



Analisis Kestabilan Lereng Galian Pada Area PLTP Tawa Songa Halmahera Selatan

Dika G. Tandialo^{#a}, Roski R. I. Legrans^{#b}, Alva N. Sarajar^{#c}[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
^adikatandialo021@student.unsrat.ac.id, ^blegransroski@unsrat.ac.id, ^calva.sarajar@unsrat.ac.id**Abstrak**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan lereng galian di area PLTP Tawa Songa, Halmahera Selatan, baik pada kondisi awal maupun setelah penerapan perkuatan. Analisis dilakukan menggunakan metode Bishop Simplified dan Morgenstern-Price dengan bantuan perangkat lunak Rocscience Slide V.6, mencakup empat kondisi: (1) lereng dalam kondisi undrained ($\phi = 0$) tanpa muka air tanah (MAT), (2) lereng dalam kondisi undrained ($\phi = 0$) dengan MAT, (3) kondisi drained dengan MAT, serta (4) kondisi drained dengan pengaruh beban gempa. Hasil analisis pada kondisi awal tanpa perkuatan menunjukkan bahwa nilai Faktor Keamanan (FK) berdasarkan metode Bishop Simplified berada pada rentang 0,749–1,400, sedangkan metode Morgenstern-Price menghasilkan nilai FK 0,753–1,571. Nilai tersebut belum sepenuhnya memenuhi kriteria stabilitas yang disyaratkan oleh SNI 8460:2017, yaitu FK statis $\geq 1,5$ dan FK dinamis $\geq 1,1$. Setelah penerapan perkuatan dengan metode soil nailing, nilai FK mengalami peningkatan signifikan. Pada kondisi statis, nilai FK menggunakan metode Bishop Simplified dan Morgenstern-Price masing-masing mencapai 1,885 dan 1,822 pada lereng H1, 1,780 dan 1,785 pada lereng H2, serta 2,209 dan 2,216 pada lereng H3. Pada kondisi dinamis dengan pengaruh beban gempa, nilai FK meningkat menjadi 1,223 dan 1,250 pada lereng H1, 1,148 dan 1,180 pada lereng H2, serta 1,455 dan 1,506 pada lereng H3. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan perkuatan soil nailing mampu meningkatkan stabilitas lereng sehingga seluruh lereng memenuhi standar keamanan statis dan dinamis sesuai SNI 8460:2017. Temuan ini menegaskan pentingnya penerapan perkuatan lereng dalam mendukung keberlanjutan operasional PLTP serta meminimalkan risiko kegagalan geoteknik.

Kata kunci: stabilitas lereng, faktor keamanan, soil nailing, PLTP

1. Pendahuluan

Permukaan tanah tidak selalu membentuk bidang datar, melainkan sering kali memiliki perbedaan elevasi antar lokasi sehingga membentuk suatu lereng (slope). Lereng merupakan kondisi topografi yang umum dijumpai pada berbagai pekerjaan konstruksi sipil, baik terbentuk secara alami maupun sengaja dibuat oleh manusia untuk tujuan tertentu (Sihite, 2021).

Dalam konteks lereng, permasalahan utama yang sering terjadi adalah tanah longsor. Longsor merupakan pergerakan massa tanah yang meluncur menuruni lereng akibat gaya dorong tanah lebih besar daripada gaya penahan lereng. Fenomena ini termasuk salah satu bencana alam yang sering terjadi di Indonesia, terutama pada musim penghujan dan di wilayah berbukit atau dataran tinggi dengan lereng curam serta kondisi tanah yang memiliki kestabilan rendah (Subagio & Kuningsih, 2019).

Proyek PLTP Tawa Songa, Halmahera Selatan terletak di kawasan pegunungan, sehingga kegiatan galian pada lereng berpotensi besar memengaruhi kestabilan tanah di sekitarnya. Apabila lereng galian tidak direncanakan dan dianalisis dengan baik, maka dapat menimbulkan kelongsoran yang membahayakan keselamatan pekerja, merusak fasilitas proyek, serta mengganggu kelancaran operasional.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi stabilitas lereng galian di wilayah PLTP Tawa Songa, Halmahera Selatan, dengan tujuan menentukan nilai faktor keamanan (FK) lereng sebelum dan sesudah penerapan perkuatan. Untuk mendukung analisis,

telah dilakukan pengeboran serta uji laboratorium di lokasi penelitian guna memperoleh data geoteknik yang diperlukan.

2. Metodologi Penelitian

2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan analisis numerik yang dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Rocscience Slide V.6 melalui pendekatan Limit Equilibrium Method (LEM). Tujuan utama penelitian adalah mengevaluasi kestabilan lereng galian pada area PLTP Tawa Songa, Halmahera Selatan.

Metode analisis yang digunakan adalah Bishop Simplified dan Morgenstern-Price, yang keduanya dipilih untuk memperoleh nilai Faktor Keamanan (Factor of Safety, FK) serta memungkinkan perbandingan hasil berdasarkan pendekatan perhitungan yang berbeda. Fokus penelitian diarahkan pada penentuan apakah kondisi lereng berada dalam keadaan stabil atau tidak berdasarkan nilai FK yang diperoleh.

Apabila hasil analisis menunjukkan bahwa lereng tidak stabil, maka dilakukan analisis lanjutan untuk menentukan alternatif perkuatan yang sesuai. Perkuatan tersebut diharapkan mampu meningkatkan nilai FK sehingga lereng memenuhi kriteria keamanan yang ditetapkan, baik untuk kondisi statis maupun dinamis sesuai standar yang berlaku.

2.2. Metode Limit Equilibrium Method (LEM)

Metode keseimbangan batas (*Limit Equilibrium Method/LEM*) digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng dengan mengevaluasi keseimbangan antara gaya penggerak dan gaya penahan pada bidang gelincir potensial. Analisis ini bertujuan untuk memperoleh nilai faktor keamanan (*Factor of Safety/FK*) sebagai indikator kondisi kestabilan lereng. Dalam penelitian ini, analisis dilakukan menggunakan metode Bishop Simplified dan Morgenstern-Price yang merupakan bagian dari LEM, dengan pertimbangan sebagai berikut:

1. Analisis Keseimbangan Lereng

Kedua metode digunakan untuk menghitung faktor keamanan berdasarkan keseimbangan gaya dan/atau momen pada massa tanah yang dibagi menjadi beberapa irisan (*slice*), sehingga bidang gelincir kritis dapat diidentifikasi.

