

Analisis Deformasi Lereng dengan Perkuatan Soil Nailing pada Proyek Pembangunan Jalan Baru Batas Kota Singaraja-Mengwitani

Anambi Mono Yudianto^{1*}, Yudhi Lastiasih¹, Rakhman Taufik², Izzuddin Ismawanto²

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya¹, Kementerian Pekerjaan Umum dan perumahan Rakyat, Jakarta²
Koresponden*, Email: anambi@pu.go.id

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	03 Desember 2021	<p><i>New road construction of Singaraja City Border - Mengwitani (short cut 5-6) was completed in December 2019. The geometry of the new road has an artificial slope that is quite high. Some slopes reach a height of 40 m from road level. One of the reinforcements on the existing slopes in the New road construction of Singaraja City Border - Mengwitani is soil nailing. The current condition of the slope with soil nailing reinforcement is in a stable state. However, it should be noted if there are changes in environmental factors. The factor is the increase of Peak Ground Acceleration (PGA) of the earthquake. PGA variation was carried out with a PGA value of 0.4g; 0.45g; 0.5g; and 0.55g. Slope deformation and slope stability analysis was carried out using Plaxis application. The results of the analysis showed that the increasing value of the PGA caused deformation at the top of the slope to increase, while the safety factor decreased. The increase in deformation in this analysis has varying results with an increase in earthquake load of 0.05g, but the deformation tends to increase along with the increasing earthquake load. For the safety factor, in the earthquake load variation of 0.4g; 0.45g; 0.5g, the average safety factor decreased by 2.62%. Based on the analysis results, it was predicted that when the slope deformed by 0,09 m, the safety factor was in critical condition (FK = 1). This deformation can be measured in the field using an inclinometer. It can be used for hazard limit before the slope collapses due to the earthquake.</i></p>
Diperbaiki	09 Februari 2022	
Disetujui	09 Februari 2022	

Keywords: soil nailing, slope, Singaraja, Mengwitani, PLAXIS

Abstrak

Pembangunan jalan baru Batas Kota Singaraja – Mengwitani (*short cut 5-6*) selesai pada bulan Desember Tahun 2019. Geometri jalan baru tersebut memiliki lereng buatan yang cukup tinggi. Beberapa lereng mencapai ketinggian 40 m dari permukaan jalan. Salah satu perkuatan pada lereng yang ada pada pembangunan jalan baru Batas Kota Singaraja – Mengwitani adalah *soil nailing*. Kondisi saat ini lereng dengan perkuatan *soil nailing* dalam keadaan stabil. Namun perlu diperhatikan jika terdapat perubahan faktor lingkungan. Faktor tersebut adalah naiknya *Peak Ground Acceleration (PGA)* gempa. Variasi *PGA* dilakukan dengan nilai *PGA* 0,4g; 0,45g; 0,5g; dan 0,55g. Analisis deformasi dan stabilitas lereng menggunakan aplikasi *Plaxis*. Hasil analisis menunjukkan bahwa semakin meningkat nilai *PGA* maka deformasi pada puncak lereng semakin meningkat, sedangkan faktor keamanan semakin menurun. Peningkatan deformasi pada analisis ini memiliki hasil yang bervariasi dengan peningkatan beban gempa 0,05g, namun deformasi cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya beban gempa. Untuk faktor keamanan, pada variasi beban gempa 0,4g; 0,45g; 0,5g terjadi penurunan rata-rata faktor keamanan sebesar 2,62%. Berdasarkan hasil analisis didapatkan prediksi saat lereng mengalami deformasi 0,09 m, faktor keamanan berada pada kondisi kritis (FK = 1). Deformasi ini dapat diukur dilapangan menggunakan inklinometer. Hal tersebut dapat digunakan untuk batas bahaya sebelum lereng runtuh akibat gempa.

