



Analisis Kestabilan Lereng Timbunan Dengan Sistem GRS Pasca Longsor Pada SPAM Ratahan, Tosuraya Barat, Kab. Minahasa Tenggara

Gilang P. R. Sineke^{#a}, Roski R. I. Legrans^{#b}, Alva N. Sarajar^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
^agilangsineke021@student.unsrat.ac.id, ^blegransroski@unsrat.ac.id, ^calva.sarajar@unsrat.ac.id

Abstrak

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh terjadinya kegagalan lereng pada lokasi SPAM Ratahan, Kelurahan Tosuraya Barat, Kabupaten Minahasa Tenggara, yang ditandai dengan longsor tanah, perubahan geometri lereng, serta kondisi tanah yang tidak stabil. Kondisi tersebut menyebabkan lereng tidak memenuhi kriteria stabilitas geoteknik dan berpotensi membahayakan infrastruktur di sekitarnya, sehingga diperlukan perencanaan teknis yang tepat untuk mencegah keruntuhan ulang. Penelitian ini bertujuan menganalisis kestabilan lereng pasca longsor serta merancang timbunan dengan sistem Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) guna meningkatkan stabilitas lereng. Metode penelitian meliputi analisis stabilitas lereng eksisting menggunakan metode Bishop Simplified dengan perangkat lunak Slide 6.0, serta back analysis untuk memperoleh parameter kuat geser tanah pada kondisi kritis. Data yang digunakan berasal dari observasi lapangan, hasil uji Cone Penetration Test (CPT/sondir), geometri lereng, dan parameter tanah hasil korelasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa lereng eksisting memiliki faktor keamanan sebesar 2,711, sedangkan melalui back analysis diperoleh sudut geser dalam tanah sebesar $34,04^\circ$ pada kondisi kritis ($FK \approx 1$). Perancangan timbunan dengan sistem GRS menghasilkan peningkatan stabilitas dengan geometri tinggi 13 m, lebar bawah 18,4993 m, lebar atas 6,917 m, dan kemiringan 42° . Faktor keamanan geser rotasional meningkat dari 0,621 menjadi 3,437, daya dukung tanah meningkat dari 4,68 menjadi 7,749, serta stabilitas eksternal memenuhi kriteria dengan FK guling 7,837 dan FK geser 3,557. Analisis global menunjukkan FK sebesar 1,856, sedangkan analisis dengan PLAXIS 2D menghasilkan deformasi 0,05832 m dengan FK 1,830. Dengan demikian, sistem perkuatan GRS terbukti efektif dalam meningkatkan kestabilan lereng secara menyeluruh dan dapat dijadikan solusi rehabilitasi pasca longsor pada lokasi SPAM Ratahan.

Kata kunci: stabilitas lereng, Geosynthetic Reinforced Soil, back analysis, faktor keamanan, PLAXIS 2D

1. Pendahuluan

Kabupaten Minahasa Tenggara, khususnya wilayah Tosuraya Barat, memiliki topografi yang didominasi oleh perbukitan dan lereng curam. Menurut Badan Geologi (2021), sebagian besar daerah di Minahasa Tenggara dikategorikan sebagai zona dengan risiko tinggi tanah longsor, terutama pada lereng dengan sudut lebih dari 30° . Kondisi ini menjadikan wilayah tersebut sangat rentan terhadap bencana longsor yang dapat mengancam keselamatan masyarakat maupun keberlanjutan infrastruktur.

Pada lokasi Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) Ratahan, telah terjadi kegagalan lereng yang ditandai dengan longsor tanah, perubahan geometri lereng, serta kondisi material tanah yang gembur dan tidak terpadatkan secara optimal. Keberadaan bangunan dan fasilitas di sekitar lereng yang berjarak dekat dengan area longsor menunjukkan bahwa kegagalan lereng tidak hanya berdampak pada kondisi tanah, tetapi juga berpotensi mengganggu fungsi infrastruktur penting. Selain itu, sistem drainase dan struktur penahan yang ada belum sepenuhnya terintegrasi, sehingga tidak mampu memberikan perlindungan yang memadai terhadap tekanan air dan gaya lateral.

Menurut Martiani, Arif, dan Wahyudi (2021), perbaikan lereng pasca longsor perlu

dilakukan dengan merancang sistem perkuatan yang tepat agar faktor keamanan lereng dapat ditingkatkan dan keruntuhan serupa dapat dicegah di masa mendatang. Salah satu metode yang dinilai efektif, fleksibel, dan ekonomis adalah penerapan sistem Geosynthetic Reinforced Soil (GRS). Metode ini memanfaatkan interaksi antara tanah timbunan dan geosintetik jenis geogrid untuk membentuk massa tanah komposit yang lebih kaku, stabil, dan tahan terhadap deformasi. Penerapan GRS terbukti mampu meningkatkan kekuatan geser tanah, memperbaiki stabilitas eksternal, serta memenuhi kriteria faktor keamanan terhadap guling, geser lateral, dan daya dukung tanah sebagaimana disyaratkan dalam SNI 8460:2017.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis kestabilan lereng timbunan dengan sistem perkuatan GRS pasca longsor di lokasi SPAM Ratahan, Tosuraya Barat, Kabupaten Minahasa Tenggara, dengan tujuan merancang solusi teknis yang mampu meningkatkan faktor keamanan lereng dan menjamin keberlanjutan fungsi infrastruktur di sekitarnya.