2. Metode Bishop Simplified

Metode ini menganalisis kestabilan lereng dengan membagi massa tanah menjadi beberapa irisan (*slice*) dan memenuhi keseimbangan momen pada masing-masing irisan. Gaya geser antar irisan diabaikan, sehingga perhitungannya lebih sederhana. Metode ini banyak digunakan karena mampu memberikan hasil yang cukup akurat untuk analisis kestabilan lereng secara umum.

3. Metode Morgenstern-Price

Metode ini merupakan pengembangan dari LEM yang memenuhi keseimbangan gaya dan momen secara simultan pada setiap irisan tanah. Selain itu, metode ini mempertimbangkan gaya interaksi antar irisan melalui fungsi distribusi gaya, sehingga menghasilkan analisis yang lebih teliti dan representatif terhadap kondisi sebenarnya.

4. Evaluasi Kestabilan Lereng

Nilai faktor keamanan yang diperoleh digunakan untuk menentukan kondisi lereng, apakah berada dalam keadaan stabil atau tidak sesuai dengan kriteria yang ditetapkan.

2.3 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 serta memberikan gambaran mengenai kondisi stratigrafi dan tingkat kepadatan tanah di lokasi penelitian.
- Data uji laboratorium digunakan untuk memperoleh parameter geoteknik tanah, yaitu berat isi (γ), kohesi (c), dan sudut geser dalam (ϕ).

Parameter-parameter tersebut selanjutnya dijadikan input utama dalam analisis kestabilan lereng menggunakan perangkat lunak Rocscience Slide V.6 dengan metode Bishop Simplified dan Morgenstern-Price. Dengan demikian, data sekunder yang diperoleh mampu memberikan dasar yang cukup untuk mengevaluasi kondisi stabilitas lereng baik sebelum maupun sesudah penerapan perkuatan.

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari PT Intimkara berupa hasil penyelidikan tanah di area PLTP Tawa Songa, Halmahera Selatan, yang meliputi data *Standard Penetration Test* (SPT) dan uji laboratorium. Data SPT digunakan untuk identifikasi lapisan tanah, sedangkan data uji laboratorium digunakan untuk memperoleh parameter geoteknik tanah berupa berat isi (γ), kohesi (c), dan sudut geser dalam (ϕ) yang selanjutnya digunakan sebagai input dalam analisis kestabilan lereng.

2.3.1 Data Tanah

Pemodelan tanah pada penelitian ini menggunakan kriteria keruntuhan Mohr–Coulomb yang menjelaskan bahwa kekuatan tanah dikontrol oleh sifat geser tanah. Data tanah yang digunakan diperoleh dari hasil uji laboratorium. Analisis dilakukan dalam dua kondisi, yaitu *undrained* dan *drained*, untuk merepresentasikan kondisi jangka pendek dan jangka panjang terhadap kestabilan lereng. Data tersebut digunakan sebagai input dalam analisis kestabilan lereng dengan pendekatan *Limit Equilibrium Method* (LEM). Parameter tanah yang digunakan adalah sebagai berikut:

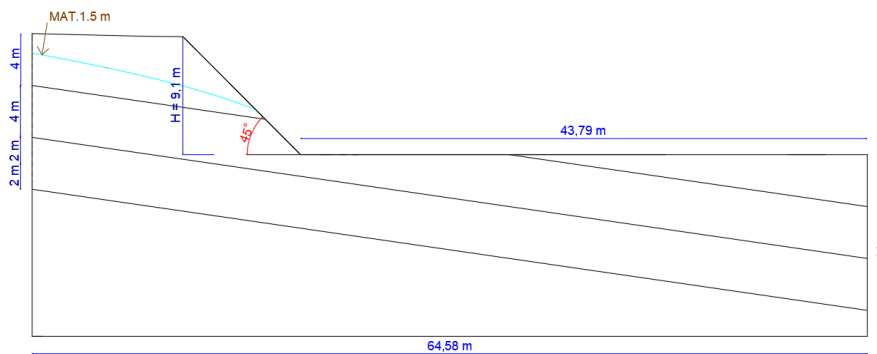
- Data Tanah BH 14
 - 1) Lapisan 1 (Tanah Berpasir, berbatu. Warna : Abu-abu coklat)
 - Berat isi tak jenuh (γ_{unsat}) = 17.07 kN/m³
 - Berat isi jenuh (γ_{sat}) = 21.31 kN/m³
 - Sudut geser dalam (ϕ) = 36.71°
 - Kohesi tanah (C) = 3 kN/m²
 - Kohesi tak terdrainase (Cu) = 30 kN/m²
 - 2) Lapisan 2 (Tanah Berpasir Padat. Warna : Coklat)
 - Berat isi tak jenuh (γ_{unsat}) = 17.07 kN/m³
 - Berat isi jenuh (γ_{sat}) = 21.31 kN/m³
 - Sudut geser dalam (ϕ) = 36.71°
 - Kohesi tanah (C) = 3 kN/m²
 - Kohesi tak terdrainase (Cu) = 30 kN/m²
 - 3) Lapisan 3 (Tanah Berbatu Halus, Sedang. Warna : Abu-abu hitam)
 - Berat isi tak jenuh (γ_{unsat}) = 17.76 kN/m³
 - Berat isi jenuh (γ_{sat}) = 23.19 kN/m³
 - Sudut geser dalam (ϕ) = 44.64°
 - Kohesi tanah (C) = 2.8 kN/m²
 - Kohesi tak terdrainase (Cu) = 28 kN/m²
 - 4) Lapisan 4 (Tanah Berpasir, Berbatu Halus. Warna : Abu-abu Coklat)
 - Berat isi tak jenuh (γ_{unsat}) = 17.85 kN/m³
 - Berat isi jenuh (γ_{sat}) = 20.76 kN/m³
 - Sudut geser dalam (ϕ) = 42.99°
 - Kohesi tanah (C) = 8.21 kN/m²
 - Kohesi tak terdrainase (Cu) = 82.1 kN/m²
- Data Tanah BH 14
 - 1) Lapisan 1 (Tanah berpasir, berbatu halus sedang. Warna : Kecoklatan)
 - Berat isi tak jenuh (γ_{unsat}) = 17.46 kN/m³
 - Berat isi jenuh (γ_{sat}) = 21.47 kN/m³
 - Sudut geser dalam (ϕ) = 36.53°
 - Kohesi tanah (C) = 5.07 kN/m²
 - Kohesi tak terdrainase (Cu) = 50.7 kN/m²
 - 2) Lapisan 2 (Tanah berpasir, berbatu halus sedang. Warna : Coklat Kehitaman)
 - Berat isi tak jenuh (γ_{unsat}) = 17.56 kN/m³
 - Berat isi jenuh (γ_{sat}) = 20.85 kN/m³
 - Sudut geser dalam (ϕ) = 39.6°