Kata kunci: *soil nailing*, lereng, Singaraja, Mengwitani, *PLAXIS*

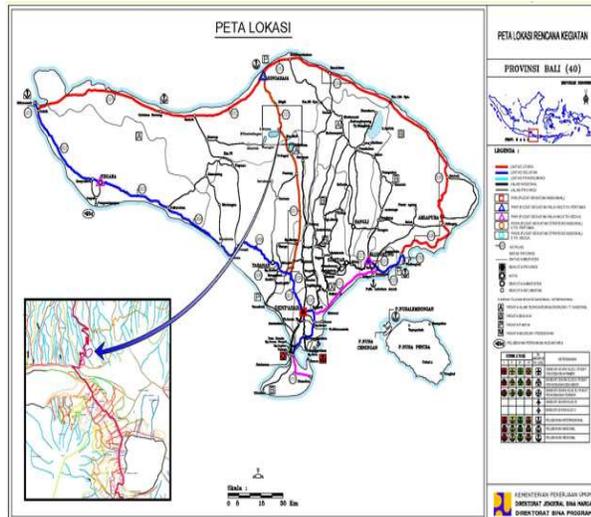
1. Pendahuluan

Pembangunan jalan baru Batas Kota Singaraja-Mengwitani berada di Desa Pegayaman Kecamatan Sukasada Kabupaten Buleleng Provinsi Bali, Lokasi titik awal (Sta 0+000) berada di Jalan Alteri Denpasar–Singaraja Km 57+600 dengan elevasi 1.394,10 m di atas muka laut, berkoordinat X=295720,64; Y=9088966,91. Titik akhir (Sta 1+950) berada di Jalan Arteri Denpasar–Singaraja di Km 58+600 dengan elevasi 1.298,40 m di atas muka laut, berkoordinat

X=296.048,18; Y=908.9905,24. Berikut lokasi pembangunan jalan baru Batas Kota Singaraja–Mengwitani dapat dilihat pada **Gambar 1**.

Pada lokasi jalan baru Batas Kota Singaraja–Mengwitani memiliki beberapa lereng yang cukup tinggi. Ketinggian lereng tersebut mencapai 38,9 m. Lereng tersebut merupakan lereng buatan yang ada dikarenakan galian tinggi pada lokasi trase jalan. Untuk meningkatkan stabilitas lereng dilakukan perkuatan agar tidak terjadi longsor. Pada pembangunan ja-

lan Batas Kota Singaraja – Mengwitani terdapat tiga perkuatan lereng yaitu: dinding penahan tanah, *soil nailing*, dan *cocomesh*. Untuk perkuatan lereng tinggi menggunakan *soil nailing*. Kondisi eksisting lereng pada pembangunan jalan Batas Kota Singaraja–Mengwitani dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 1. Lokasi Pembangunan Jalan Baru Batas Kota Singaraja – Mengwitani

Soil nailing adalah teknik konstruksi yang dapat digunakan sebagai salah satu metode untuk memperkuat kondisi lereng tanah yang tidak stabil atau sebagai teknik konstruksi yang digunakan untuk menambah keamanan bagi lereng eksisting yang telah stabil. *Soil nailing* pertama kali diaplikasikan sebagai perkuatan untuk sebuah dinding penahan tanah di Perancis Tahun 1961. Lereng dengan perkuatan *soil nailing* akan mengalami deformasi secara horizontal dan vertikal saat konstruksi maupun setelah konstruksi. Deformasi terbesar terletak pada bagian atas lereng [1].

Telah dilakukan beberapa penelitian tentang deformasi dan stabilitas lereng soil nailing dengan pengaruh faktor lingkungan. Beberapa contoh dari faktor lingkungan adalah naiknya muka air tanah dan beban diatas lereng (*surcharge*). Keberadaan air tanah menambah beban lereng sehingga meningkatkan gaya dorong material dan menimbulkan berkurangnya kekuatan geser material pada badan lereng untuk menahan longsor [2]. Adanya beban di atas lereng juga dapat memperbesar deformasi pada puncak lereng. Semakin besar *surcharge* yang dibebankan pada lereng dengan perkuatan *soil nailing*, maka deformasi juga semakin besar [3].



Gambar 2. Kondisi Eksisting STA 0+275

Faktor lingkungan yang lain adalah gempa. 15 Oktober 2021 telah terjadi gempa dengan *magnitude* 5,1 yang berlokasi 18 km barat laut Bedugul dengan kedalaman 10 km [4]. Gempa tersebut menyebabkan kerusakan pemukiman yang cukup parah. Namun kondisi lereng pada jalan baru Batas Kota Singaraja–Mengwitani masih stabil, kondisi eksisting terlihat pada **Gambar 2**. Dengan adanya kejadian gempa tersebut perlu dilakukan analisis deformasi dan stabilitas lereng. Permasalahan dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh beban gempa terhadap terhadap deformasi dan stabilitas global lereng. Mengingat telah terjadi gempa diwaktu dekat ini.