2. Metodologi Penelitian

2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian analisis geoteknik berbasis numerik dan analitik untuk mengevaluasi kestabilan lereng pasca longsor menggunakan sistem perkuatan Geosynthetic Reinforced Soil (GRS). Analisis dilakukan menggunakan metode keseimbangan batas (Limit Equilibrium Method) dan metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM).

2.2 Metode Elemen Hingga/Finite Element Method (FEM)

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) bekerja dengan membagi domain analisis menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung pada titik-titik nodal sehingga memungkinkan representasi perilaku mekanis tanah dan struktur secara numerik. Dalam penelitian ini, analisis FEM menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D untuk mengevaluasi perilaku lereng pasca kegagalan dengan sistem perkuatan *Geosynthetic Reinforced Soil* (GRS). Penggunaan PLAXIS 2D memberikan beberapa keunggulan dalam analisis stabilitas lereng, antara lain:

1. Pemodelan geometri lereng dan material secara realistis
PLAXIS 2D mampu merepresentasikan geometri lereng, timbunan, dan lapisan tanah secara detail serta memodelkan perilaku tanah nonlinier sesuai parameter tanah yang digunakan. Selain itu, geogrid sebagai perkuatan GRS dapat dimodelkan sebagai elemen tarik yang bekerja memperkuat massa tanah sehingga interaksi tanah-geogrid dapat dianalisis secara lebih realistis.
2. Interaksi tanah-geogrid
Perangkat lunak ini memungkinkan pemodelan interaksi antara tanah dan geogrid melalui parameter antarmuka (*interface*) sehingga distribusi gaya tarik, tegangan geser, dan transfer beban pada sistem GRS dapat dianalisis mendekati kondisi lapangan.
3. Analisis terpadu deformasi dan faktor keamanan
Dalam satu tahapan simulasi, PLAXIS 2D mampu menghasilkan informasi mengenai deformasi total, perpindahan lateral, distribusi tegangan, tekanan air pori, dan nilai faktor keamanan lereng. Integrasi parameter tersebut memungkinkan evaluasi performa sistem GRS secara menyeluruh.
4. Evaluasi stabilitas pasca perkuatan
Melalui metode *Safety Factor Reduction* (SRF), PLAXIS 2D digunakan untuk mengevaluasi peningkatan stabilitas lereng setelah diberikan perkuatan GRS. Hasil analisis berupa nilai faktor keamanan dan deformasi lereng digunakan sebagai dasar dalam menentukan efektivitas sistem perkuatan yang direncanakan.

2.3 Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada lokasi SPAM Ratahan yang terletak di Kelurahan Tosuraya Barat, Kabupaten Minahasa Tenggara, Provinsi Sulawesi Utara. Lokasi penelitian berada pada

koordinat 1.059417° LU dan 124.794963° BT dengan elevasi sekitar 404 mdpl. Area penelitian memiliki kondisi topografi berbukit dengan lereng curam, sehingga berpotensi tinggi mengalami longsor. Pada lokasi ini telah terjadi kegagalan lereng yang menyebabkan perubahan geometri dan menurunnya kestabilan tanah. Oleh karena itu, diperlukan perencanaan perkuatan lereng menggunakan sistem GRS. Data tanah diperoleh dari hasil Cone Penetration Test (CPT/sondir) dengan kedalaman pengujian mencapai 7,2 m, serta observasi lapangan untuk mendukung analisis numerik dan korelasi parameter tanah.

2.3 Data Penelitian

Data penelitian yang digunakan merupakan kombinasi antara data sekunder dan data hasil investigasi lapangan yang diperlukan untuk menganalisis kestabilan lereng serta merancang timbunan dengan sistem perkuatan Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) pada lokasi SPAM Rataan, Kelurahan Tosuraya Barat, Kabupaten Minahasa Tenggara. Data tersebut meliputi kondisi geometri lereng eksisting, hasil penyelidikan tanah, serta parameter tanah hasil korelasi yang digunakan dalam analisis numerik dan analitik.

2.3.1 Data Tanah

Data tanah diperoleh dari hasil uji Cone Penetration Test (CPT/sondir) yang digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik dan parameter tanah di lokasi penelitian. Melalui interpretasi nilai tahanan konus (q_c), hambatan lekat (f_s), dan klasifikasi *Soil Behaviour Type* (SBT), dilakukan penentuan sifat fisik dan mekanis tanah. Berdasarkan hasil interpretasi CPT, diperoleh parameter tanah hasil korelasi berupa:

- berat isi tanah (γ)
- kohesi tanah (c)
- kohesi tak terdrainase (c_u)
- sudut geser dalam tanah (ϕ)
- modulus elastisitas tanah (E)

Parameter-parameter tersebut digunakan sebagai input utama dalam analisis stabilitas lereng menggunakan metode keseimbangan batas dan metode elemen hingga, serta dalam perancangan sistem perkuatan GRS pada timbunan.