- Kohesi tanah (C) = 6.97 kN/m²
- Kohesi tak terdrainase (Cu) = 69.7 kN/m²
- 3) Lapisan 3 (Tanah berpasir, berbatu halus. Warna : Abu-abu)
 - Berat isi tak jenuh (γ_{unsat}) = 17.76 kN/m³
 - Berat isi jenuh (γ_{sat}) = 22.84 kN/m³
 - Sudut geser dalam (ϕ) = 43.27°
 - Kohesi tanah (C) = 3.6 kN/m²
 - Kohesi tak terdrainase (Cu) = 36 kN/m²

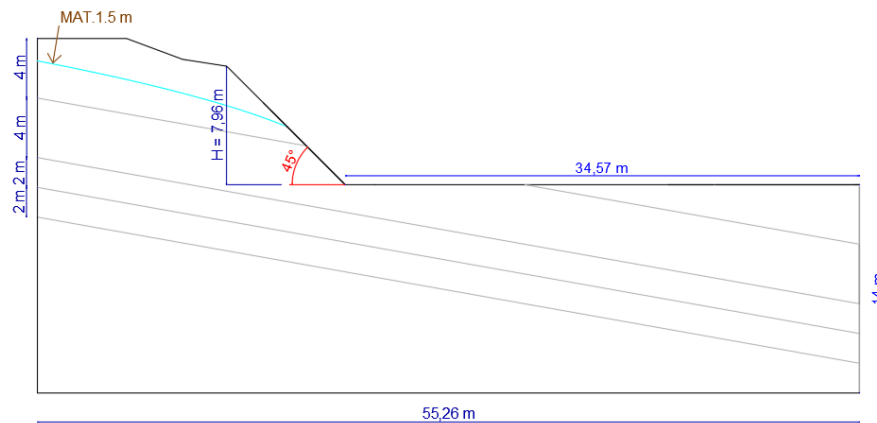
Data tanah yang telah diperoleh selanjutnya digunakan sebagai input dalam pemodelan kestabilan lereng untuk menentukan nilai faktor keamanan serta mengidentifikasi kondisi lereng apakah memenuhi syarat kestabilan atau tidak.

2.3.2 Geometri Lereng

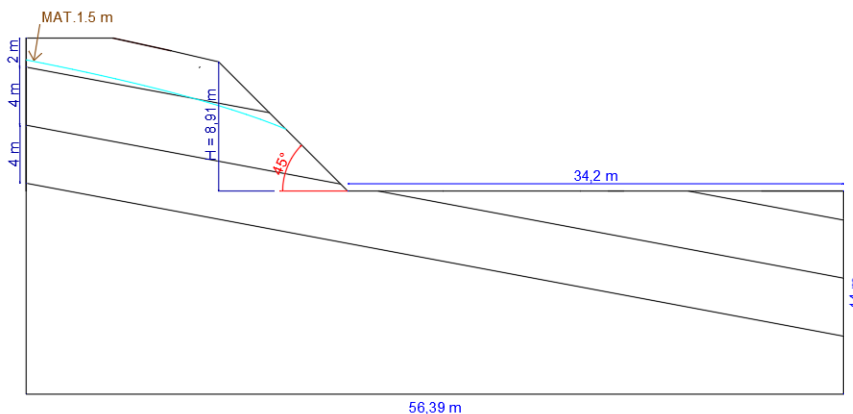
Berikut ini adalah geometri lereng yang digunakan dalam analisis. Kemiringan lereng ini sesuai dengan rencana pemanfaatan lahan untuk PLTP Tawa Songa Halmahera Selatan.



Gambar 1. Geometri Lereng H1



Gambar 2. Geometri Lereng H2



Gambar 3. Geometri Lereng H3

2.4 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini disusun secara sistematis untuk menganalisis kestabilan lereng serta mengevaluasi kebutuhan perkuatan yang diperlukan. Proses penelitian dilakukan melalui beberapa langkah utama, yaitu: Pertama, dilakukan pengumpulan data penelitian berupa data hasil penyelidikan tanah dan uji laboratorium yang menjadi dasar penentuan parameter geoteknik. Selanjutnya, dilakukan pemodelan geometri lereng menggunakan perangkat lunak Rocscience Slide V.6 untuk merepresentasikan kondisi aktual lereng galian di area PLTP Tawa Songa.

Tahap berikutnya adalah analisis kondisi lereng, baik dalam keadaan undrained maupun drained, dengan mempertimbangkan keberadaan muka air tanah serta pengaruh beban gempa. Analisis kestabilan lereng kemudian dilakukan menggunakan metode Bishop Simplified dan Morgenstern-Price untuk memperoleh nilai Faktor Keamanan (FK).

Setelah itu, dilakukan evaluasi nilai FK untuk menentukan apakah lereng memenuhi kriteria stabilitas sesuai standar yang berlaku. Apabila hasil analisis menunjukkan bahwa lereng tidak stabil, maka dilanjutkan dengan analisis perkuatan lereng guna meningkatkan nilai FK sehingga lereng dapat memenuhi persyaratan keamanan baik pada kondisi statis maupun dinamis.