Pada penelitian ini akan disusun grafik hubungan antara stabilitas lereng dan deformasi arah lateral dengan variasi *Peak Ground Acceleration (PGA)* yang cenderung meningkat. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui kecenderungan perilaku antara *safety factor* dan deformasi lateral dengan semakin meningkatnya *PGA*. Deformasi lateral dapat diukur di lapangan menggunakan alat ukur inklinometer. Pemasangan inklinometer dan tata cara pengamatannya sudah diatur oleh SNI 3404:2008. Pemilik ruas jalan (Kementerian PUPR) dapat menggunakan hasil analisis ini agar mendapatkan batas bahaya sebelum lereng tersebut longsor jika terjadi gempa.

2. Metode

A. Studi Literatur

Mempelajari dan memahami konsep-konsep yang digunakan dalam menentukan *Peak Ground Acceleration (PGA)*, menentukan parameter tanah, dan menentukan parameter *soil nailing*. Adapun bahan studi yang akan dipakai dalam analisis ini adalah sebagai berikut :

- Analisa parameter tanah
- *Peak Ground Acceleration (PGA)* Peta PusGEN 2017
- Analisa parameter *soil nailing*

B. Pengumpulan dan Analisa Data Lapangan

Data-data yang digunakan dalam analisis ini adalah data sekunder, yaitu sebagai berikut.

a) Data pelaksanaan Pembangunan Jalan Baru Batas Kota Singaraja–Mengwitani (*Shortcut* 5-6) yang meliputi:

- Peta lokasi
- *Long section* jalan
- *Cross section* jalan

b) Data tanah yang mencakup:

- Stratigrafi tanah
- Data hasil uji *Standart Penetration Test (SPT)*
- Bor log
- Sifat fisik tanah
- Sifat teknis tanah

C. Analisis Parameter Tanah

Lokasi yang akan dianalisis adalah lokasi dengan ketinggian lereng tertinggi, yaitu STA 0+275. Parameter tanah yang digunakan dalam analisis ini merupakan hasil pengujian bor dalam dan *Standart Penetration Test (SPT)*. *Undistrib* *Sampel* diambil pada kedalaman 3,5 m – 4 m.

Nilai *NSPT* dari hasil pengujian dikoreksi terhadap pengaruh tegangan efektif vertikal (*overburden*) yang dinyatakan dengan $(N_1)_{60}$. Nilai-nilai koreksi dan persamaan untuk perhitungan $(N_1)_{60}$ diambil dari SNI 4153-2008. Berikut Persamaan 1 untuk menghitung $(N_1)_{60}$.

$$(N_1)_{60} = N_M \times C_N \times C_E \times C_B \times C_R \times C_S \quad (1)$$

dimana:

$(N_1)_{60}$ = nilai SPT yang dikoreksi terhadap pengaruh efisiensi tenaga 60%;

N_M = hasil uji SPT di lapangan;

C_N = faktor koreksi terhadap tegangan vertikal efektif (nilainya $\leq 1,70$);

C_E = faktor koreksi terhadap rasio tenaga palu

C_B = faktor koreksi terhadap diameter bor

C_R = faktor koreksi untuk panjang batang SPT

C_S = koreksi terhadap tabung contoh (*samplers*)

Pemodelan pada *Plaxis* dipilih dengan metode *Undrained A*. *Undrained A* dipilih berdasarkan parameter yang diinput dalam kondisi parameter efektif karena sebagian besar jenis tanah pada lereng yang akan di analisis adalah tanah berpasir. Untuk nilai modulus elastisitas yang diinput adalah E_{50} . Nilai E_{50} didapat dari grafik korelasi hubungan $(N_1)_{60}$ dan E_{50} [5]. Nilai *poisson ratio* didapat dari tabel korelasi jenis tanah dan

poisson ration [6]. Nilai kohesi efektif (c') didapat dari 2/3 dikali nilai kohesi (c) dari pengujian laboratorium. Nilai sudut geser dalam efektif (ϕ') didapat dari 2/3 dikali nilai sudut geser dalam (ϕ) dari pengujian laboratorium, sedangkan pada lapisan tanah yang tidak diuji sifat teknis tanah, nilai sudut geser dalam (ϕ) diambil dari tabel korelasi perkiraan harga sudut geser berdasarkan *NSPT*. Tabel korelasi tersebut juga dapat digunakan untuk memperkirakan nilai berat volume jenuh (γ_{sat}). Untuk nilai koefisien permeabilitas di dapat dari tabel korelasi deskripsi tanah dengan nilai koefisien permeabilitas [7].

