah vulkanik yang memiliki variabilitas sifat mekanik seperti di lokasi proyek PLTP Tawa Songa. Geogrid bekerja dengan meningkatkan kapasitas geser tanah melalui mekanisme interaksi tanah–perkuatan, sehingga mampu menahan gaya lateral dan mengurangi potensi deformasi lereng. Penggunaan material ini menjadi penting ketika analisis awal menunjukkan bahwa perkuatan konvensional, seperti gabion, belum mampu memberikan nilai faktor keamanan yang memenuhi persyaratan stabilitas pada kondisi jangka panjang maupun kondisi gempa.

**Tabel 11.** Panjang Perkuatan Geogrid pada Lereng

LERENG	TINGGI	PANJANG GEOGRID	Sv	Sh
H1	9,5 m	8,55 m	0,5	0,5
H2	12,5 m	11,25 m	0,5	0,5
L2	9,5 m	8,55 m	0,5	0,5

### 3.3 Kestabilan Lereng dengan Perkuatan Geogrid

Berdasarkan hasil analisis stabilitas lereng menggunakan perangkat lunak GeoStudio setelah penerapan perkuatan geogrid, diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) pada berbagai kondisi pembebanan, baik statis maupun dinamis. Hasil ini menunjukkan peningkatan signifikan dibandingkan kondisi sebelum perkuatan, sehingga efektivitas sistem perkuatan dapat dievaluasi secara kuantitatif.



**Gambar 4.** Faktor Keamanan Lereng H1, H2, dan L2 setelah menggunakan Perkuatan

### 3.4 Ketahanan Geogrid terhadap Kegagalan Putus dan Kegagalan Tarik

Evaluasi ketahanan geogrid terhadap dua mode kegagalan utama—yaitu kegagalan putus (tensile rupture) dan kegagalan tarik/tercabut (pullout failure)—merupakan bagian penting dalam memastikan bahwa sistem perkuatan lereng bekerja secara aman dan efektif. Pada struktur lereng timbunan, geogrid berfungsi menahan gaya lateral tanah melalui mekanisme interlocking dan transfer tegangan, sehingga kapasitas tarik dan panjang penjangkaran menjadi parameter yang sangat menentukan kinerja perkuatan.

Analisis ketahanan geogrid dilakukan dengan membandingkan gaya tarik yang bekerja akibat tekanan tanah dengan kapasitas tarik ultimit geogrid setelah mempertimbangkan faktor reduksi. Selain itu, stabilitas terhadap kegagalan cabut dievaluasi berdasarkan panjang penjangkaran efektif, kondisi gesekan tanah–geogrid, serta konfigurasi pemasangan. Hasil analisis ini memastikan bahwa geogrid tidak hanya mampu menahan gaya internal, tetapi juga memiliki daya cengkeram yang cukup untuk mencegah terjadinya pergeseran atau pelepasan dari massa tanah.

**Tabel 12.** Faktor Keamanan Geogrid terhadap Tahanan Putus - Lereng H1

NO	z (m)	L (m)	Pa (kPa)	Pq2 (kPa)	W	qL	W+q2l (kPa)	e (m)	σ'vb (kPa)	σ'h (kPa)	Sv (m)	Sh (m)	F kN/m	FK PUTUS IRAGRID 400/5
1	2,5	8,55	20,833	41,7	427,5	427,5	855	0,278	106,95	35,65	0,5	0,5	8,91	27,18 <b>OK</b>
2	3	8,55	30,000	50,0	513	427,5	940,5	0,318	118,85	39,62	0,5	0,5	9,90	24,46 <b>OK</b>
3	3,5	8,55	40,833	58,3	598,5	427,5	1026	0,356	130,92	43,64	0,5	0,5	10,91	22,20 <b>OK</b>
4	4	8,55	53,333	66,7	684	427,5	1111,5	0,393	143,17	47,72	0,5	0,5	11,93	20,30 <b>OK</b>
5	4,5	8,55	67,500	75,0	769,5	427,5	1197	0,429	155,60	51,87	0,5	0,5	12,97	18,68 <b>OK</b>
6	5	8,55	83,333	83,3	855	427,5	1282,5	0,463	168,22	56,07	0,5	0,5	14,02	17,28 <b>OK</b>
Gaya Tarik yang terjadi > T ijin ; kurangi tebal lapisan													max F =	14,02

