

ANALISIS STABILITAS GALIAN LERENG AREA SUTET DENGAN KOMBINASI PERKUATAN SOIL NAILING DAN GROUND ANCHOR

I Nyoman Aribudiman^{1*}, Made Dodiek Wirya Ardana², dan Vena Natalia Laia³

¹*Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Jl. Kampus Bukit, Jimbaran, Bali.
e-mail: naribudiman@unud.ac.id

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Jl. Kampus Bukit, Jimbaran, Bali. e-mail: dodiekwa@unud.ac.id

² Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Jl. Kampus Bukit, Jimbaran, Bali. e-mail: venanl@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji stabilitas lereng pada proyek Jalan Tol IKN Seksi 3A (STA 15+250–15+325) yang berdekatan dengan area SUTET. Keterbatasan lahan mengharuskan desain galian khusus dengan kemiringan tajam, sehingga analisis stabilitas lereng menjadi krusial. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis faktor keamanan (FS) lereng sebelum dan sesudah perkuatan menggunakan kombinasi soil nailing dan ground anchor. Metode penelitian meliputi pengumpulan data sekunder berupa data SPT dari boring log (BH-11, BH-11A, BH-T4, OP1-BH4) sedalam 60 m dan data pengujian laboratorium terbatas. Parameter tanah yang tidak tersedia dari uji lab ditentukan melalui korelasi empiris. Analisis stabilitas dilakukan dengan metode Bishop (manual) dan software Plaxis 2D. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lereng tanpa perkuatan memiliki $FS < 1,5$ (tidak stabil menurut SNI 8460:2017) baik pada analisis manual ($FS=1,227$ tanpa gempa; $FS = 1,123$ dengan gempa) maupun numerik ($FS=1,282$ tanpa gempa; $FS=1,102$ dengan gempa). Aplikasi perkuatan soil nailing dan ground anchor mampu meningkatkan FS 48,8% dari sebelum perkuatan yaitu sebesar $FS=1,908$ dari hasil analisis numerik, sehingga lereng dinyatakan stabil sesuai standar SNI $FS \geq 1,5$. Penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi soil nailing dan ground anchor dapat meningkatkan stabilitas lereng pada proyek tol di area terbatas, serta dapat menjadi referensi desain perkuatan lereng pada kasus serupa di masa mendatang.

Kata kunci: stabilitas lereng, soil nailing, ground anchor, Metode Bishop, Plaxis 2D

1. PENDAHULUAN

Tanah merupakan komponen penting dalam konstruksi, karena semua jenis bangunan dibangun di atasnya. Tanah bersifat unik dan bervariasi antar lokasi (Harmoko & Suryadharma, 2020), serta kontur elevasi yang berbeda memerlukan penggalian untuk menyesuaikan elevasi, yang dapat menghasilkan lereng buatan, sehingga dalam proyek pembangunan Tol IKN Seksi 3A STA 15+250 hingga 15+325, kebutuhan penggalian timbul akibat elevasi tanah asli yang lebih tinggi dari elevasi rencana. Penggalian dengan desain kemiringan standar 1:2 berdasarkan (Direktorat Jendral Bina Marga, 2021), galian berpotensi memasuki area tower transmigrasi tegangan tinggi (SUTET), sehingga diperlukan desain lereng khusus yang lebih curam dan rentan terhadap ketidakstabilan.

Untuk meningkatkan stabilitas lereng, digunakan kombinasi metode soil nailing dan ground anchor. Soil nailing berfungsi mengikat zona aktif ke zona pasif, mengurangi potensi kegagalan akibat zona aktif yang memiliki kecenderungan untuk melepaskan dari sistem tanah-dipaku (Rigilang, 2014). Sementara itu, ground anchor menggunakan prestressing untuk menciptakan gaya prategang yang berinteraksi dengan tanah, menghasilkan keseimbangan dan kestabilan (Supiyono, 2023). Penambahan perkuatan ground anchor terhadap perkuatan soil nailing mampu menambah gaya lock-off yang berfungsi sebagai gaya tambahan yang dapat menekan permukaan lereng ke arah tanah pasif. Sehingga Penggunaan kombinasi soil nailing dan ground anchor diperlukan karena masing-masing metode memiliki kelebihan dan fungsi khusus yang saling melengkapi dalam perkuatan lereng. Analisis ini akan mengkaji stabilitas lereng sebelum dan sesudah perkuatan menggunakan Metode Bishop dan simulasi numerik menggunakan Plaxis 2D. Analisis ini bertujuan membandingkan angka keamanan lereng sebelum diberi perkuatan dan sesudah diberi perkuatan.

2. TEORI DAN METODE

2.1 Teori

Tanah dan Klasifikasinya

Tanah adalah material lepas hasil pelapukan batuan yang terdiri dari partikel mineral dan pori-pori berisi udara dan/atau air (Craig & Susilo, 1989). Berdasarkan tekstur dan struktur, tanah dibedakan menjadi dua kelompok utama, yaitu tanah kohesif (contohnya lempung) dan tanah tidak kohesif (contohnya pasir).

Parameter Fisik dan Mekanik Tanah

Karakteristik tanah sangat memengaruhi kestabilan lereng. Parameter-parameter penting dalam analisis stabilitas meliputi:

- Nilai N-SPT: Digunakan untuk menilai konsistensi dan kepadatan tanah
- Kohesi (c') dan Sudut geser dalam (ϕ'): Menentukan kekuatan geser tanah melalui rumus pada persamaan (1):

$$s = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (1)$$

dimana : s = Kuat geser [kN/m^2],

c' = Kohesi tanah efektif [kN/m^2]

σ' = Tegangan normal pada bidang yang ditinjau [kN/m^2]

ϕ' = Sudut geser dalam efektif tanah ($^\circ$)

- Modulus Elastisitas (E): Menyatakan kekakuan tanah dan berkorelasi dengan nilai N-SPT.