D. Analisis Parameter Nail

Soil nailing yang digunakan pada Proyek Pembangunan Jalan Baru Batas Kota Singaraja–Mengwitani (*Shortcut* 5-6) ini merupakan besi dengan diameter 25 mm. Diameter bor 100 mm. Rongga antara besi dengan tanah diisi beton (*grout*) dengan kuat tekan (f_c) 21 Mpa. Modulus elastisitas yang digunakan adalah modulus elastisitas ekuivalen antara besi dengan bahan *grout*.

Pemodelan *soil nailing* pada *Plaxis* menggunakan *Plate*. Berikut persamaan 2, 3, dan 4 untuk menghitung modulus elastisitas ekuivalen (E_{eq}), *axial stiffness (EA)*, dan *bending stiffness (EI)* [8].

$$E_{eq} = E_n \frac{A_n}{A} + E_g \frac{A_g}{A} \quad (2)$$

$$EA = \frac{E_{eq}}{S_H} \times \frac{\pi D_{DH}^2}{4} \quad (3)$$

$$EI = \frac{E_{eq}}{S_H} \times \frac{\pi D_{DH}^4}{64} \quad (4)$$

dimana:

E_n = modulus elastisitas nail

E_g = modulus elastisitas bahan *grout*

$A = 0.25\pi D_{DH}^2$

D_{DH} = diameter lubang bor

Perhitungan nilai modulus elastisitas ekuivalen perlu dilakukan karena *soil nailing* terdiri dari dua bahan, yaitu besi ulir D25 dan bahan *grout* dari beton. Berikut detail penampang *soil nailing* dapat dilihat pada **Gambar 7**.

E. Analisis Beban Gempa

Peak Ground Acceleration (PGA) yang digunakan pada analisis ini diambil dari Peta Sumber dan bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017 ISBN 978-602-5489-01-3 [9]. sesuai pasal 7 SNI 8460:2017 Gempa rencana untuk lereng galian dan timbunan ditetapkan dengan kemungkinan terlewati besarnya selama umur rencana 50 tahun adalah 2% atau setara dengan periode ulang 500 tahun [10]. *Peak Ground Acceleration (PGA)* untuk pulau Bali berwarna kuning dengan nilai 0,4g – 0,5g. Oleh karena itu dilakukan variasi

beban gempa 0,4g; 0,45g; 0,5g; dan 0,55g dengan asumsi ada kenaikan *PGA* pada tahun berikutnya.

Berdasarkan hasil *NSPT*, tanah pada lokasi lokasi penelitian rata-rata masuk pada klasifikasi situs tanah sedang (*NSPT* 15 sampai 50). Berdasarkan SNI 8460:2017 faktor amplifikasi untuk tanah sedang bervariasi sesuai dengan *Peak Ground Acceleration (PGA)* yang ditinjau. Faktor amplifikasi tersebut dikalikan dengan *Peak Ground Acceleration (PGA)* untuk mendapatkan percepatan puncak di permukaan. Beban gempa yang diinput pada aplikasi *plaxis* diitung dengan sistem *pseudostatik*.

F. Analisis Menggunakan Aplikasi *Plaxis*

Analisis deformasi dan stabilitas lereng pada penelitian ini menggunakan aplikasi *Plaxis V21*. Hal tersebut dilakukan karena untuk analisis lereng dengan limit equilibrium method hanya dapat mencari nilai *safety factor* dan tidak bisa mencari nilai deformasi dari lereng yang di analisis.

Analisis menggunakan aplikasi *Plaxis* menggunakan beberapa tahap yaitu: pemodelan geometrik *cross section* STA 0+275, input parameter tanah, input parameter soil nailing, input muka air tanah, input *Peak Ground Acceleration (PGA)* yang telah dikali faktor amplifikasi, dan calculation. *Stage construction* pada *Plaxis* disusun berdasarkan variasi kenaikan *Peak Ground Acceleration (PGA)*.