Tabel 1. Parameter Tanah berdasarkan Korelasi terhadap Hasil CPT/Sondir

Kedalaman (m)	Soil Type	Unit Weight, γ	c_u	c'	ϕ	E
		kN/m ³	Kpa	Kpa	°	Mpa
0 - 1.4	Clay – silty clay (lempung lunah-lempung lanau)	16.6	58.9	5.9	32.8	3.6
1.4 - 3.2	Clayey silt / Sandy silt (lanau lempung)	17.1	100.9	10.1	33.3	6.2
3.2 - 7.2	Medium to dense sand (Pasir)	18.7	0	0	40.6	40.2

2.3.2 Data Tanah Timbunan

Data tanah timbunan yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada parameter tanah yang direkomendasikan dalam buku Panduan Geoteknik 4: Desain dan Konstruksi. Parameter tersebut digunakan sebagai dasar dalam pemodelan timbunan pada sistem perkuatan Geosynthetic Reinforced Soil (GRS).

Tabel 2. Parameter Tanah Timbunan

Parameter	Nilai	Satuan
Berat isi tanah	γ	20 kN/m ³
Kuat Geser Tak Terdrainase	c_u	100 kN/m ²
Kohesi	c'	5 kN/m ²
Sudut Geser Dalam	ϕ	30 °

2.3.3 Data Geogrid

Data parameter geogrid digunakan sebagai material perkuatan utama dalam sistem Geosynthetic Reinforced Soil (GRS). Jenis geogrid yang digunakan adalah geogrid uniaxial Miragrid GX 160/50.

Parameter geogrid yang digunakan meliputi:

- Kuat tarik ultimit (T_U) = 160 kN/m
- Kuat tarik desain (T_D) = 100,9 kN/m
- Adhesion = 4 kPa
- Friction angle = 25°
- Modulus kekakuan aksial (EA) = 1681.167 kN/m

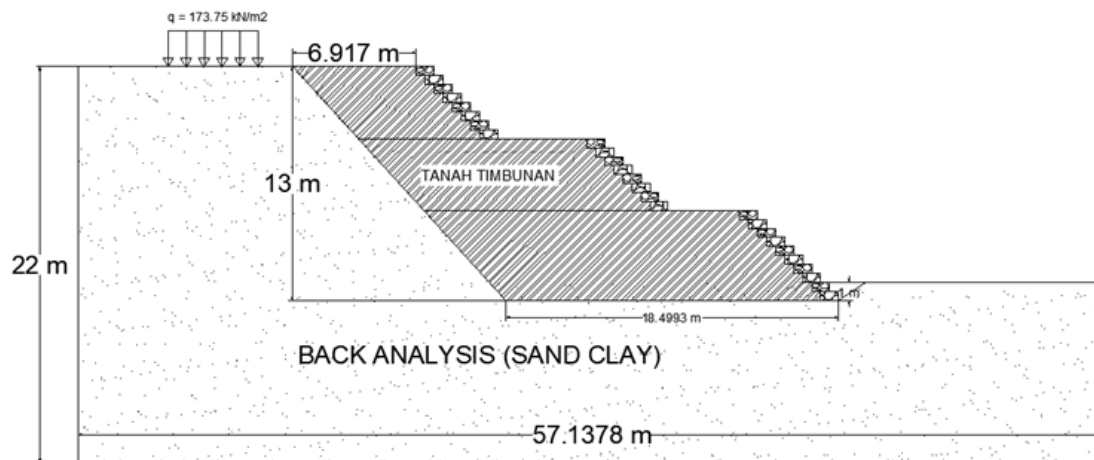
2.3.3 Data Lereng

Data geometri lereng digunakan sebagai dasar dalam analisis stabilitas lereng dan pemodelan numerik. Geometri lereng eksisting pada lokasi penelitian memiliki:

- Tinggi lereng = 22 m
- Panjang lereng = 57 m
- Kemiringan lereng = 3:1

Selain geometri lereng eksisting, penelitian juga menggunakan data geometri timbunan hasil perancangan berupa:

- Tinggi timbunan = 13 m
- Lebar bawah = 18,5 m
- Lebar atas = 6,9 m
- Kemiringan = 42°



Gambar 1. Geometri Lereng

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Stabilitas Lereng Eksisting

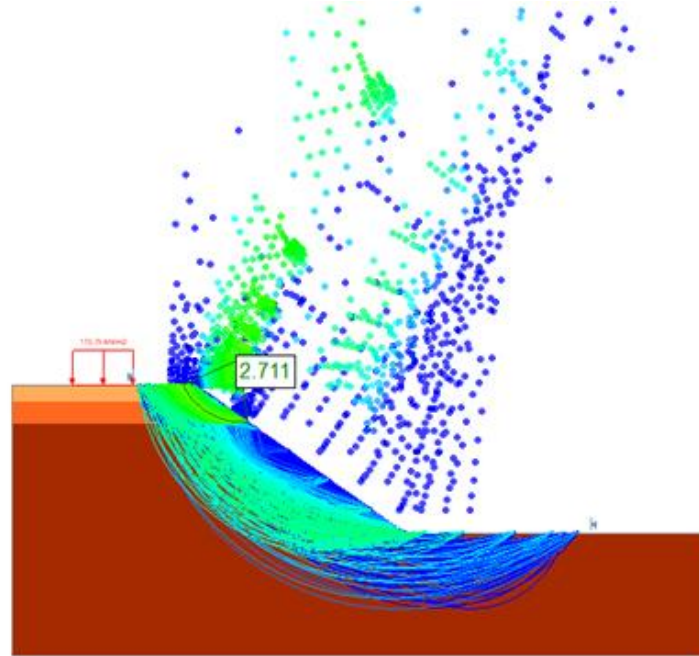
Analisis stabilitas lereng dilakukan untuk mengetahui kondisi keamanan lereng pada keadaan eksisting sebelum diberikan perkuatan. Evaluasi dilakukan menggunakan metode Bishop Simplified, yaitu metode keseimbangan batas (Limit Equilibrium Method/LEM) yang menganalisis kestabilan lereng berdasarkan keseimbangan momen pada irisan bidang longsor.