2.5 Perkuatan Lereng

Perkuatan lereng dilakukan menggunakan metode soil nailing apabila hasil analisis menunjukkan bahwa lereng berada dalam kondisi tidak stabil. Perencanaan awal (pre-design) mengacu pada metode FHWA dengan pendekatan design chart untuk menentukan parameter perkuatan, meliputi panjang nail, spasi vertikal, spasi horizontal, serta diameter baja atau nail yang digunakan.

Metode soil nailing dipilih karena terbukti efektif dalam meningkatkan stabilitas lereng melalui mekanisme penambahan gaya penahan pada massa tanah. Prinsip kerja soil nail adalah memotong bidang gelincir dan memobilisasi gaya tarik ketika terjadi deformasi pada massa tanah. Gaya tarik tersebut berfungsi sebagai elemen perkuatan yang menahan pergerakan massa tanah, sehingga kapasitas tahan geser lereng meningkat.

Dengan adanya kontribusi gaya tarik dari soil nailing, nilai Faktor Keamanan (FK) dapat ditingkatkan hingga memenuhi kriteria stabilitas yang disyaratkan, baik untuk kondisi statis maupun dinamis. Oleh karena itu, soil nailing menjadi salah satu alternatif perkuatan yang relevan dan aplikatif pada proyek PLTP Tawa Songa, Halmahera Selatan, untuk menjamin keberlanjutan operasional serta keselamatan konstruksi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Analisis Lereng Galian

Berdasarkan rekapitulasi faktor keamanan (FK) pada Tabel 1 sebelum perkuatan, dapat dijelaskan kondisi masing-masing lereng (H1–H3) dengan memperhatikan jenis analisis (undrained dan drained) serta metode perhitungan (Bishop Simplified dan Morgenstern-Price):

1. Lereng H1

- Pada kondisi undrained ($\phi = 0$) baik tanpa maupun dengan muka air tanah, nilai FK yang diperoleh melalui metode Bishop Simplified maupun Morgenstern-Price berada di bawah standar SNI (FK statis $\geq 1,5$; FK dinamis $\geq 1,1$). Hal ini menunjukkan bahwa lereng H1 tidak stabil pada kondisi jangka pendek.
- Pada kondisi drained dengan muka air tanah, nilai FK juga relatif rendah, terutama dengan metode Bishop Simplified, sehingga statusnya “TIDAK MEMENUHI”.
- Pada kondisi drained dengan beban gempa, nilai FK semakin menurun, menegaskan bahwa lereng H1 sangat rentan terhadap pengaruh dinamis.

2. Lereng H2

- Sama halnya dengan H1, pada kondisi undrained baik tanpa maupun dengan muka air tanah, nilai FK dari kedua metode analisis masih di bawah ambang batas.
- Pada kondisi drained dengan muka air tanah, hasil Bishop Simplified dan Morgenstern-Price menunjukkan FK yang tidak memenuhi kriteria, meskipun sedikit lebih tinggi dibandingkan H1.

- Pada kondisi drained dengan beban gempa, nilai FK semakin menurun, sehingga lereng H2 tetap dikategorikan tidak stabil.
3. Lereng H3
- Pada kondisi undrained tanpa muka air tanah, metode Morgenstern-Price menghasilkan nilai FK yang mendekati atau memenuhi kriteria stabilitas, sehingga pada tabel ditandai “MEMENUHI”.
 - Namun, pada kondisi undrained dengan muka air tanah, nilai FK kembali turun di bawah standar, baik dengan Bishop Simplified maupun Morgenstern-Price.
 - Pada kondisi drained dengan muka air tanah dan drained dengan beban gempa, nilai FK juga tidak memenuhi kriteria, meskipun lebih tinggi dibandingkan H1 dan H2.

Tabel 1. Rekapitulasi FK untuk 4 Kondisi Analisis

Rekapitulasi Faktor Keamanan (FK) untuk 4 Kondisi Analisis Sebelum Perkuatan									
Lereng	Metode	Kondisi	Analisis	Hasil Analisis					
				FK	FK IJIN	KETERANGAN			
H1	Bishop Simplified	Statis	Undrained	1,079	1,5	TIDAK MEMENUHI			
			Undrained + W	1,007		TIDAK MEMENUHI			
			Drained	1,094		TIDAK MEMENUHI			
		Dinamis	Drained	0,749		1,1	TIDAK MEMENUHI		
			Morgenstern-Price	Statis		Undrained	1,107	1,5	TIDAK MEMENUHI
						Undrained + W	1,047	TIDAK MEMENUHI	
	Drained	1,086			TIDAK MEMENUHI				
	Dinamis	Drained	0,753	1,1	TIDAK MEMENUHI				
	H2	Bishop Simplified	Statis	Undrained	1,057	1,5	TIDAK MEMENUHI		
Undrained + W				0,984	TIDAK MEMENUHI				
Drained				1,117	TIDAK MEMENUHI				
Dinamis			Drained	0,769	1,1		TIDAK MEMENUHI		
			Morgenstern-Price	Statis	Undrained		1,095	1,5	TIDAK MEMENUHI
					Undrained + W		1,037	TIDAK MEMENUHI	
Drained		1,108			TIDAK MEMENUHI				
Dinamis		Drained	0,772	1,1	TIDAK MEMENUHI				
H3		Bishop Simplified	Statis	Undrained	1,4	1,5	TIDAK MEMENUHI		
	Undrained + W			1,271	TIDAK MEMENUHI				
	Drained			1,374	TIDAK MEMENUHI				
	Dinamis		Drained	0,953	1,1		TIDAK MEMENUHI		
			Morgenstern-Price	Statis	Undrained		1,571	1,5	MEMENUHI
					Undrained + W		1,387	TIDAK MEMENUHI	
	Drained	1,372			TIDAK MEMENUHI				
	Dinamis	Drained	0,961	1,1	TIDAK MEMENUHI				

Berdasarkan hasil rekapitulasi faktor keamanan (FK) sebelum perkuatan, dapat disimpulkan bahwa kondisi lereng H1 hingga H3 pada umumnya belum memenuhi standar stabilitas sesuai SNI 8460:2017. Pada lereng H1, baik analisis undrained maupun drained dengan metode Bishop Simplified maupun Morgenstern-Price menunjukkan nilai FK yang berada di bawah ambang batas, terutama ketika dipengaruhi oleh muka air tanah dan beban gempa, sehingga lereng ini dikategorikan tidak stabil.