3. Hasil dan Pembahasan

A. Parameter Tanah dan *Soil Nailing*

Nilai parameter tanah didapat dari pengujian bor dalam dan *Standart Penetration Test (SPT)*. Berikut deskripsi tanah pada masing-masing lapisan dapat dilihat pada **Tabel 1**. Koreksi nilai *NSPT* menggunakan nilai *overburden*, $CE = 1$ palu otomatis, $CB = 1$ diameter bor 100 mm, $CR = 0.8$ panjang batang 4 m, $CS = 1$ pengambilan contoh menggunakan tabung standar. Kemudian dihitung menggunakan Persamaan 1.

Parameter tanah yang diinput pada aplikasi *Plaxis* adalah Berat volume jenuh (γ_{sat}), *secant modulus* (E_{50}), *poisson ratio* (ν), koefisien permeabilitas (k), kohesi efektif (c'), sudut geser dalam efektif (ϕ'), dan sudut dilatansi efektif (ψ'). Berikut nilai parameter tersebut dapat dilihat pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**.

Pada pemodelan *Plaxis*, *soil nailing* dimodelkan sebagai plate. Parameter yang diinput pada *tools plate* adalah *axial stiffness (EA)*, *bending stiffness (EI)*, *poisson ratio* (ν), dan berat besi (w). Untuk nilai *axial stiffness (EA)* dan *bending stiffness (EI)* dihitung menggunakan Persamaan 2, 3, dan 4.. Nilai modulus elastisitas besi adalah 2×10^8 kN/m², sedangkan modulus elastisitas beton adalah $2,15 \times 10^7$ kN/m² (SK

SNI T-15-1991-03). Berikut nilai parameter *plate* yang akan diinput pada *Plaxis* dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 1. Deskripsi Tanah dan Koreksi Nilai *NSPT*

Kedalaman (m)	Deskripsi	NSPT	(N_1) ₆₀	Nama Layer
0 – 4,5	Lanau Pasiran	4	5,4	Layer 1
4,5 – 12,5	Pasir Lanauan	7	7,7	Layer 2
12,5 – 18,5	Pasir	22	18,9	Layer 3
18,5 – 38,5	Pasir Kerikilan	60	30,1	Layer 4

Tabel 2. Nilai Parameter Fisis Tanah

Nama Layer	NSPT	Konsistensi	γ_{sat} (kN/m ³)	k (m/day)
Layer 1	4	Soft	13,97	$8,64 \times 10^{-5}$
Layer 2	7	Loose	15,19	$8,64 \times 10^{-3}$
Layer 3	22	Medium	17,59	$8,64 \times 10^{-3}$
Layer 4	60	Very Dense	22,07	8.64

Tabel 3. Nilai Parameter Mekanis Tanah

Nama Layer	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	ψ' (°)	E_{50} (kN/m ²)
Layer 1	45,78	4,06	2,71	21769,36
Layer 2	0	19,23	12,82	57659,53
Layer 3	0	22,06	14,71	141562,11
Layer 4	0	27,33	18,22	225580,11

Tabel 4. Nilai Parameter *Soil Nailing*

Nama Material	EA (kN/m)	EI (kNm ² /m)	w (kN/m)	ν
<i>Soil Nail</i>	128381,08	$8,02 \times 10^{13}$	2,71	0.29

B. Beban Gempa

Beban gempa yang diinput pada aplikasi *plaxis* dihitung dengan sistem *pseudostatic*. Sesuai SNI 8460:2017 pendekatan modifikasi Mononabe-Okabe mengasumsikan koefisien seismik vertikal (k_v) = 0. Koefisien seismik horizontal (k_h) = *Peak Ground Acceleration (PGA)* yang telah disesuaikan dengan kondisi situs. Bila deformasi tanah permanen sebesar 1-2 inci diizinkan pada saat desain kejadian seismik, maka reduksi 50% dari koefisien seismik horizontal dapat diberlakukan. Berikut perhitungan koefisien seismik horizontal (k_h) dapat dilihat pada **Tabel 5**.