Perhitungan dilakukan menggunakan perangkat lunak Slide 6.0, dengan proses pencarian otomatis bidang gelincir kritis melalui sejumlah iterasi dan variasi geometri bidang longsor. Hasil analisis menunjukkan bahwa lereng eksisting memiliki nilai Faktor Keamanan (SF) sebesar 2,711, yang secara teoritis berada di atas batas aman umum ($SF \geq 1,5-2,0$).

Namun, kondisi lapangan menunjukkan bahwa lereng telah mengalami kegagalan berupa longsor dan perubahan geometri. Ketidaksesuaian antara hasil analisis awal dan kondisi aktual

mengindikasikan bahwa parameter tanah yang digunakan pada analisis eksisting belum merepresentasikan kondisi tanah saat longsor terjadi.

Oleh karena itu, dilakukan Back Analysis untuk memperoleh parameter kuat geser tanah yang menggambarkan kondisi kritis lereng pada saat terjadi kegagalan. Back analysis dilakukan dengan menyesuaikan parameter tanah hingga diperoleh nilai $SF \approx 1$, yang menunjukkan kondisi batas stabilitas (limit equilibrium) pada saat longsor terjadi.



Gambar 2. Faktor Keamanan Lereng Eksisting berdasarkan Metode Bishop

3.2 Analisis Balik

Analisis balik (*back analysis*) dilakukan untuk memperoleh parameter kuat geser tanah yang merepresentasikan kondisi kritis saat terjadinya kelongsoran. Metode ini digunakan ketika hasil analisis stabilitas awal tidak sesuai dengan kondisi aktual di lapangan, sehingga diperlukan penyesuaian parameter tanah hingga diperoleh kondisi $FK \approx 1$, yaitu kondisi batas stabilitas (limit equilibrium) pada saat longsor terjadi.

Dalam penelitian ini, proses back analysis dilakukan menggunakan pendekatan *trial and error* terhadap parameter kuat geser tanah, khususnya kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Parameter tanah rata-rata pada bidang gelincir ditentukan berdasarkan metode rata-rata parameter tanah berlapis menurut Purushothamaraj dkk. (1974) dalam jurnal *Bearing Capacity for Footings on Layered Soils*. Pendekatan ini digunakan karena bidang gelincir melewati beberapa lapisan tanah dengan karakteristik berbeda. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh parameter tanah rata-rata sebagai berikut:

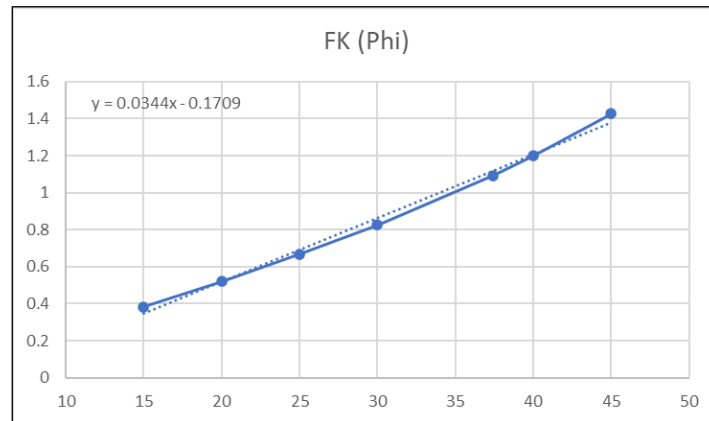
- Berat isi tanah (γ) : 17,9 kN/m³
- Kohesi (c) : 20 kPa
- Sudut geser dalam (ϕ) : 37.441°

Selanjutnya, analisis balik dilakukan dengan memvariasikan nilai sudut geser dalam (ϕ). Variasi ini dilakukan karena kondisi lereng pasca longsor umumnya mengalami penurunan kuat geser tanah akibat gangguan struktur tanah, peningkatan kadar air, dan perubahan kondisi tegangan pada bidang gelincir.