- Rasio Poisson (v): Menunjukkan hubungan antara deformasi lateral dan longitudinal.

- Koefisien rembesan (k): Mempengaruhi aliran air dan tekanan pori dalam massa tanah.

Nilai-nilai ini diperoleh dari data laboratorium, uji lapangan (SPT), atau pendekatan korelasi empiris.

Stabilitas Lereng

Stabilitas lereng adalah kemampuan lereng untuk menahan gaya dorong akibat gravitasi, air tanah, atau beban eksternal. Lereng yang tidak stabil dapat menyebabkan kelongsoran, yang berisiko terhadap struktur di sekitarnya.

Analisis Lereng dalam Kondisi Gempa

Dalam kondisi gempa, analisis stabilitas lereng dilakukan dengan metode pseudostatik, dimana gaya gempa dimodelkan sebagai gaya lateral tetap. Gaya ini ditambahkan ke sistem sebagai beban horizontal yang bekerja pada pusat massa lereng. Meskipun pendekatan ini sederhana, metode pseudostatik tetap banyak digunakan karena aplikatif dan sesuai dengan standar SNI 8460:2017.

Metode dalam analisis stabilitas lereng yaitu sebagai berikut :

- **Metode Bishop Disederhanakan (Simplified Bishop Method)**

Metode Bishop digunakan untuk analisis stabilitas lereng dengan pendekatan keseimbangan batas. Bidang gelincir diasumsikan berbentuk lingkaran dan lereng dibagi menjadi beberapa irisan. Gaya-gaya vertikal dan momen pada setiap irisan dihitung untuk menentukan nilai Faktor Keamanan (FS). Berdasarkan penelitian sebelumnya oleh Sihotang et al. (2023) perhitungan angka keamanan menggunakan Metode Bishop baik kondisi tanpa gempa maupun dengan beban gempa menggunakan persamaan 2 dan persamaan 3.

Menentukan Faktor Keamanan kondisi tanpa gempa melalui persamaan (2):

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c'b + (W_i - u_i b_i) \tan \phi'] \frac{1}{\cos \theta_i (1 + \frac{\tan \theta_i \tan \phi'}{F})}}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (2)$$

Dimana :

FS = Faktor aman

c' = kohesi tanah efektif (kN/m^2) ϕ'

= sudut gesek dalam efektif ($^\circ$) b_i

= lebar irisan ke-i (m)

W_i = berat irisan tanah ke-i (kN)

u_i = tekanan air pori irisan ke-i (kN/m^2)

Θ_i = sudut yang didefinisikan (derajat)

Menentukan Faktor Keamanan kondisi dengan gempa melalui persamaan (3):

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c'b + (W_i \cos \alpha - u_i b_i) \tan \varphi']}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \alpha_i + K_h \cos \alpha} \quad (3)$$

Dimana:

FS = Faktor aman

c' = kohesi tanah efektif (kN/m^2) φ'

= sudut gesek dalam efektif ($^\circ$) b_i =

lebar irisan ke-i (m)

W_i = berat irisan tanah ke-i (kN)

μ_i = tekanan air pori irisan ke-i (kN/m^2)

α_i = sudut yang didefinisikan ($^\circ$)

K_h = koefisien percepatan gempa horizontal

• Analisis Numerik dengan Plaxis 2D

Plaxis 2D adalah software berbasis elemen hingga yang digunakan untuk memodelkan interaksi tanah dan perkuatan secara rinci. Dalam analisis stabilitas, Plaxis 2D menggunakan Strength Reduction Method (SRM), yaitu dengan mereduksi bertahap nilai kohesi dan sudut geser hingga tanah dianggap mengalami keruntuhan. Analisis stabilitas lereng menggunakan Plaxis 2D dengan beban gempa pseudostatik, gaya dinamis akibat gempa diubah menjadi gaya statis lateral yang bekerja melalui pusat massa, yang bergerak ke arah ke luar lereng Pujianto et al., (2017). Menurut Vekli & Cadir (2022) gempa pseudostatik dihitung dengan persamaan 4.

$$F_{\text{gempa}} = K_h \times W \quad (4)$$

Dimana:

K_h = koefisien percepatan gempa horizontal

W = Berat massa tanah lereng yang dianalisis (kN)

F_{gempa} adalah gaya gempa pseudostatik arah horizontal yang memiliki satuan kN/m . Gaya ini bekerja di belakang lereng. Pada Plaxis 2D, gaya gempa pseudostatik bisa di aplikasikan menggunakan fitur line load yang angkanya disesuaikan dengan hasil perhitungan F_{gempa} (kN/m).