**Tabel 13.** Faktor Keamanan Geogrid terhadap Tahanan Putus - Lereng H2

NO	z (m)	L (m)	Pa (kPa)	Pq (kPa)	W	q2L	W+q2l (kPa)	e (m)	σ'vb (kPa)	σ'h (kPa)	Sv (m)	Sh (m)	F kN/m	FK PUTUS MIRAGRID
1	2,5	8,55	20,833	42	427,5	427,5	855	0,278	106,95	35,65	0,5	0,5	8,91	27,18 <b>OK</b>
2	3	8,55	30,000	50	513	427,5	940,5	0,318	118,85	39,62	0,5	0,5	9,90	24,46 <b>OK</b>
3	3,5	9,55	40,833	58	668,5	477,5	1146	0,356	129,68	43,23	0,5	0,5	10,81	22,41 <b>OK</b>
4	4	10,55	53,333	67	844	527,5	1371,5	0,393	140,47	46,82	0,5	0,5	11,71	20,69 <b>OK</b>
5	4,5	11,25	67,500	75	1012,5	562,5	1575	0,429	151,55	50,52	0,5	0,5	12,63	19,18 <b>OK</b>
6	5	11,25	83,333	83	1125	562,5	1687,5	0,463	163,45	54,48	0,5	0,5	13,62	17,78 <b>OK</b>
7	5,5	11,25	100,833	92	1237,5	562,5	1800	0,497	175,49	58,50	0,5	0,5	14,62	16,56 <b>OK</b>
Gaya Tarik yang terjadi > T ijin ; kurangi tebal lapisan													max F =	14,62

**Tabel 14.** Faktor Keamanan Geogrid terhadap Tahanan Putus - Lereng L2

NO	z (m)	L (m)	Pa (kPa)	Pq2 (kPa)	W	q2L	W+q2l (kPa)	e (m)	σ'vb (kPa)	σ'h (kPa)	Sv (m)	Sh (m)	F kN/m	FK PUTUS UX1800
1	2	7,5	13,333	27	300	300	600	0,222	85,04	28,35	0,5	0,5	7,09	34,18 <b>OK</b>
2	2,5	8,55	20,833	33	427,5	342	769,5	0,262	95,88	31,96	0,5	0,5	7,99	30,31 <b>OK</b>
3	3	8,55	30,000	40	513	342	855	0,300	107,55	35,85	0,5	0,5	8,96	27,02 <b>OK</b>
4	3,5	8,55	40,833	47	598,5	342	940,5	0,336	119,38	39,79	0,5	0,5	9,95	24,35 <b>OK</b>
5	4	8,55	53,333	53	684	342	1026	0,370	131,38	43,79	0,5	0,5	10,95	22,12 <b>OK</b>
Gaya Tarik yang terjadi > T ijin ; kurangi tebal lapisan													max F =	10,95

**Tabel 15.** Faktor Keamanan Geogrid terhadap Tahanan Cabut – Lereng H1

NO	z m	L m	F kN/m	Le m	f kPa	Pc kN/m	FK CABUT
1	2,5	8,55	8,91	7,55	71,11	536,89	60,24 <b>OK</b>
2	3	8,55	9,90	7,72	85,33	658,49	66,49 <b>OK</b>
3	3,5	8,55	10,91	7,88	99,56	784,83	71,94 <b>OK</b>
4	4	8,55	11,93	8,05	113,78	915,91	76,77 <b>OK</b>
5	4,5	8,55	12,97	8,22	128,00	1051,74	81,11 <b>OK</b>
6	5	8,55	14,02	8,38	142,22	1192,30	85,05 <b>OK</b>

**Tabel 16.** Faktor Keamanan Geogrid terhadap Tahanan Cabut – Lereng H2

NO	z m	L m	F kN/m	Le m	f kPa	Pc kN/m	FK CABUT
1	2,5	8,55	8,91	7,55	71,11	536,89	60,24 <b>OK</b>
2	3	8,55	9,90	7,72	85,33	658,49	66,49 <b>OK</b>
3	3,5	9,55	10,81	8,88	99,56	884,39	81,84 <b>OK</b>
4	4	10,55	11,71	10,05	113,78	1143,47	97,68 <b>OK</b>
5	4,5	11,25	12,63	10,92	128,00	1397,34	110,65 <b>OK</b>
6	5	11,25	13,62	11,08	142,22	1576,30	115,73 <b>OK</b>
7	6,5	11,25	14,62	11,42	184,89	2110,82	144,34 <b>OK</b>