Proses analisis dilakukan menggunakan metode Bishop Simplified pada perangkat lunak Slide 6.0 hingga diperoleh nilai FK mendekati 1, yang menunjukkan bahwa parameter tanah tersebut telah sesuai dengan kondisi kritis saat longsor terjadi.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Faktor Keamanan dengan *Trial* Sudut Geser Dalam

Trial and error	
ϕ°	FK
15	0.384
20	0.521
25	0.667
30	0.825
37.441	1.094
40	1.2
45	1.428



Gambar 3. Kurva Hubungan Faktor Keamanan terhadap Sudut Geser Dalam

3.3 Daya Dukung Tanah

Perhitungan daya dukung tanah yang dilakukan pada kondisi jangka panjang dan jangka pendek menggunakan metode Terzaghi (1943). Faktor keamanan terhadap daya dukung tanah dihitung dengan persamaan:

$$FK_u = \frac{q_{ult}}{P_{max}} \text{ (untuk timbunan tanpa perkuatan)}$$

$$FK_R = \frac{q_{ult}}{P_{avg}} \text{ (untuk timbunan dengan perkuatan)}$$

Tabel 4. Faktor Keamanan terhadap Daya Dukung Tanah

Daya Dukung Tanah					
Tanpa Perkuatan			Dengan Perkuatan		
q_{ult}	P_{max}	FK	q_{ult}	P_{avg}	FK
kN/m ²	kN/m ²		kN/m ²	kN/m ²	
1937.810	433.750	4.468	1937.810	250.059	7.749
kontrol	$Fk_u \geq FK$		Kontrol	$FK_R \geq FK$	
OK	$4.468 \geq 1.5$		OK	$7.749 \geq 1.5$	

3.4 Stabilitas Geser Rotasional

Faktor keamanan terhadap stabilitas geser rotasional dihitung dengan persamaan :

$$FK_u = \frac{MD}{MR}$$

$$FK_R = \frac{MR + Mr}{MD}$$

Tabel 5. Faktor Keamanan terhadap Geser Rotasional

Kondis	MR	MD	Mr	FK	Kontrol
Tanpa Perkuatan	33487.4	20809.3	38034.3	0.621	TIDAK OK
Dengan Perkuatan				3.437	OK

3.5 Stabilitas Lateral

3.5.1 Tahanan Putus

Faktor keamanan terhadap tahanan putus dihitung dengan persamaan: $FK = T_{ijin} / F$.

Tabel 6 Faktor Keamanan terhadap Tahanan Putus

No	Z	L	Pa	Pq2	W	q2L	W+q2L	e	σ_{vb}	σ_h	Sv	Sh	F	FK PUTUS	
	m	m	kPa	kPa			kPa	m	kPa	kPa	m	m	kN/m	Gx 160/50	
1	0.5	6	0.83	28.67	60.00	1042.50	1102.50	0.01	183.74	60.63	0.50	1.00	30.32	3.33	OK
2	1	6	3.30	57.34	120.00	1042.50	1162.50	0.03	193.70	63.92	0.50	1.00	31.96	3.16	OK
3	1.5	6	7.43	86.01	180.00	1042.50	1222.50	0.06	203.64	67.20	0.50	1.00	33.60	3.00	OK
4	2	6	13.20	114.68	240.00	1042.50	1282.50	0.10	213.56	70.47	0.50	1.00	35.24	2.86	OK
5	2.5	6	20.63	143.34	300.00	1042.50	1342.50	0.15	223.46	73.74	0.50	1.00	36.87	2.74	OK
6	3	6	29.70	172.01	360.00	1042.50	1402.50	0.21	233.34	77.00	0.50	1.00	38.50	2.62	OK
7	3.5	6	40.43	200.68	420.00	1042.50	1462.50	0.27	243.21	80.26	0.50	1.00	40.13	2.51	OK
8	4	6	52.80	229.35	480.00	1042.50	1522.50	0.35	253.05	83.51	0.50	1.00	41.75	2.42	OK
Gaya Tarik yang terjadi > Tijin ; Kurang tebal Lapisan												max F	=	2.42	

3.5.2 Tahanan Cabut

Faktor keamanan terhadap tahanan cabut dihitung dengan persamaan: $FK = \frac{Pc}{F}$.

Tabel 7. Faktor Keamanan terhadap Tahanan Cabut

NO	Z	F	Le	f	Pc	FK CABUT	
	m	kN/m	m	kPa	kN/m		
1	0.5	30.32	3.98	14.22	56.59	1.87	OK
2	1	31.96	4.27	28.44	60.70	1.90	OK
3	1.5	33.60	4.56	42.67	97.21	2.89	OK
4	2	35.24	4.85	56.89	137.82	3.91	OK
5	2.5	36.87	5.13	71.11	182.54	4.95	OK
6	3	38.89	5.42	85.33	231.37	5.95	OK
7	3.5	40.13	5.71	99.56	284.30	7.08	OK
8	4	41.75	6.00	113.78	341.33	8.17	OK

3.6 Stabilitas Eksternal / Stabilitas Gabion terhadap Guling dan Geser

Kestabilan gabion terhadap guling dan geser dihitung dengan persamaan:

$$FK \text{ Guling} = \frac{\text{Momen Penahan (MR)}}{\text{Momen Pendorong (Mo)}}$$

$$FK \text{ Geser} = \frac{\sum Rh}{\sum Pah}$$

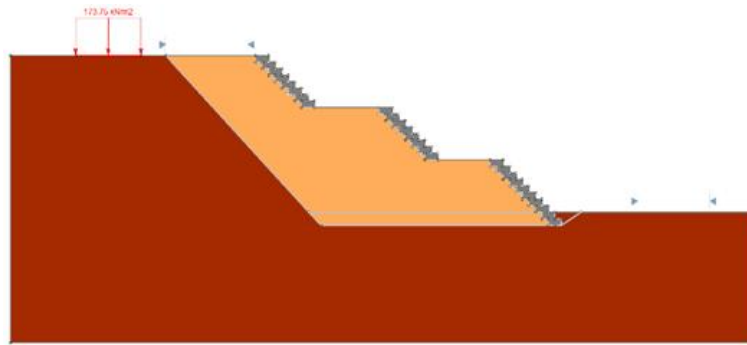
Hasil analisis kestabilan gabion terhadap guling dan geser ditampilkan pada Tabel 8 dan Tabel 9.