Metode Perkuatan Lereng

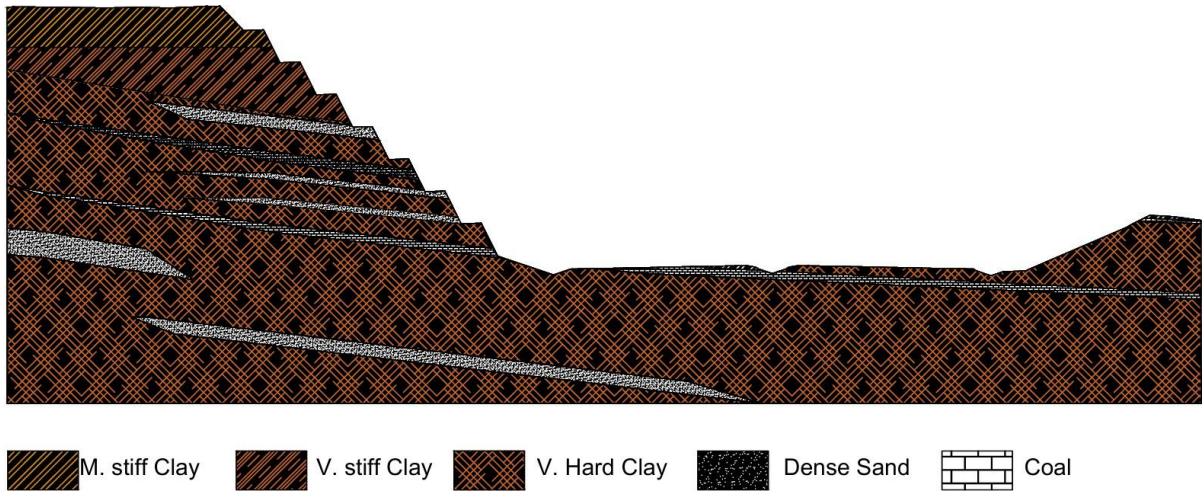
Perkuatan lereng diperlukan untuk meningkatkan stabilitas, terutama pada daerah dengan ruang terbatas seperti area dekat SUTET. Dua metode yang umum digunakan adalah:

- Soil Nailing: Menstabilkan lereng dengan menanam batang baja ke dalam zona aktif untuk mengikatnya ke zona pasif, sehingga menambah kekuatan geser internal (Riogilang, 2014). Soil Nailing untuk tanah kohesif dengan konsistensi medium stiff dan tanah pasir dengan konsistensi medium dense (Direktorat Jendral Bina Marga, 2016)
- Ground Anchor: Menggunakan kabel atau batang baja yang ditanam dan diberi gaya prategang untuk menahan gaya dorong dari tanah. Efektif untuk lereng curam atau dengan beban besar. Ground Anchor cocok untuk tanah atau batuan keras yang mampu memberikan tahanan friksi yang besar (Direktorat Jendral Bina Marga, 2016)

Kombinasi keduanya memberikan keuntungan ganda: soil nailing memberi dukungan pasif, sedangkan ground anchor memberikan gaya aktif. Kombinasi ini terbukti efektif dalam proyek lereng dengan keterbatasan ruang.

2.2 Metode

Metode analisis dalam penelitian ini dilakukan melalui pendekatan analitis dan numerik yang dimulai dengan studi literatur, identifikasi permasalahan, serta pengumpulan data sekunder berupa hasil uji Standart Penetration Test (SPT) hingga kedalaman 60 meter di area galian SUTET yaitu BH-11, BH-11A, BH-T4 dan OP1-BH4 dan data laboratorium tanah dari proyek Jalan Tol IKN Seksi 3A STA 15+250 hingga 15+325. Parameter tanah yang tidak tersedia diperoleh melalui korelasi empiris. Evaluasi stabilitas lereng dilakukan menggunakan metode Bishop Simplified untuk perhitungan manual dan pemodelan numerik dengan perangkat lunak Plaxis 2D berbasis elemen hingga. Tahapan dalam Plaxis 2D mencakup impor geometri tanah yang telah dimodelkan di program AutoCAD yang detail geometri serta profil lapisan tanah dan hasil uji Standart Penetration Test (SPT) dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2. Analisis dilakukan dengan beban tambahan sebesar 10 kN/m^2 di tepi lereng baik pada kondisi statis maupun dinamis (gempa) menggunakan pendekatan pseudostatik mengacu pada SNI 8460:2017, dengan keluaran utama berupa faktor keamanan (FS) untuk mengevaluasi efektivitas perkuatan lereng.



Gambar 1 : Model Geometri Profil Lapisan Tanah

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan menggunakan data sekunder hasil uji Standard Penetration Test (SPT) pada titik-titik pengeboran BH-11, BH-11A, BH-T4, dan OP1-BH4 di sekitar area galian lereng SUTET dan dilakukan koreksi N-SPT. Karena data laboratorium dari area tersebut belum tersedia, karakteristik dan parameter tanah yang diperlukan dianalisis berdasarkan hasil korelasi empiris. Interpretasi pelapisan tanah ditampilkan dalam potongan profil geologi pada Gambar 2 dan dirangkum dalam Tabel 1 dilengkapi nilai rata-rata data N-SPT dari hasil koreksi. Data ini menjadi dasar dalam perhitungan stabilitas lereng, baik secara manual menggunakan Metode Bishop maupun numerik menggunakan software Plaxis 2D, untuk mengevaluasi perubahan faktor keamanan sebelum dan sesudah perkuatan lereng.

Tabel 1 Interpretasi pelapisan tanah dan rata-rata data N-SPT dari hasil koreksi

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	Konsistensi	Rerata N-SPT
0-6	Silty Clay	Medium Stiff	9
6-10	Silty Clay	Stiff to Very Stiff	22
10-60	Silty Clay	V. Hard Clay	44
Sisipan diantara kedalaman 10-60	Sand	Dense to V. Dense	38
Sisipan diantara kedalaman 10-60	Coal Seam	Coal	60

Korelasi Nilai N-SPT Terkoreksi terhadap Parameter Tanah

Karakteristik dan parameter tanah yang diperlukan dianalisis melalui korelasi grafik dan tabel empiris yang umum digunakan. Parameter tanah yang dianalisis untuk menggambarkan kondisi tanah asli meliputi kohesi (c), berat volume (γ), sudut geser dalam (ϕ), modulus elastisitas (E), dan poisson ratio (μ). Berdasarkan profil lapisan tanah dan data N-SPT di lokasi lereng galian, diperoleh lima lapisan tanah dengan properti yang dirangkum dalam Tabel 2.