**Tabel 17.** Faktor Keamanan Geogrid terhadap Tahanan Cabut – Lereng L2

NO	z m	L m	F kN/m	Le m	f kPa	Pc kN/m	FK CABUT
1	2	7,5	7,09	6,33	56,89	360,30	50,84 <b>OK</b>
2	2,5	8,55	7,99	7,55	71,11	536,89	67,19 <b>OK</b>
3	3	8,55	8,96	7,72	85,33	658,49	73,47 <b>OK</b>
4	3,5	8,55	9,95	7,88	99,56	784,83	78,89 <b>OK</b>
5	4	8,55	10,95	8,05	113,78	915,91	83,66 <b>OK</b>

### 3.5 Deformasi pada Lereng

Analisis deformasi lereng merupakan tahapan penting dalam evaluasi kinerja perkuatan dan perilaku tanah pada konstruksi timbunan waterpond. Tidak hanya faktor keamanan (FK) yang perlu dipenuhi, tetapi juga besarnya perpindahan horizontal, vertikal, dan total displacement harus berada dalam batas yang diizinkan agar tidak menimbulkan kerusakan pada struktur pendukung maupun gangguan terhadap fungsi operasional waterpond.

Melalui pemodelan numerik menggunakan PLAXIS, deformasi lereng dapat dianalisis secara lebih detail dengan mempertimbangkan interaksi tanah–struktur, kondisi rembesan, perubahan geometri, serta tahapan konstruksi. Hasil analisis ini memberikan gambaran mengenai zona kritis, pola pergerakan tanah, dan efektivitas perkuatan geogrid dalam mengurangi deformasi. Dengan demikian, evaluasi deformasi menjadi dasar penting dalam memastikan bahwa desain lereng tidak hanya stabil secara teoritis, tetapi juga aman terhadap pergerakan tanah yang berlebihan selama umur layanan konstruksi.

**Tabel 18.** Deformasi Total (*Total Displacement*) pada Lereng

Lereng	Total Perpindahan (Displacement)			
	Sebelum Konstruksi (m)	Sesudah Konstruksi Tanpa Muka Air (m)	Sesudah Konstruksi Dengan Muka Air (m)	Nilai perubahan perpindahan
H1	0	0,06519	0,06920	0,00401
H2	0	0,1185	0,1424	0,0239
H3	0	0,05639	0,06533	0,00894

**Tabel 19.** Deformasi Horizontal pada Lereng

Lereng	Perpindahan Horizontal (Displacement)			
	Sebelum Konstruksi (m)	Sesudah Konstruksi Tanpa Muka Air (m)	Sesudah Konstruksi Dengan Muka Air (m)	Nilai perubahan perpindahan
H1	0	0,02557	0,06789	0,04232
H2	0	0,05456	0,1423	0,0877
H3	0	0,0002088	0,0002286	0,0000198

**Tabel 20.** Deformasi Vertikal pada Lereng

Lereng	Perpindahan Vertikal (Displacement)			
	Sebelum Konstruksi (m)	Sesudah Konstruksi Tanpa Muka Air (m)	Sesudah Konstruksi Dengan Muka Air (m)	Nilai perubahan perpindahan
H1	0	0,003858	0,05379	0,049932
H2	0	0,008167	0,0639	0,0557
H3	0	0,003863	0,02922	0,025357

Hasil analisis pada Tabel 18 menunjukkan bahwa perpindahan total mengalami peningkatan setelah konstruksi, terutama ketika muka air diperhitungkan. Hal ini wajar karena kenaikan tekanan pori dan perubahan kondisi rembesan menyebabkan penurunan kekakuan tanah. Namun, nilai perubahan perpindahan masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk lereng timbunan, sehingga tidak menunjukkan indikasi deformasi berlebih yang dapat memicu keruntuhan.

Hasil analisis pada Tabel 19 memperlihatkan bahwa perpindahan horizontal meningkat setelah konstruksi, dan kembali meningkat ketika muka air dimasukkan dalam analisis. Pola ini menunjukkan bahwa gaya lateral tanah bertambah akibat beban timbunan dan pengaruh tekanan air. Meskipun demikian, besarnya perpindahan horizontal masih relatif kecil dan tidak menunjukkan potensi terjadinya lateral spreading atau pergeseran besar yang dapat mengganggu stabilitas global lereng.