Tabel 8. Faktor Keamanan Gabion Trap 1 dan Trap 2 terhadap Guling dan Geser

Kestabilan Terhadap Guling	MR	MD	$\frac{\sum MR}{\sum Mo} > 2$	Faktor Keamanan	Kontrol
	557.333	71.111			
Kestabilan Terhadap Geser	$\sum rh$	$\sum Pah$	$\frac{\sum Rh}{\sum Pah} > 1.5$	Faktor Keamanan	Kontrol
	189.719	53.333			

Tabel 9. Faktor Keamanan Gabion Trap 3 terhadap Guling dan Geser

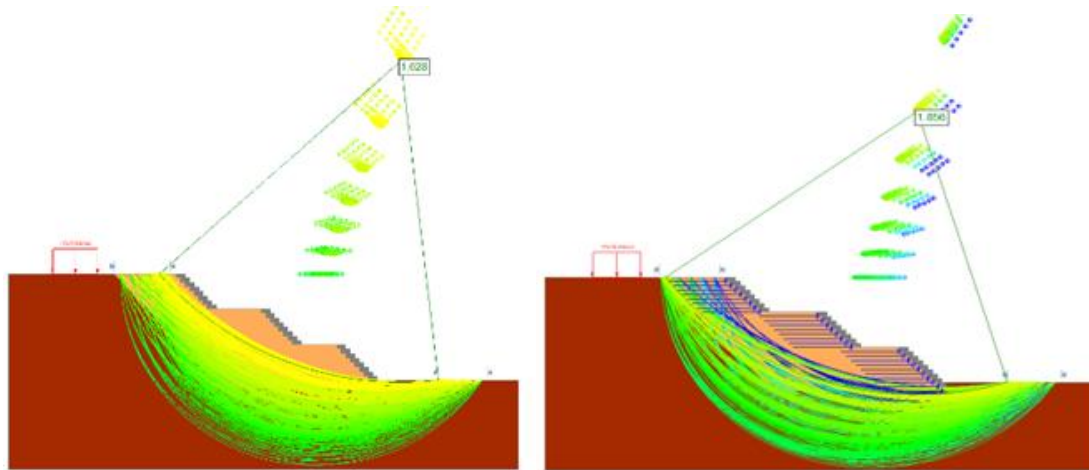
Kestabilan Terhadap Guling	MR	MD	$\frac{\sum MR}{\sum Mo} > 2$	Faktor Keamanan	Kontrol
	138.889	138.889			
Kestabilan Terhadap Geser	$\sum rh$	$\sum Pah$	$\frac{\sum Rh}{\sum Pah} > 1.5$	Faktor Keamanan	Kontrol
	256.403	83.333			



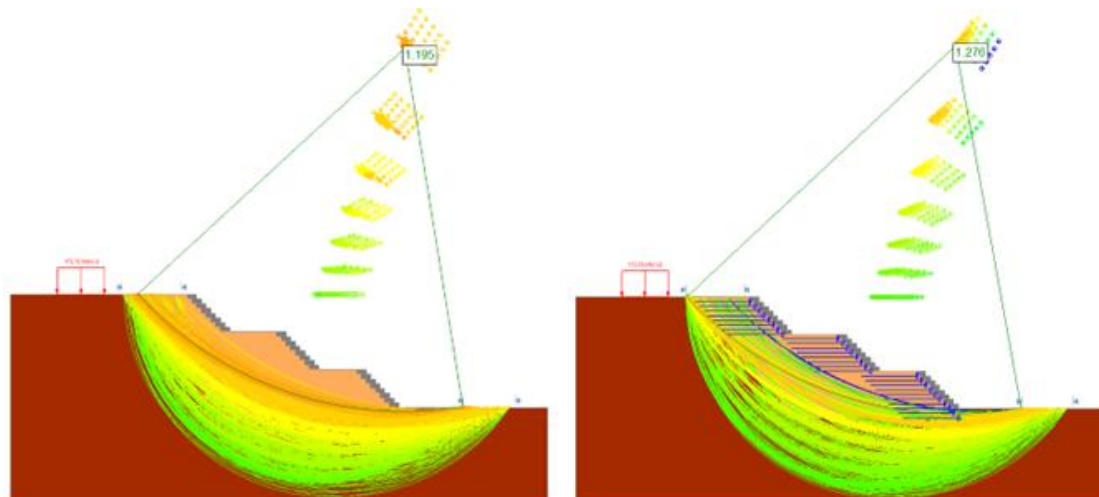
Gambar 4. Pemodelan Timbunan dengan Konstruksi Gabion pada SLIDE

3.7 Stabilitas Global

Kestabilan global dianalisis pada kondisi jangka panjang serta mempertimbangkan pengaruh beban gempa. Analisis kestabilan lereng timbunan dilakukan pada keadaan sebelum dan sesudah diberi sistem GRS dengan gabion sebagai pengaman lereng. Hasil analisis ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6, dan dirangkum pada Tabel 10 dan Tabel 11.