Tabel 2.a parameter tanah hasil korelasi empiris

Kedalaman	Jenis Tanah	Avg. N-SPT	Material	Cu (kN/m ²)	C' (kN/m ²)	ϕ (°)
0-6	M. Stiff Clay	9	Undrained	30	3	20,0
6-10	V. Stiff Clay	22	Undrained	65	6,5	22,5
Sisipan diantara 10-60	Dense Sand	38	Drained	0	0	38
10-60	V. Hard Clay	44	Undrained	255	25,5	25,0
tersisip diantara 10-60	Coal	60	Drained	25	2,5	38

Tabel 2.b parameter tanah hasil korelasi empiris

Kedalaman	Jenis Tanah	Avg. N-SPT	Material	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)	E (kPa)	v
0-6	<i>M. Stiff Clay</i>	9	<i>Undrained</i>	19,3	16,4	10100	0,3
6-10	<i>V,Stiff Clay</i>	22	<i>Undrained</i>	20,4	16,6	33947	0,3
Sisipan diantara 10-60	<i>Dense Sand</i>	38	<i>Drained</i>	21,0	17,9	26333,3	0,3
10-60	<i>V,Hard Clay</i>	44	<i>Undrained</i>	20,4	16,8	72599	0,3
tersisip diantara 10-60	<i>Coal</i>	60	<i>Drained</i>	23,0	14,4	200000	0,3

Stabilitas Lereng Galian Tanpa Perkuatan

- 1) Analisis Stabilitas Lereng Tanpa Beban Gempa dengan Perhitungan Analitis dengan Metode Bishop disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Analisis Stabilitas Lereng Tanpa Beban Gempa dengan Perhitungan Analitis

Irisa n	An (m ²)	Wn (kN)	α_i (°)	B W sin α_i	c (kN/m ²)	ϕ (°)	bn (m)	A $(c_{bn} + W \tan \phi) \times (1/\cos \alpha_i \cdot \tan \phi)/F$	FS
1	5,59	53,07	58	45,01	3	20,00	2	43,03	1,277
2	26,16	25,230	49	190,41	3,45	20,32	4	145,07	1,277
3	42,72	42,618	39	268,20	4,51	21,08	4	194,37	1,277
4	54,27	54,854	31	282,52	4,93	21,38	4	254,10	1,277
5	39,92	40,820	24	166,03	5,35	21,66	4	197,64	1,277
6	44,51	46,5,66	17	136,14	6,51	22,25	4	229,86	1,277
7	33,15	35,1,39	9	54,97	7,60	22,64	4	195,17	1,277
8	18,81	19,9,35	2	6,96	8,44	22,76	4	140,28	1,277
9	8,40	89,35	-3	-4,68	9,10	24,09	1,5	62,88	1,277
1150,25								1335,07	

$$FS = \frac{A}{B} = \frac{1335,07}{1150,25} = 1,277$$

- 2) Analisis Stabilitas Lereng dengan Beban Gempa dengan Perhitungan Analitis dengan Metode Bishop disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4.a Perhitungan Stabilitas Lereng Dengan Beban Gempa Dengan Metode Bishop

Irisan	An (m ²)	Wn (kN)	α^i ($^{\circ}$)	B $W \sin \alpha_i$	c (kN/m ²)	Φ ($^{\circ}$)
1	5,59	53,07	58	45,01	3	20,00
2	26,16	252,30	49	190,41	3,45	20,32
3	42,72	426,18	39	268,20	4,51	21,08
4	54,27	548,54	31	282,52	4,93	21,38
5	39,92	408,20	24	166,03	5,35	21,66
6	44,51	465,66	17	136,14	6,51	22,25
7	33,15	351,39	9	54,97	7,60	22,64
8	18,81	199,35	2	6,96	8,44	22,76
9	8,40	89,35	-3	-4,68	9,10	24,09
				1150,25		

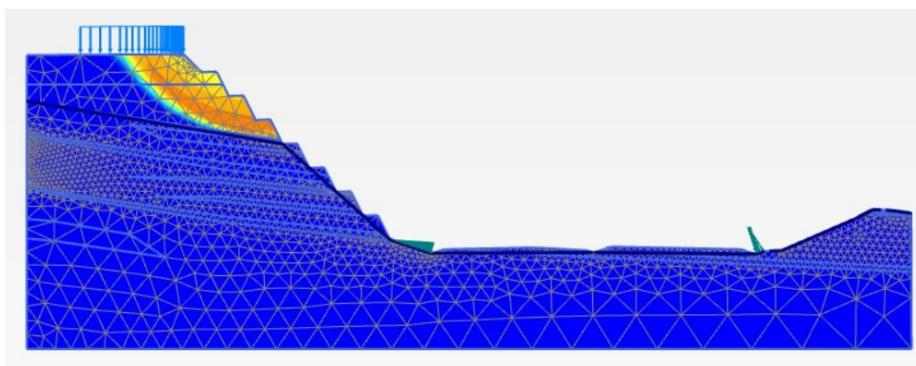
Tabel 4.b Perhitungan Stabilitas Lereng Dengan Beban Gempa Dengan Metode Bishop