Lereng H2 memperlihatkan pola serupa, di mana nilai FK pada kondisi undrained maupun drained tetap tidak memenuhi kriteria, meskipun sedikit lebih tinggi dibandingkan H1, sehingga lereng ini juga tidak stabil. Lereng H3 menunjukkan hasil yang relatif lebih baik; pada kondisi undrained tanpa muka air tanah dengan metode Morgenstern-Price, nilai FK memenuhi kriteria stabilitas, namun pada kondisi lain, baik undrained dengan muka air tanah maupun drained dengan pengaruh gempa, nilai FK tetap berada di bawah standar.

Dengan demikian, secara keseluruhan dapat ditegaskan bahwa sebelum dilakukan perkuatan, lereng H1 dan H2 sepenuhnya tidak stabil, sedangkan lereng H3 hanya stabil pada satu kondisi tertentu. Hal ini menegaskan perlunya penerapan perkuatan seperti soil nailing agar seluruh lereng memenuhi kriteria keamanan baik pada kondisi statis maupun dinamis.

3.2 Perkuatan Soil Nailing

Perkuatan lereng dilakukan menggunakan metode soil nailing sebagai tindak lanjut dari hasil analisis stabilitas yang menunjukkan bahwa ketiga lereng (H1–H3) belum memenuhi

kriteria faktor keamanan sesuai standar. Perencanaan kekuatan mengacu pada metode FHWA dengan pendekatan design chart untuk menentukan parameter utama kekuatan, yaitu panjang nail (L), spasi vertikal (S_v), spasi horizontal (S_h), serta diameter baja yang digunakan.

Dalam penelitian ini, sudut pemasangan soil nail ditetapkan sebesar 10° terhadap horizontal, sesuai dengan ketentuan dalam SNI 8460:2017 yang dijadikan acuan dalam desain kekuatan. Pemilihan sudut tersebut bertujuan untuk memastikan soil nail mampu memotong bidang gelincir secara efektif sehingga dapat memobilisasi gaya tarik ketika terjadi deformasi pada massa tanah.

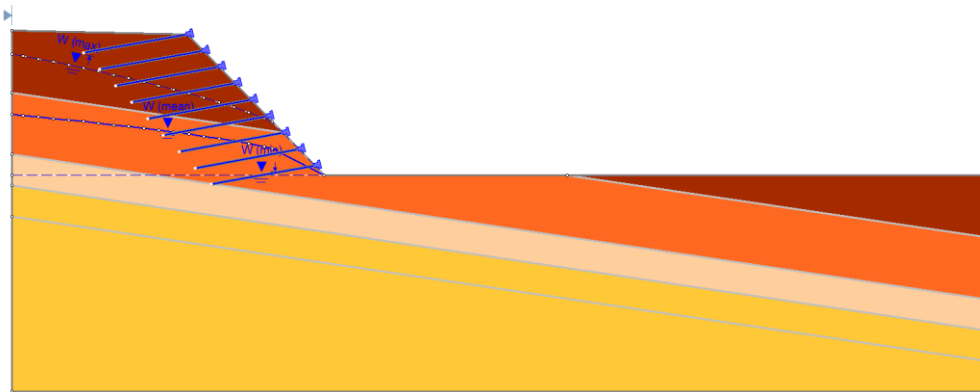
Mekanisme kerja soil nailing didasarkan pada kontribusi gaya tarik yang dihasilkan oleh nail sebagai elemen kekuatan. Gaya tarik ini berfungsi menahan pergerakan massa tanah dan meningkatkan kapasitas tahan geser lereng. Dengan adanya tambahan gaya penahan dari soil nailing, nilai Faktor Keamanan (FK) meningkat sehingga lereng dapat memenuhi kriteria stabilitas baik pada kondisi statis maupun dinamis.

Tabel 2. Parameter Desain Soil Nailing

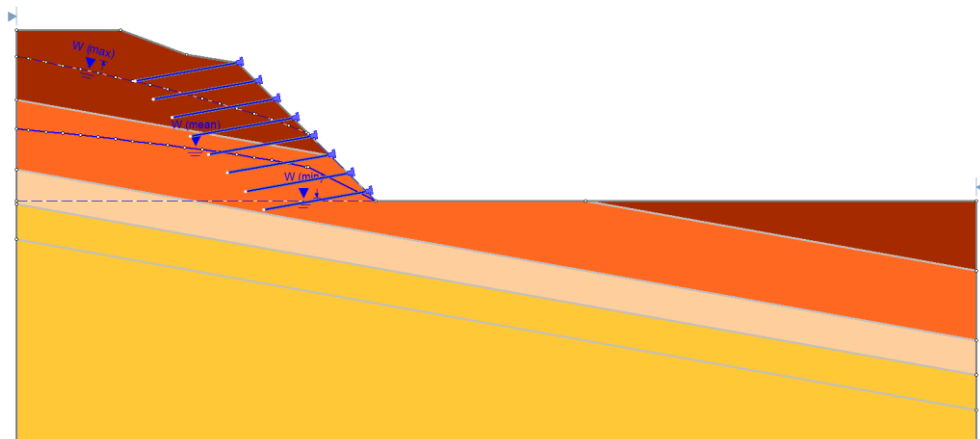
Lereng (m)	L (m)	S_h (m)	S_v (m)	d (mm)	f_y (Mpa)
H1	7	1,5	1,5	19	420
H2	6	1,5	1,5	19	
H3	6,5	1,5	1,5	19	