Gambar 5. Kestabilan Global Konstruksi Gabion: tanpa perkuatan GRS (kiri) dan dengan perkuatan GRS (kanan)



Gambar 6. Kestabilan Global Konstruksi Gabion dengan Beban Gempa: tanpa perkuatan GRS (kiri) dan dengan perkuatan GRS (kanan)

Tabel 10. Faktor Keamanan terhadap Kestabilan Global Konstruksi Gabion

	FK
Lereng timbunan tanpa perkuatan (<i>Unreinforcement</i>)	1.628
Lereng timbunan dengan perkuatan (<i>Reinforcement</i>)	1.856

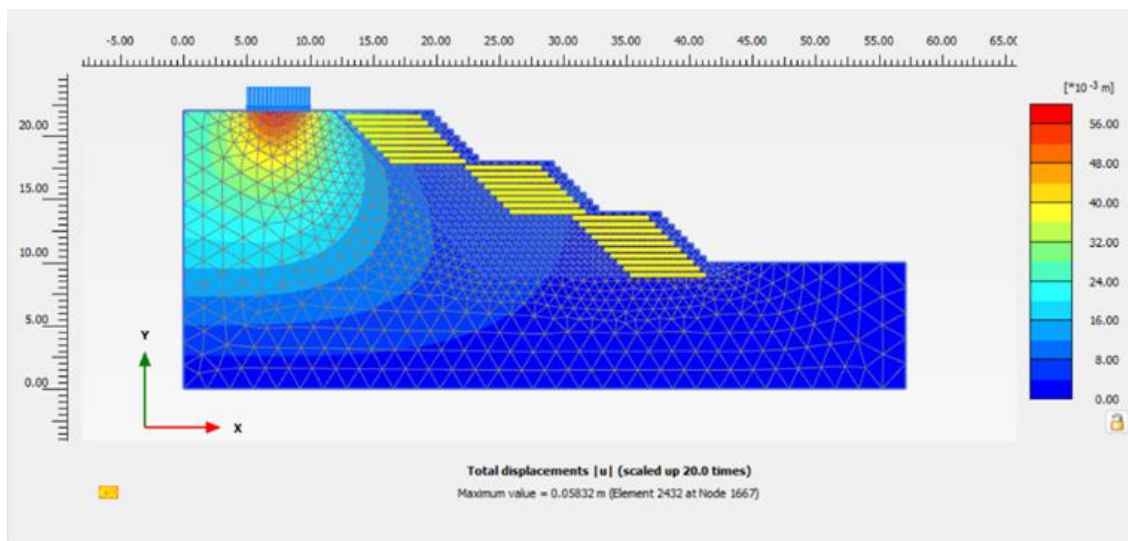
Tabel 11. Faktor Keamanan terhadap Kestabilan Global Konstruksi Gabion dengan Beban Gempa

	FK
Lereng timbunan tanpa perkuatan (<i>Unreinforcement</i>)	1.195
Lereng timbunan dengan perkuatan (<i>Reinforcement</i>)	1.276

3.8 Total Perpindahan

Analisis perpindahan dilakukan menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D untuk mengevaluasi respons deformasi lereng setelah diberikan perkuatan Geosynthetic Reinforced Soil (GRS). Analisis dilakukan pada kondisi drained atau jangka panjang, sehingga perilaku tanah yang dimodelkan mencerminkan kondisi setelah konsolidasi dan redistribusi tegangan berlangsung secara penuh.

Hasil analisis menunjukkan bahwa total displacement maksimum pada lereng yang telah diperkuat adalah sebesar 0,05832 m. Nilai ini menggambarkan perpindahan total yang terjadi akibat kombinasi deformasi vertikal dan horizontal pada massa tanah serta interaksi antara tanah dan geogrid. Pola deformasi yang dihasilkan PLAXIS 2D memperlihatkan bahwa pergerakan terbesar terjadi pada bagian atas lereng, sedangkan bagian bawah tetap relatif stabil—hal ini konsisten dengan mekanisme kerja geogrid yang memperkuat zona aktif.

**Gambar 7.** Perpindahan Total (*Total Displacement*)

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, perancangan timbunan dengan sistem perkuatan *Geosynthetic Reinforced Soil* (GRS) pada lereng pasca kegagalan di lokasi SPAM Rataan, Kelurahan Tosuraya Barat, Kabupaten Minahasa Tenggara terbukti efektif dalam meningkatkan kestabilan lereng. Secara geometrik, lereng hasil perancangan memiliki tinggi timbunan 13 m, lebar bawah 18,4993 m, lebar atas 6,917 m, serta konfigurasi bertahap dengan kemiringan tiap trap sebesar 42°.

Analisis stabilitas lereng eksisting menggunakan metode Bishop Simplified menunjukkan nilai faktor keamanan (FK) sebesar 2,711. Namun, kondisi lapangan yang telah mengalami longsor mengindikasikan bahwa parameter tanah aktual berbeda dari parameter awal. Melalui back analysis, diperoleh sudut geser dalam tanah (ϕ) sebesar 34,04° pada kondisi $FK \approx 1$, yang

merepresentasikan kondisi kritis saat kegagalan terjadi.