Irisan	A $(c_{bn} + (W \cos \alpha_i - Kh \sin \alpha_i) \tan \Phi) \times (1 / (\cos \alpha_i \tan \Phi)) / F$	FS	W s i n	B $\alpha_i + Kh \cos \alpha_i$
1	43,03	1,108		0,81
2	145,07	1,108		0,91
3	194,37	1,108		1,00
4	254,10	1,108		1,04
5	197,64	1,108		1,06
6	229,86	1,108		1,06
7	195,17	1,108		1,05
8	140,28	1,108		1,01
9	62,88	1,108		0,98
	1296,647			1153,896

$$FS = \frac{A}{B} = \frac{1296,647}{1153,896} l,123$$

- 3) Analisis Stabilitas Lereng Tanpa Beban Gempa dengan Program Plaxis 2D

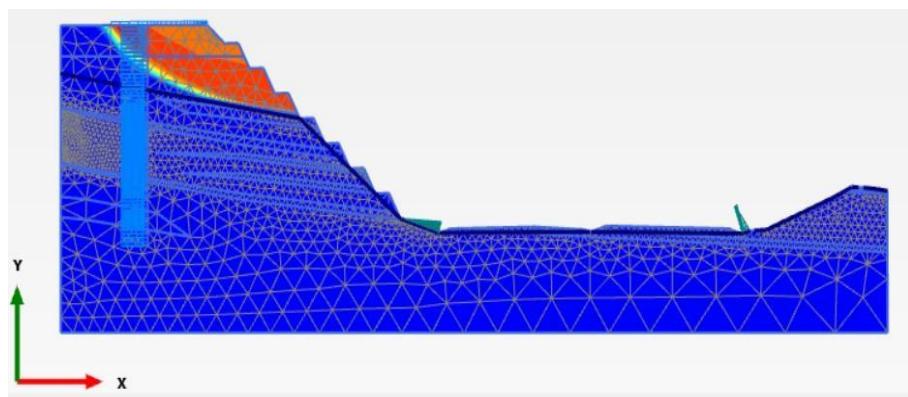
Hasil perhitungan stabilitas lereng eksisting tanpa perkuatan menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D menunjukkan nilai faktor keamanan sebesar 1,282 pada kondisi normal disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3 Plaxis 2D : SF Lereng Tanpa Perkuatan Kondisi Normal

4) Analisis Stabilitas Lereng Tanpa Beban Gempa dengan Program Plaxis 2D

Hasil perhitungan stabilitas lereng tanpa perkuatan dengan beban gempa menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D menunjukkan nilai faktor keamanan sebesar 1,102. Hasil analisis disajikan pada Gambar 4.



Tabel 5 Rekapitulasi Angka Keamanan Lereng Galian Tanpa Perkuatan

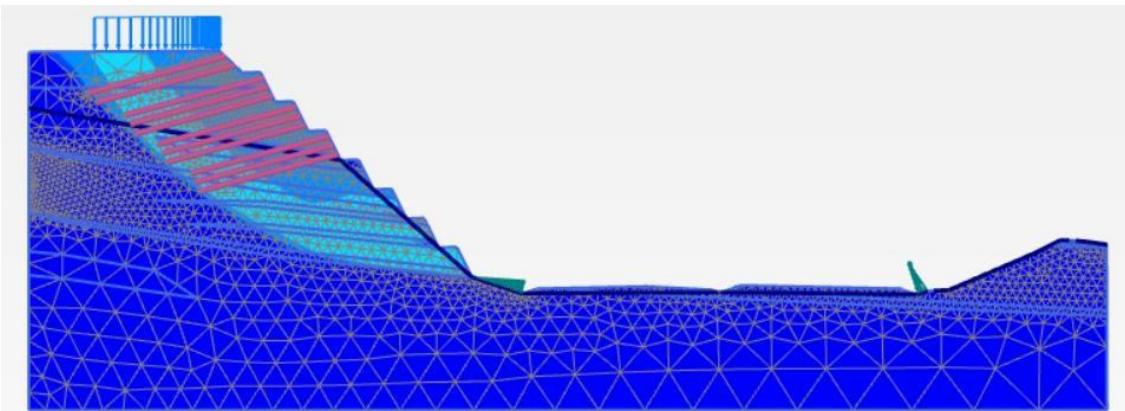
Metode	Angka Keamanan Lereng Galian Kondisi Normal	Angka Keamanan Lereng Galian dengan Penambahan Beban Gempa
Bishop	1,277	1,123
Plaxis 2D	1,282	1,102

Kondisi keamanan lereng < 1,50 mengindikasikan bahwa lereng tersebut tidak aman dan memerlukan penanganan atau perbaikan lebih lanjut untuk menjamin kestabilannya.