Hasil analisis pada Tabel 20 menunjukkan bahwa perpindahan vertikal (penurunan) juga mengalami peningkatan setelah konstruksi. Penurunan bertambah ketika muka air diperhitungkan karena peningkatan tekanan efektif dan konsolidasi tanah. Nilai penurunan yang terjadi masih dalam kisaran yang dapat diterima untuk konstruksi timbunan, sehingga tidak menimbulkan risiko deformasi berlebih atau kerusakan pada struktur pendukung seperti gabion atau geogrid.

### 3.5 Faktor Keamanan Lereng dengan Perkuatan Geogrid

**Tabel 21.** Faktor Keamanan Lereng dengan Pekuatan Geogrid berdasarkan Analisis LEM dan FEM

Lereng	LEM (GeoStudio)	FEM (PLAXIS 2D)
H1	2,208	1,604
H2	2,332	1,302
L2	2,171	1,455

Perbedaan nilai Faktor Keamanan (FK) antara PLAXIS dan GeoStudio (SLOPE/W) dipengaruhi oleh perbedaan metode analisis yang digunakan. PLAXIS menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) dengan pendekatan *phi-c reduction* yang mempertimbangkan deformasi serta distribusi tegangan-regangan tanah secara menyeluruh, sedangkan GeoStudio menggunakan metode keseimbangan batas (*Limit Equilibrium Method/LEM*) yang menghitung keseimbangan gaya dan momen pada bidang longsor tertentu tanpa mempertimbangkan deformasi tanah secara langsung. Selain itu, bidang longsor pada PLAXIS terbentuk secara alami dari hasil analisis, sementara pada GeoStudio ditentukan melalui pencarian slip surface, sehingga dapat menghasilkan nilai FK yang berbeda. Dalam penelitian ini digunakan kriteria FK minimum  $\geq 1,3$  sebagai syarat stabilitas lereng. Analisis stabilitas lereng timbunan pada PLAXIS dilakukan dalam tiga fase, yaitu kondisi sebelum konstruksi timbunan, kondisi sesudah konstruksi tanpa pengaruh muka air waterpond, dan kondisi sesudah konstruksi dengan pengaruh muka air waterpond.

## 4. Kesimpulan

### 1. Kondisi Lereng Sebelum Perkuatan

Analisis kestabilan lereng menunjukkan bahwa pada kondisi jangka pendek (undrained), nilai Faktor Keamanan (FK) berada pada kisaran 1,619–2,967, sehingga lereng masih memenuhi kriteria aman ( $FK \geq 1,5$ ). Namun, pada kondisi jangka panjang (drained), nilai FK menurun signifikan menjadi 0,965–1,338 tanpa gempa dan 0,610–0,872 dengan gempa, sehingga lereng dinyatakan tidak stabil apabila hanya mengandalkan perkuatan gabion.

### 2. Pengaruh Muka Air dan Rembesan

Pada kondisi jangka pendek, perubahan muka air tidak memberikan pengaruh besar terhadap FK karena analisis menggunakan parameter undrained ( $cu, \phi = 0$ ). Sebaliknya, pada kondisi jangka panjang, keberadaan muka air dan rembesan menyebabkan penurunan FK akibat peningkatan kejenuhan, berat tanah, dan gaya rembesan. Kondisi steady-state menghasilkan FK 0,965–1,338, sedangkan kondisi gempa menurunkan FK menjadi 0,610–0,872. Analisis rapid drawdown menunjukkan FK 1,509–1,578, mendekati batas kritis. Hasil PLAXIS juga memperlihatkan peningkatan deformasi akibat kejenuhan, namun masih dapat dikendalikan dengan perkuatan.

### 3. Efektivitas Perkuatan Lereng

Perbandingan sebelum dan sesudah perkuatan menunjukkan bahwa gabion saja tidak cukup untuk memenuhi kriteria stabilitas jangka panjang. Setelah penambahan geogrid, nilai FK meningkat dan memenuhi batas aman ( $FK \geq 1,3$ ), baik berdasarkan analisis LEM (GeoStudio) maupun FEM (PLAXIS). Deformasi lereng juga berkurang dan berada dalam batas yang dapat diterima.

### 4. Desain Perkuatan yang Direkomendasikan

Kombinasi dinding penahan tanah gabion bertingkat dan perkuatan geogrid Miragrid GX 400/50 terbukti efektif meningkatkan kestabilan lereng. Gabion terdiri dari dua bagian (atas dan bawah) dengan dimensi sesuai geometri lapangan, sedangkan geogrid dipasang dengan panjang 8,55–11,25 m, jarak  $S_v = 0,5$  m dan  $S_h = 0,5$  m, serta jumlah lapisan 5–7 lapis sesuai potongan lereng. Kombinasi ini memenuhi persyaratan stabilitas sesuai SNI 8460:2017 dan direkomendasikan sebagai desain akhir.