3.2.1. Perhitungan Stabilitas Internal Nail pada Lereng H1, H2, H3

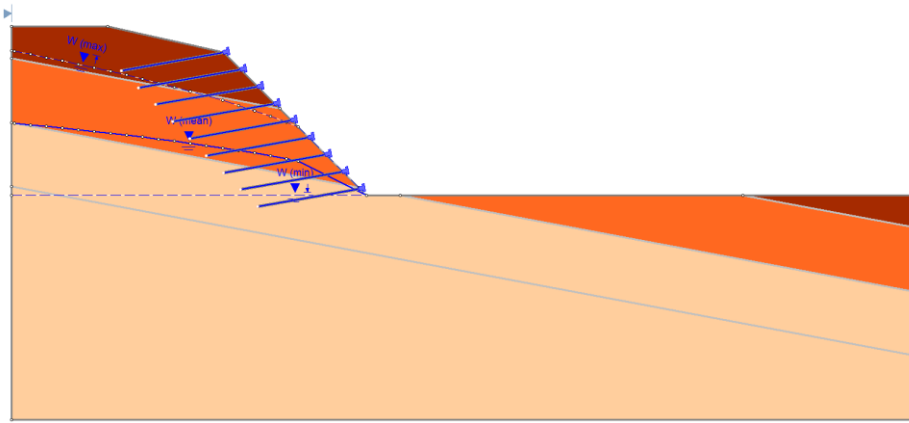
Parameter kekuatan yang diperoleh dari hasil perencanaan soil nailing selanjutnya dilakukan pengecekan stabilitas internal nail untuk memastikan kapasitas kekuatan memenuhi kriteria desain. Pengecekan ini penting karena meskipun soil nail mampu meningkatkan faktor keamanan lereng secara keseluruhan, setiap elemen nail harus memiliki kapasitas yang cukup untuk menahan gaya tarik yang timbul akibat deformasi massa tanah.



Gambar 4. Lereng H1 Setelah Perkuatan Soil Nailing



Gambar 5. Lereng H2 Setelah Perkuatan Soil Nailing



Gambar 6. Lereng H3 Setelah Perkuatan Soil Nailing

1. Kontrol Kapasitas Putus Nail Lereng H1, H2 dan H3

Tabel 3. Rekapitulasi Kapasitas Putus Nail Setiap Lereng

Tabel Kontrol Kapasitas Putus Nail								
Lereng H1			Lereng H2			Lereng H3		
Nail	Fr	Cek	Nail	Fr	Cek	Nail	Fr	Cek
1	9,19	OK	1	4,73	OK	1	4,65	OK
2	5,19	OK	2	3,78	OK	2	4,00	OK
3	3,61	OK	3	3,13	OK	3	3,22	OK
4	2,77	OK	4	2,65	OK	4	2,69	OK
5	2,25	OK	5	2,22	OK	5	2,32	OK
6	1,89	OK	6	1,91	OK	6	2,03	OK
7	1,62	NOT OK	7	1,77	NOT OK	7	2,13	OK
8	1,52	NOT OK	8	1,77	NOT OK	8	2,12	OK
9	2,19	OK				9	2,12	OK

Berdasarkan hasil kontrol kapasitas putus nail pada Tabel 3, dapat dijelaskan bahwa kondisi internal nail pada masing-masing lereng menunjukkan variasi kinerja yang berbeda. Pada lereng H1, sebagian besar nail memiliki kapasitas tarik yang memenuhi kriteria desain dengan status “OK”, namun terdapat beberapa nail yang ditandai “NOT OK”. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun secara umum soil nail mampu bekerja efektif, terdapat elemen tertentu yang kapasitas tariknya belum mencukupi sehingga berpotensi menjadi titik lemah dalam sistem perkuatan.

Pada lereng H2, pola yang muncul serupa dengan H1. Sebagian besar nail dinyatakan “OK”, tetapi terdapat beberapa nail yang tidak memenuhi kriteria dengan status “NOT OK”. Kondisi ini menegaskan bahwa meskipun perkuatan secara keseluruhan dapat meningkatkan stabilitas lereng, diperlukan perhatian khusus pada nail yang gagal memenuhi kapasitas agar tidak mengurangi efektivitas sistem secara keseluruhan.

Sementara itu, pada lereng H3, hasil pengecekan menunjukkan bahwa seluruh nail memiliki kapasitas tarik yang memenuhi kriteria desain dengan status “OK”. Hal ini menandakan bahwa soil nailing pada lereng H3 bekerja optimal dan tidak terdapat elemen yang menjadi titik kritis.

Secara keseluruhan, hasil kontrol kapasitas putus nail menunjukkan bahwa lereng H1 dan H2 masih memiliki beberapa nail yang perlu diperhatikan karena kapasitasnya belum memenuhi standar, sedangkan lereng H3 sepenuhnya aman. Temuan ini menegaskan pentingnya evaluasi internal nail dalam desain perkuatan, agar setiap elemen soil nail benar-benar berfungsi sesuai rencana dan mampu memberikan kontribusi maksimal terhadap peningkatan stabilitas lereng.

Tabel 4. Kapasitas Putus Nail Lereng H2 dan H3 Setelah Perubahan Diameter

Tabel Kontrol Kapasitas Putus Nail							
Lereng H1				Lereng H2			
Nail	Fr	Fr	Cek	Nail	Fr	Fr	Cek
	(d 19 mm)	(d 22 mm)			(d 19 mm)	(d 22 mm)	
1	9,19	9,19	OK	1	4,73	4,73	OK
2	5,19	5,19	OK	2	3,78	3,78	OK
3	3,61	3,61	OK	3	3,13	3,13	OK
4	2,77	2,77	OK	4	2,65	2,65	OK
5	2,25	2,25	OK	5	2,22	2,22	OK
6	1,89	1,89	OK	6	1,91	1,91	OK
7	1,62	2,04	OK	7	1,77	2,37	OK
8	1,52	2,04	OK	8	1,77	2,37	OK
9	2,19	2,19	OK				

Berdasarkan hasil kontrol kapasitas putus nail setelah dilakukan perubahan diameter nailing yang ditunjukkan pada Tabel 4, dapat dijelaskan bahwa kondisi internal nail pada masing-masing lereng menunjukkan peningkatan yang signifikan. Pada lereng H1, seluruh nail dengan diameter yang diperbesar (baik $d = 19$ mm maupun $d = 22$ mm) menunjukkan status “OK”, sehingga kapasitas tarik nail telah memenuhi kriteria desain. Hal ini menandakan bahwa perkuatan pada lereng H1 sudah aman dan tidak terdapat elemen yang menjadi titik kritis.