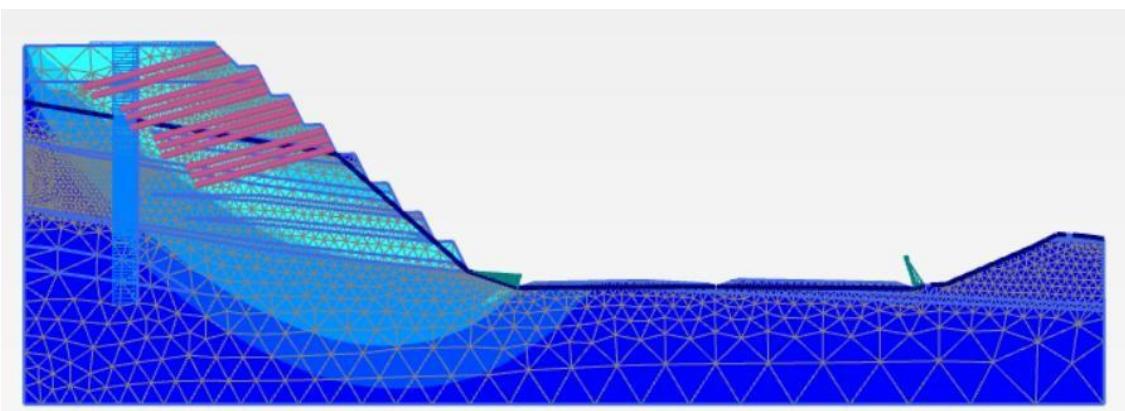
Rekapitulasi faktor keamanan hasil analisis dengan perhitungan analitis dan numerik pada lereng pada kondisi normal tanpa beban gempa penambahan beban gempa disajikan pada Tabel 5.

Stabilitas Lereng Galian Dengan Perkuatan Soil Nailing

Perencanaan sistem perkuatan lereng dengan soil nailing dalam studi ini mengacu pada ketentuan dan pedoman teknis yang tercantum dalam SNI 8460:2017 terkait persyaratan perancangan geoteknik serta pedoman teknis dari Federal Highway Administration (FHWA, 2015). Nilai angka keamanan yang diperoleh dari hasil analisis menggunakan Program Plaxis 2D setelah diberi perkuatan soil nailing, baik kondisi tanpa gempa maupun dengan beban gempa yaitu disajikan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5 Plaxis 2D : SF Soil Nailing Tanpa Beban Gempa Sudut 15°

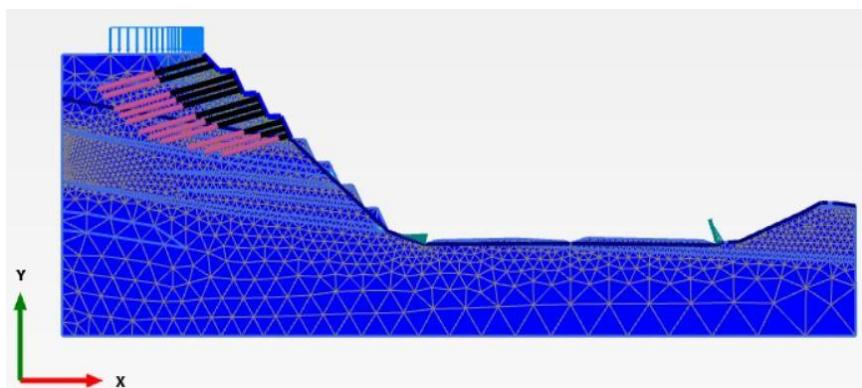


Gambar 6 Plaxis 2D : SF Soil Nailing dengan Gempa Sudut 15°

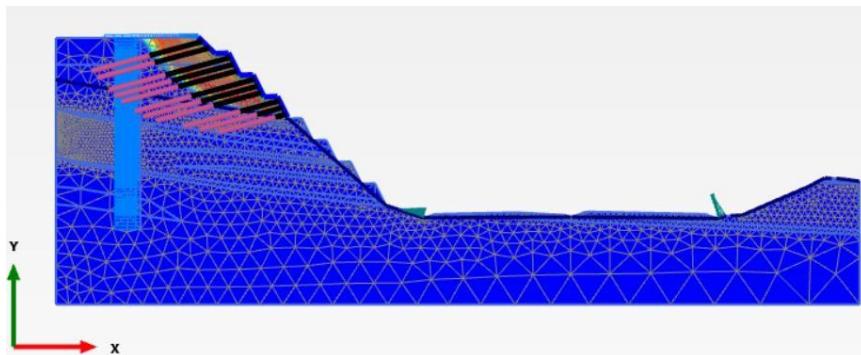
Dari analisis stabilitas lereng dengan Plaxis 2D, dengan beban gempa dan tanpa gempa, dengan pemasangan soil nailing 15° panjang nailing 24 m didapat faktor keamanan sebesar 1,854 dan 1,735.

Stabilitas Lereng Galian Dengan Perkuatan Ground Anchor

Perencanaan sistem perkuatan lereng dengan ground anchor dalam studi ini mengacu pada ketentuan dan pedoman teknis yang tercantum dalam SNI 8460:2017 terkait persyaratan perancangan geoteknik serta pedoman teknis dari Federal Highway Administration (FHWA, 1999). Nilai angka keamanan yang diperoleh dari hasil analisis menggunakan Program Plaxis 2D setelah diberi perkuatan ground anchor, baik kondisi tanpa gempa maupun dengan beban gempa yaitu disajikan pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7 Plaxis 2D : SF Ground Anchor Tanpa Beban Gempa Sudut 15°



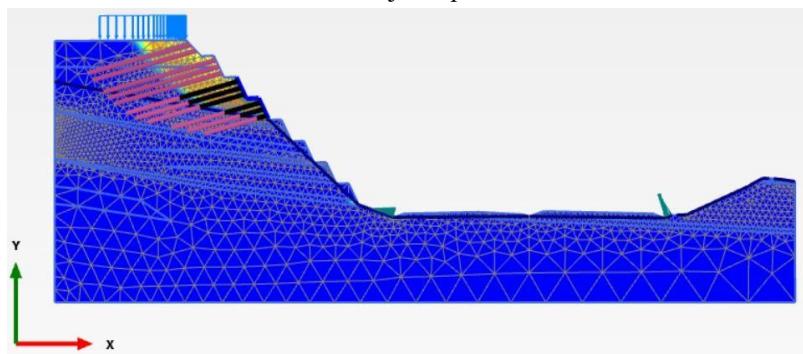
Gambar 8 Plaxis 2D : SF Ground Anchor dengan Beban Gempa Sudut 15°

Dari analisis stabilitas lereng dengan Plaxis 2D, dengan beban gempa dan tanpa gempa, dengan pemasangan ground anchor 15° , panjang grouting 13,27 m didapat faktor keamanan sebesar 1,906 dan 1,795.