## Referensi

- Badan Standardisasi Nasional. 2017. SNI 8460:2017, Persyaratan Perancangan Geoteknik. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Bowles, Joseph E. 1996. *Foundation Analysis and Design*. Singapore: McGraw-Hill.
- Chen, Philip dan Sentosa, Gregorius Sandjadja. 2020. Analisis Perbandingan Nilai Koefisien Permeabilitas Tanah Uji Lapangan dan Uji Laboratorium. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, Vol. 3, No. 1, hlm. 97-108.
- Darwis. 2018. *Dasar-Dasar Mekanika Tanah*. Yogyakarta: Pena Indis.
- Das, Braja. M. 1995. *Mekanika Tanah 1 (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Jakarta: Erlangga.
- Departemen Pekerjaan Umum. 2005. Pd T-09-2005-B, Pedoman Rekayasa Penanganan Keruntuhan Lereng pada Tanah Residual dan Batuan. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2001). *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines (FHWA-NHI-00-043)*. U.S. Department of Transportation.
- Ferdinand, D., & Prabowo, K. B. (2000). *Studi rembesan air pada jenis tanah bendungan urugan type homogen* (Skripsi Sarjana). Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Hakam, Abdul. 2010. *Stabilitas Lereng dan Dinding Penahan Tanah*. Universitas Andalas Press.
- Han, J. (2015). *Principles and Practices of Ground Improvement*. United States Of America : John Wiley & Sons.
- Hardiyatmo, S. (2002). *Mekanika Tanah dan Fondasi*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Irwan, A. G., & Rezky, D. M. (2025). *Stability Analysis of Nickel Haul Road Embankment Slopes in Southeast Sulawesi*. Indonesian Geotechnical Journal, Vol. 4 No. 1, pp. 53-60.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2016. *Panduan Geoteknik 4: Desain dan Konstruksi*. Jakarta: Kementerian PUPR
- Koerner, R., (2003). *A Brief Overview of Geosynthetics and Their Major Applications*, Geosynthetics Institute.USA.
- Limianto, R. P. 2011. *Analisa Lereng Bendungan Tanah pada Kondisi Rapid Drawdown dengan Perangkat Lunak GeoStudio*. Skripsi, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Depok.
- Nggebu, Y. Y. E., Tichoh, J. H., dan Legrans, R. R. I. 2019. Analisis Kestabilan Lereng Di Ruas Jalan Raya Manado – Tomohon Km 15. *TEKNO*, Vol. 17, No. 71, 20–26.
- Pinaria, R. Y. M., Sarajar, A. N., & Legrans, R. R. I. 2025. Desain Lereng Timbunan Dengan Perkuatan Geogrid Untuk Konstruksi Reservoir Kawasan Perumahan. *TEKNO*, Vol. 23, No. 91, 168–177.
- Qi, S., Wen, Z., Lu, C., Shu, L., Shao, J., Huang, Y., Zhang, S., & Huang, Y. (2015). A new empirical model for estimating the hydraulic conductivity of low permeability media. In *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences (IAHS Publ. 368), Remote Sensing and GIS for Hydrology and Water Resources*, pp. 478-483. Guangzhou, China: IAHS Press.
- Singal, S. S., Mandagi, A. T., dan Sarajar, A. N. 2021. Analisis Rembesan Pada Dam Tailing Di Desa Tokin Kecamatan Motoling Timur. *Tekno*, Vol. 19, No. 78, pp. 213-218.
- Takwin, G. A., Turangan, A. E., & Rondonuwu, S. G. 2017. Analisis Kestabilan Lereng Metode Morgenstern-Price Studi Kasus Diamond Hill Citraland. *TEKNO*, Vol. 15, No. 67, 66–76.
- Vesic, A. S. (1973). Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*, ASCE, 99(1), 45-73.
- Wantalanie, R. M., Legrans, R. R. I., & Manaroinsong, L. D. K. 2024. Analisis Kestabilan Embankment Pada Storage Facility Pyrite Concentrate PT. Freeport Indonesia. *TEKNO*, Vol. 22, No. 87, 680–689.