Pada lereng H2, hasil pengecekan juga menunjukkan bahwa semua nail dengan diameter baru memenuhi kapasitas tarik yang disyaratkan. Status “OK” pada seluruh baris menegaskan bahwa soil nail pada lereng H2 mampu bekerja optimal, berbeda dengan kondisi sebelumnya yang masih terdapat beberapa nail dengan kapasitas tidak mencukupi.

Dengan demikian, perubahan diameter nailing terbukti efektif dalam meningkatkan kapasitas internal soil nail pada kedua lereng. Lereng H1 dan H2 yang sebelumnya memiliki beberapa elemen “NOT OK” kini sepenuhnya memenuhi kriteria desain dengan status “OK” pada seluruh nail. Hal ini memastikan bahwa sistem perkuatan soil nailing dapat berfungsi secara menyeluruh dan memberikan kontribusi maksimal terhadap peningkatan stabilitas lereng sesuai standar keamanan yang berlaku.

2. Kontrol Kapasitas Cabut Nail Lereng H1, H2 dan H3

Tabel 5. Rekapitulasi Kapasitas Cabut Nail Setiap Lereng

Tabel Kontrol Kapasitas Cabut Nail								
Lereng H1			Lereng H2			Lereng H3		
Nail	Fp	Cek	Nail	Fp	Cek	Nail	Fp	Cek
1	18,24	OK	1	8,21	OK	1	8,29	OK
2	9,47	OK	2	5,83	OK	2	6,36	OK
3	6,13	OK	3	4,38	OK	3	4,62	OK
4	4,47	OK	4	3,46	OK	4	3,57	OK
5	3,40	OK	5	2,82	OK	5	2,95	OK
6	2,98	OK	6	2,49	OK	6	2,60	OK
7	2,68	OK	7	2,55	OK	7	2,90	OK
8	2,73	OK	8	3,06	OK	8	3,28	OK
9	4,52	OK				9	4,05	OK

Berdasarkan hasil kontrol kapasitas cabut nail yang ditunjukkan pada Tabel 5, dapat dijelaskan bahwa seluruh nail pada lereng H1, H2, dan H3 menunjukkan status “OK”, yang berarti kapasitas cabut nail telah memenuhi kriteria desain. Pada lereng H1, setiap elemen nail memiliki kapasitas cabut yang cukup untuk menahan gaya tarik yang timbul akibat interaksi tanah-paku,

sehingga tidak terdapat indikasi kelemahan internal. Hal serupa juga terlihat pada lereng H2, di mana seluruh nail dinyatakan aman dan mampu bekerja sesuai fungsi perkuatan. Pada lereng H3, hasil pengecekan menunjukkan konsistensi yang sama, dengan seluruh nail memenuhi persyaratan kapasitas cabut.

Secara keseluruhan, hasil kontrol kapasitas cabut nail menegaskan bahwa sistem soil nailing yang direncanakan pada ketiga lereng telah memenuhi standar keamanan. Tidak terdapat elemen nail yang gagal dalam uji kapasitas cabut, sehingga perkuatan dapat dipastikan bekerja efektif dalam meningkatkan stabilitas lereng. Temuan ini memperkuat kesimpulan bahwa desain soil nailing yang diterapkan tidak hanya meningkatkan faktor keamanan secara global, tetapi juga aman secara internal pada aspek kapasitas cabut.

3.3 Hasil Analisis Stabilitas Setelah Perkuatan Soil Nailing

Tabel 6. Nilai Faktor Keamanan Setelah Perkuatan Soil Nailing

Perbandingan Nilai Faktor Keamanan Sebelum dan Sesudah Menggunakan Perkuatan Soil Nailing						
Lereng	Metode	Kondisi	Analisis	FK Sebelum Perkuatan	FK Sesudah Perkuatan	Persentase Kenaikan
H1	Bishop Simplified	Statis	Drained	1,094	1,885	72%
		Dinamis		0,749	1,223	63%
	Morgenstern-Price	Statis	Drained	1,086	1,882	73%
		Dinamis		0,753	1,250	66%
H2	Bishop Simplified	Statis	Drained	1,117	1,785	60%
		Dinamis		0,769	1,148	49%
	Morgenstern-Price	Statis	Drained	1,108	1,780	61%
		Dinamis		0,772	1,180	53%
H3	Bishop Simplified	Statis	Drained	1,374	2,209	61%
		Dinamis		0,953	1,455	53%
	Morgenstern-Price	Statis	Drained	1,372	2,216	62%
		Dinamis		0,961	1,506	57%

Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan perkuatan dengan metode soil nailing memberikan peningkatan yang signifikan terhadap nilai Faktor Keamanan (FK) pada ketiga lereng (H1, H2, dan H3), baik dalam kondisi statis maupun dinamis.

Pada lereng H1, nilai FK sebelum perkuatan berada di bawah standar, yaitu 1,094 (Bishop) dan 1,086 (Morgenstern-Price) pada kondisi statis drained, serta 0,749 (Bishop) dan 0,753 (Morgenstern-Price) pada kondisi dinamis drained. Setelah perkuatan, nilai FK meningkat menjadi 1,885–1,882 pada kondisi statis dan 1,223–1,250 pada kondisi dinamis. Persentase kenaikan mencapai 63–73%, sehingga lereng H1 yang sebelumnya tidak stabil kini memenuhi kriteria stabilitas sesuai SNI 8460:2017.