Penerapan sistem perkuatan GRS memberikan peningkatan signifikan terhadap stabilitas lereng. Faktor keamanan terhadap geser rotasional meningkat dari 0,621 menjadi 3,437, sedangkan daya dukung tanah meningkat dari 4,68 menjadi 7,749. Analisis stabilitas internal menunjukkan bahwa seluruh lapisan geogrid memenuhi persyaratan terhadap tahanan putus dan cabut. Pada stabilitas eksternal, diperoleh nilai faktor keamanan terhadap guling dan geser yang melebihi batas minimum 1,5, yaitu FK guling 7,837 dan FK geser 3,557 pada trap 1 dan 2, serta FK guling 7,524 dan FK geser 3,077 pada trap 3.

Analisis global menggunakan Slide 6.0 menunjukkan peningkatan FK dari 1,628 menjadi 1,856 pada kondisi akhir konstruksi dan tetap aman pada pembebanan akibat gempa. Sementara itu, analisis numerik menggunakan PLAXIS 2D menghasilkan deformasi total sebesar 0,05832 m dengan FK 1,830, yang menunjukkan bahwa deformasi masih berada dalam batas layan yang diizinkan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem perkuatan GRS mampu meningkatkan stabilitas lereng secara signifikan, baik dari aspek stabilitas internal, eksternal, maupun global, sehingga dapat dijadikan solusi yang efektif untuk rehabilitasi lereng pasca longsor pada lokasi SPAM Ratahan.

Referensi

- Adisulung, N., Legrans, R. I., & Sarajar, A. N. (2025). Studi kestabilan tanggul pengaman Danau Tondano dengan perkuatan geosintetik. *TEKNO*, Vol. 23, No. 91, 53–60.
- Anderson, M. G., & Richards, K. S. (1987). *Slope Stability: Geotechnical Engineering and Geomorphology*. Wiley.
- Ansori, E., & Gofar, N. (2025). Analisis stabilitas dinding penahan tanah tipe *Mechanically Stabilized Earth (MSE)* pada Jalan Layang Bantaian Sumatera Selatan. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, Vol. 8, No. 3, 659–670.
- Badan Geologi. (2021). *Peta Rawan Longsor Indonesia*. Kementerian ESDM.
- Brandon, T. L., et al. (1991). Correlation between plasticity index and residual shear strength. *Journal of Geotechnical Engineering*.
- Braja, M. D. (1985). *Principles of Geotechnical Engineering*. PWS-Kent Publishing.
- Braja, M. D. (2011). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik)*. Erlangga.
- Christopher, B. R., et al. (2000). *Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes*. FHWA.
- Da, X. (2015). Back analysis in slope stability. *Journal of Geotechnical Research*.
- Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga – Direktorat Bina Teknik. (2009). *Pedoman Perencanaan dan Pelaksanaan Perkuatan Tanah dengan Geosintetik*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Filz, G. M., et al. (2001). Procedures for back analysis of slope failures. ASCE.
- Holtz, R. D. (1998). *Geosynthetics in Geotechnical Engineering*. McGraw-Hill.
- Jewell, R. A., et al. (1984). Soil reinforcement with geogrids. *Proceedings of the Symposium on Polymer Grid Reinforcement*.
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with Geosynthetics*. Bloomington: Xlibris Corporation.
- Legrans, R. I. (2016). Pengaruh jenis tanah terhadap kestabilan dinding MSE dengan perkuatan geotekstil di daerah reklamasi Malalayang. *TEKNO*, Vol. 14, No. 66, 34–43.
- Martiani, D., Arif, S., & Wahyudi, A. (2021). Perbaikan lereng pasca longsor menggunakan sistem perkuatan. *Jurnal Teknik Sipil*.
- PLAXIS 2D User Manual. (2024). *PLAXIS Geotechnical Finite Element Software*. Bentley Systems.
- Prasatio, R., & Rismalinda. (2019). Teknik pelaksanaan timbunan dalam rekayasa jalan. *Jurnal Infrastruktur*.
- Purushotmaraj, et al. (1974). Bearing capacity of layered soils. *Geotechnical Journal*.
- Ramli. (2014). Daya dukung tanah untuk struktur bangunan. *Jurnal Teknik Sipil*.
- Rekzyanti, R., Balamba, S., & Manaroinson, L. (2016). Analisa kestabilan lereng akibat gempa. *Jurnal Tekno*, 14.
- SNI 8460:2017. *Perancangan Dinding Tanah yang Diperkuat dengan Geosintetik*. Badan Standardisasi Nasional.
- Spesifikasi Umum Bina Marga. (2018). *Divisi Pekerjaan Tanah dan Timbunan*. Kementerian PUPR.
- Tatsuoka, F. (1980-an). Research on GRS walls and GRS-IBS systems. University of Tokyo.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley.
- Vidal, H. (1963). La Terre Armée: Reinforced earth concept. *Annales des Travaux Publics*.
- Voight, B. (1973). Relationship between plasticity index and residual strength. *Geotechnique*.

- Wenas, E. G. F., Legrans, R. I., & Rondonuwu, S. G. (2025). Analisis daya dukung fondasi dangkal dengan perkuatan geogrid. *TEKNO*, Vol. 23, No. 91, 563–569.
- Zulfiqar, M. (2024). Pengaruh perkuatan geogrid terhadap stabilitas lereng tanah lunak. Skripsi. Universitas Jambi.