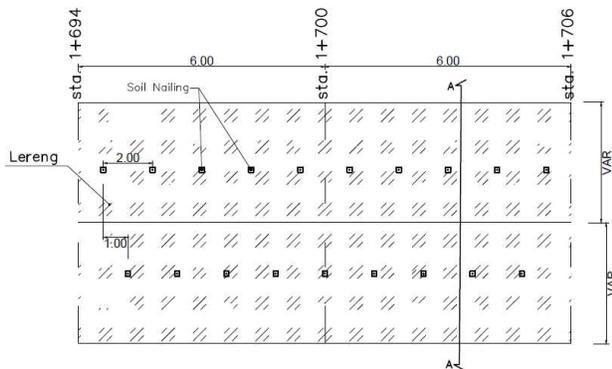
C. Pemodelan Geometrik STA 0+275

Pemodelan pada *Plaxis* dilakukan berdasarkan geometrik eksisting pada *asbuilt drawing*. *Cross section* STA 0+275

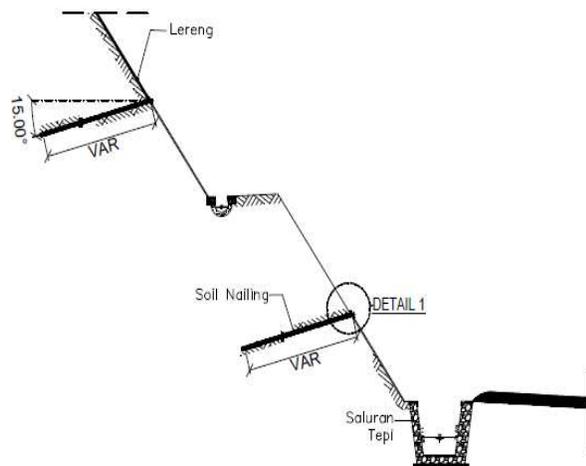
dapat dilihat pada **Gambar 2** dan **Gambar 6**. Konfigurasi pemasangan *soil nailing* di lapangan dilakukan dengan jarak horizontal 2 m sedangkan jarak vertikal bervariasi. Kemiringan pemasangan *soil nailing* adalah 15°. Untuk panjang *soil nailing* bervariasi pada masing-masing lereng. Pada STA 0+275 panjang *nail* pada lereng sisi kanan adalah 5 m, sedangkan panjang *soil nailing* pada lereng sisi kiri adalah 4 m. Konfigurasi pemasangan *soil nailing* dapat dilihat pada **Gambar 3, 4, dan 5**.

Tabel 5. Nilai Koefisien Seismik Horizontal

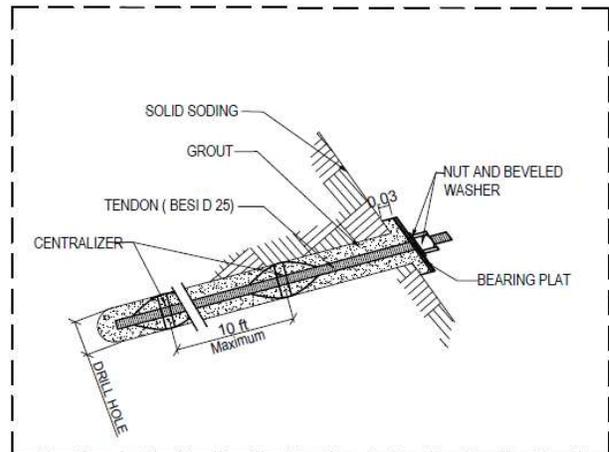
STA	Klasifikasi Situs	PGA (g)	FPGA	PGAM (g)	k_h
0+275	Tanah	0,40	1,10	0,44	0,22
		0,45	1,05	0,47	0,24
	Sedang	0,50	1,00	0,50	0,25
		0,55	1,00	0,55	0,28



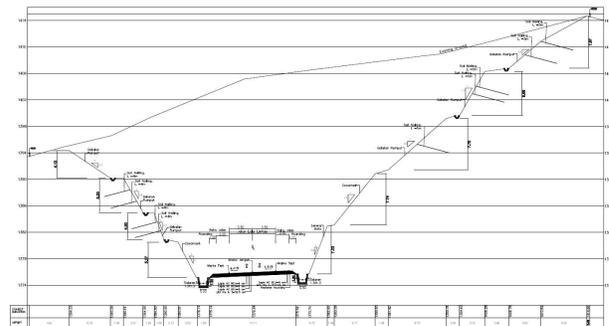
Gambar 3. Konfigurasi Pemasangan Soil Nailing