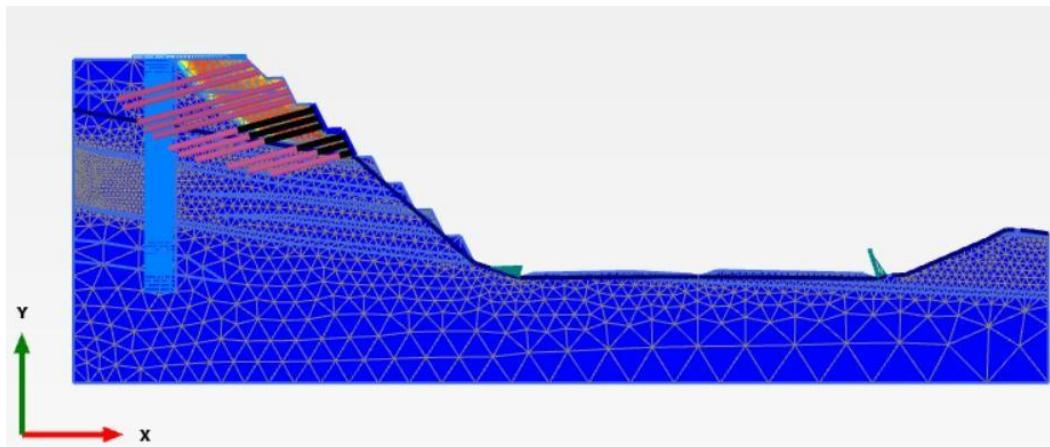
Stabilitas Lereng Galian Dengan Perkuatan Kombinasi Soil Nailing dan Ground Anchor

Perencanaan sistem perkuatan lereng dengan kombinasi soil nailing dan ground anchor dalam studi ini mengacu pada ketentuan dan pedoman teknis yang tercantum dalam SNI 8460:2017 terkait persyaratan perancangan geoteknik serta pedoman teknis dari Federal Highway Administration (FHWA, 2015) dan FHWA,1999 dalam (Allerberger et al., 1996). Soil nailing ditempatkan sebanyak 5 baris pada zona atas lereng, sedangkan ground anchor dipasang 6 baris di bagian bawah lereng yang lebih dalam.

Nilai angka keamanan yang dihasilkan menunjukkan terdapat peningkatan sebesar 50 % dari sebelum lereng diberi perkuatan yaitu sebesar 1,920. Hasil analisis disajikan pada Gambar 5.



Gambar 9 Plaxis 2D : SF Kombinasi Soil Nailing dan Ground Anchor Tanpa Beban Gempa Sudut 15°

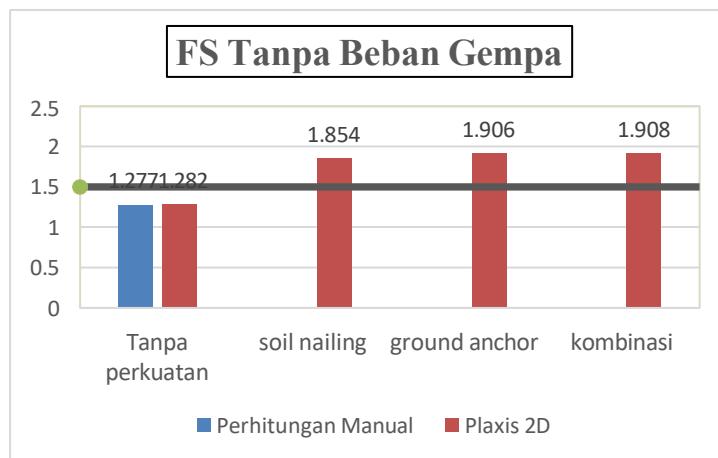


Gambar 10 Plaxis 2D : SF Kombinasi Soil Nailing dan Ground Anchor dengan Beban Gempa Sudut 15°

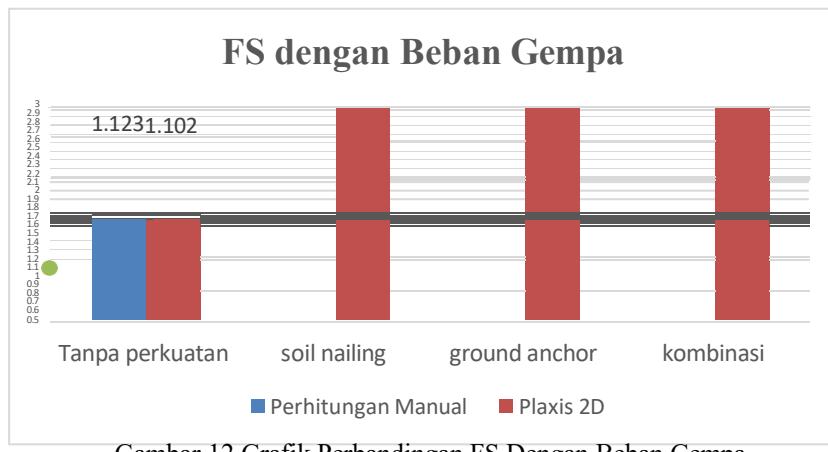
Dari analisis stabilitas lereng dengan Plaxis 2D, dengan beban gempa dan tanpa gempa, dengan pemasangan ground anchor dan soil nailing kemiringan 15° , didapat faktor keamanan sebesar 1,908 dan 1,781.