Pada lereng H2, kondisi awal menunjukkan nilai FK statis drained sebesar 1,117 (Bishop) dan 1,108 (Morgenstern-Price), sedangkan pada kondisi dinamis drained hanya 0,769–0,772. Setelah perkuatan, nilai FK meningkat menjadi 1,780–1,785 pada kondisi statis dan 1,148–1,180 pada kondisi dinamis. Persentase kenaikan berkisar 49–61%, menegaskan bahwa soil nailing mampu meningkatkan stabilitas lereng H2 hingga memenuhi standar keamanan.

Pada lereng H3, nilai FK awal relatif lebih tinggi dibandingkan H1 dan H2, yaitu 1,374–1,372 pada kondisi statis drained dan 0,953–0,961 pada kondisi dinamis drained. Setelah perkuatan, nilai FK meningkat signifikan menjadi 2,209–2,216 pada kondisi statis dan 1,455–1,506 pada kondisi dinamis. Persentase kenaikan berkisar 53–62%, menunjukkan bahwa lereng H3 tidak hanya memenuhi kriteria stabilitas, tetapi juga memiliki margin keamanan yang lebih besar dibandingkan dua lereng lainnya.

Secara keseluruhan, hasil analisis menegaskan bahwa soil nailing efektif dalam meningkatkan stabilitas lereng pada ketiga lokasi penelitian. Peningkatan nilai FK yang konsisten pada kondisi statis maupun dinamis membuktikan bahwa metode ini mampu memobilisasi gaya tarik nail secara optimal, sehingga kapasitas tahan geser lereng meningkat. Dengan demikian, seluruh lereng H1, H2, dan H3 setelah perkuatan telah memenuhi standar keamanan yang disyaratkan oleh SNI 8460:2017, baik untuk kondisi statis ($FK \geq 1,5$) maupun dinamis ($FK \geq 1,1$).

4. Kesimpulan

Dari hasil perhitungan kestabilan lereng di PLTP Tawa Songa, Halmahera Selatan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Kondisi awal tanpa perkuatan menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan (FK) yang diperoleh melalui metode Bishop Simplified dan Morgenstern-Price masih berada di bawah standar stabilitas lereng menurut SNI 8460:2017. Pada kondisi statis drained, nilai FK hanya berada pada rentang 0,984–1,571, sedangkan pada kondisi dinamis drained dengan pengaruh gempa berada pada rentang 0,749–0,961. Hasil ini menegaskan bahwa sebagian besar lereng belum memenuhi kriteria stabilitas (FK statis $\geq 1,5$ dan FK dinamis $\geq 1,1$), sehingga diperlukan perkuatan untuk meningkatkan keamanan lereng.
2. Setelah dilakukan perkuatan dengan metode soil nailing pada sudut pemasangan 10° terhadap horizontal, terjadi peningkatan yang signifikan pada nilai FK di ketiga lereng. Pada kondisi statis drained, nilai FK meningkat menjadi 1,780–2,216, sedangkan pada kondisi dinamis drained dengan pengaruh gempa meningkat menjadi 1,148–1,506. Nilai tersebut telah melampaui batas minimum yang disyaratkan oleh SNI 8460:2017, sehingga lereng setelah perkuatan dapat dinyatakan stabil baik pada kondisi statis maupun dinamis.

Secara keseluruhan, penerapan soil nailing terbukti efektif dalam meningkatkan stabilitas lereng di area PLTP Tawa Songa. Perkuatan ini tidak hanya memenuhi standar keamanan yang berlaku, tetapi juga memberikan margin keamanan tambahan yang penting untuk menjamin keberlanjutan operasional proyek serta keselamatan konstruksi di wilayah pegunungan yang rawan longsor.

Referensi

- Bowles, Joseph E. 1996. *Foundation Analysis and Design*. Singapore: McGraw-Hill.
- Dani, H., Tico, J. H., & Legrans, R. R. (2021). Analisis Kestabilan Lereng Dengan Metode Bishop Menggunakan Software Slide 6.0 (Studi Kasus: Area TPA, IPLT Sawangan Airmadidi) *Jurnal Tekno* Vol. 19 No. 78. *Universitas Sam Ratulangi*.
- Darwis. 2018. *Dasar-Dasar Mekanika Tanah*. Yogyakarta: Pena Indis.
- Das, Braja. M. 1995. *Mekanika Tanah 1 (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Jakarta: Erlangga.
- Dharmawansyah, D. (2017). Alternatif Perkuatan Lereng Pada Ruas Jalan Trenggalek-Ponorogo Km 23+650. *Jurnal Tambora*, 2(1).
- 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.
- Imbar, E. R., Mandagi, A. T., & Rondonuwu, S. G. (2019). Analisis Stabilitas Lereng Dengan Perkuatan Soil Nailing Menggunakan Program Slope/W Dan Geostructural. *Jurnal Tekno*, 17(72), 59-64.
- Nggebu, Y. Y., Tico, J. H., & Legrans, R. R. (2019). Analisis Kestabilan Lereng Di Ruas Jalan Raya Manado-Tomohon Km 15. *TEKNO*, 17, 71.
- Pragustus, D., Mandagi, A. T., & AE, T. (2019). Analisis Stabilitas Lereng Dengan Perkuatan Soil Nailing Menggunakan Software Slide 6.0 (Studi Kasus: Ruas Jalan Manado-Tomohon). *Jurnal Sipil Statik*, 7(11), 1445-52.
- Rekzyanti, R., Balamba, S., & Manaroinson, L. (2016). Analisa Kestabilan Lereng Akibat Gempa. *Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi Manado Tekno*, 14.
- Sihotang, J. T., Rondonuwu, S. G., & Sarajar, A. N. (2023). Pengaruh Beban Gempa terhadap Kestabilan Lereng Menggunakan Perkuatan Soil Nailing (Studi Kasus: Ruas Jalan Manado Outer Ring Road III). *Jurnal Tekno. Manado*.
- Wibowo, A. H. (2022). *Stabilisasi Lereng Metode Soil Nailing Di Ruas Jalan Giriwoyo-Glonggong Km. Ska. 81+ 200 (Kab. Wonogiri)* (Master's thesis, Universitas Islam Sultan Agung (Indonesia)).