Hasil dan Pembahasan Analisis Stabilitas Lereng

Berdasarkan Gambar 11, pada kondisi tanpa beban gempa, lereng eksisting tanpa perkuatan memiliki nilai FS di bawah batas minimum SNI 8460:2017 ($FS \geq 1,5$), baik dari perhitungan manual maupun Plaxis 2D, sehingga dinyatakan tidak stabil. Setelah diberi perkuatan soil nailing, ground anchor, maupun kombinasinya, nilai FS meningkat signifikan dan seluruh metode memenuhi kriteria stabilitas. Kombinasi perkuatan memberikan FS tertinggi (1,908) dari hasil analisis Plaxis 2D, disusul ground anchor (1,906) dan soil nailing (1,854). Pada kondisi gempa pseudostatik, hasil Plaxis 2D menunjukkan seluruh metode perkuatan tetap memenuhi batas minimum SNI 8460:2017 ($FS > 1,1$). Ground anchor memberikan FS tertinggi (1,795), disusul kombinasi (1,781) dan soil nailing (1,735), sementara lereng tanpa perkuatan memiliki FS paling rendah (1,102), mendekati ambang batas stabilitas.



Gambar 11 Grafik Perbandingan FS tanpa Beban Gempa



Gambar 12 Grafik Perbandingan FS Dengan Beban Gempa

4. KESIMPULAN

Karakteristik tanah pada lereng area SUTET Proyek Jalan Tol IKN Seksi 3A STA 15+250 – 115+325 terdiri dari lapisan tanah medium stiff clay (0–6 m), very stiff clay (6–10 m), very hard clay (10–60 m), serta sisipan pasir padat dan batu bara. Lapisan dangkal tergolong lunak dan rentan longsor, sementara lapisan dalam sangat kuat dan berperan sebagai penopang utama lereng. Hasil analisis stabilitas lereng tanpa perkuatan menunjukkan bahwa angka keamanan

<1,5 baik dengan metode Bishop maupun Plaxis 2D yaitu sebesar 49% tanpa gempa dan 57% dengan beban gempa pseudostatik, sehingga lereng dinyatakan tidak stabil berdasarkan SNI 8460:2017. Hasil analisis Plaxis 2D menunjukkan seluruh metode perkuatan memenuhi kriteria stabilitas SNI 8460:2017. Kombinasi soil nailing dan ground anchor menghasilkan FS tertinggi tanpa gempa (1,908), sedangkan ground anchor tunggal memberikan FS tertinggi saat gempa (1,795). Dengan demikian, kombinasi perkuatan paling efektif pada kondisi tanpa gempa, sementara ground anchor tunggal lebih optimal pada kondisi gempa.

DAFTAR PUSTAKA

- Allerberger, F., Rossboth, D., Dierich, M. P., Aleksic, S., Schmidt, H., & Karch, H. (1996). Prevalence and clinical manifestations of Shiga toxin-producing Escherichia coli infections in Austrian children. European Journal of Clinical Microbiology and Infectious Diseases, 15(7), 545–550. <https://doi.org/10.1007/BF01709361>
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). Persyaratan Perancangan Geoteknik. Standar Nasional Indonesia, 8460, 1–323. Craig, R. F., & Susilo, B. (1989). Mekanika Tanah, edisi IV. 16, 19, 109,110, 171, 174, 176. <https://labmekanikatanah.files.wordpress.com/2013/07/mekanika-tanah-r-f-craig.pdf>
- Direktorat Jendral Bina Marga, 2016. (2016). (Direktorat Jenderal Bina Marga 2012. Correspondencias & Análisis, 15018, 1–23.
- FHWA. (2015). Soil Nail Walls Reference Manual. Geotechnical Engineering Circular NO. 7 - Soil Nail Walls Reference Manual, 132085, 425. <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/nhi14007.pdf>
- pdf-surat-dirjen-bm-bm-0603-db-849-rekomendasi-penerapan-clear-zone_compress.pdf. (n.d.).
- Pujianto, H., Muslih, Y., & Surjandari, N. S. (2017). Analisis Pengaruh Beban Gempa Terhadap Stabilitas Lereng Di Desa Sendangmulyo, Tirtomoyo, Wonogiri. E-Jurnal Matriks Teknik Sipil, 1968, 202–207.
- Riogilang, H. (2014). Soil Nailing Dan Anchor Sebagai Solusi Aplikatif. Jurnal Ilmiah Media Engineering, 4(2), 119– 126.
- 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). 21(84).
- Supiyono, S. (2023). Studi Perbandingan Gabion Dan Ground Anchor Sebagai Penanganan Longsoran Pada Relokasi Jalan Arah Ponorogo-Trenggalek. Jurnal Online Skripsi Manajemen Rekayasa..., 4, 303–308. <http://jurnal.polinema.ac.id/index.php/jos-mrk/article/view/1241>
- Vekli, M., & Cadir, C. C. (2022). Stability analysis of stone column slopes under different earthquake loads. Bursa Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 27(2), 749–764. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1064770>