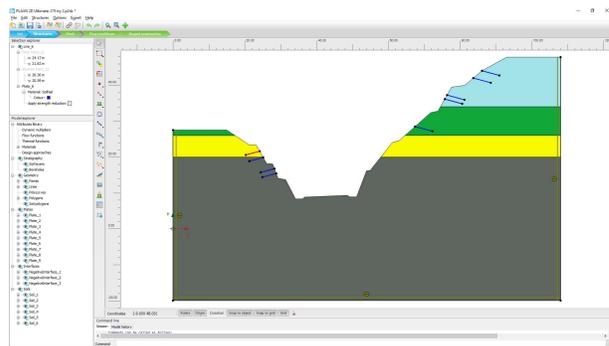
Gambar 4. Potongan A-A



Gambar 5. Detail 1



Gambar 6. Cross Section 0+275



Gambar 7. Pemodelan Cross Section 0+275

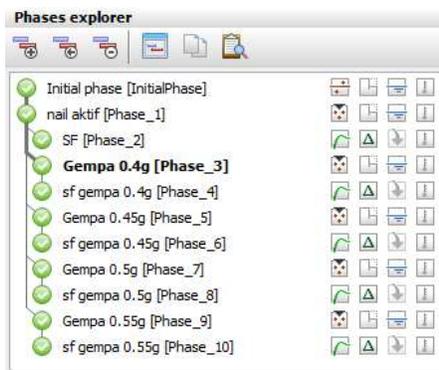
Pemodelan dilakukan dengan tipe *plane strain* dengan element 15 nodes. Untuk mempermudah pemodelan, dilakukan penomoran koordinat secara detail pada setiap titik geometrik tersebut. Hasil pemodelan pada *Plaxis* dapat dilihat pada **Gambar 7**. Pemodelan warna untuk memperjelas stratigrafi tanah dilakukan sesuai dengan warna *layer* pada **Tabel 1**. Warna biru menunjukkan jenis tanah lanau pasiran dengan konsistensi tanah *soft*. Warna hijau menunjukkan jenis tanah pasir lanauan dengan konsistensi *loose*. Warna kuning

menunjukkan jenis tanah pasir dengan konsistensi *medium*. Warna abu-abu menunjukkan jenis tanah pasir kerikilan dengan konsistensi *very dense*.

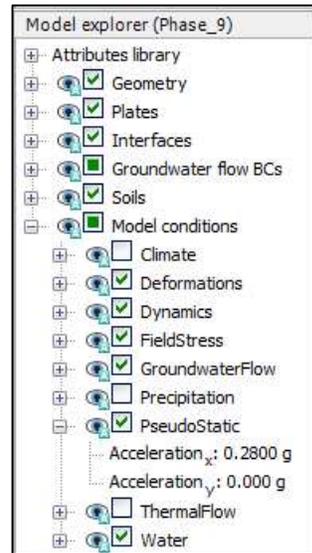
Setelah pemodelan selesai, proses analisis dilanjutkan dengan *mesh*. Pada analisis ini digunakan *generate mesh* dengan *element distribution* medium. Pada proses ini seluruh model dibagi dalam beberapa bagian dengan bentuk segitiga kecil. Kemudian proses analisis dilanjutkan dengan input muka air tanah. Pada hasil pengujian tanah tidak ditemukan muka air tanah karena lokasi penelitian merupakan daerah pegunungan.

Proses analisis terakhir pada aplikasi *Plaxis* ini adalah *staged construction*. Pada tahap ini dilakukan variasi terhadap beban gempa yang di analisis. Masing-masing *phase* memiliki *calculation type* yang berbeda. Untuk *initial phase* dipilih *K0 Procedure* karena kondisi lapisan tanah lurus horizontal. *Phase nail* aktif merupakan tahap mengaktifkan *nail* dengan *calculation type plastic*. *Calculation type plastic* juga digunakan untuk setiap *phase* gempa. Pada setiap *phase* gempa dimasukkan koefisien seismik horizontal pada bagian *pseudostatic*. Pada setiap *phase* gempa ataupun eksisting, ditambahkan satu *phase* dengan *calculation type safety*. *Phase* tersebut digunakan untuk menghitung nilai *safety factor terkecil* dari lereng yang dianalisis. Detail *phase* yang digunakan dapat dilihat pada **Gambar 8**. Berikut contoh koefisien seismik horizontal yang telah dimasukkan pada bagian *pseudostatic* dapat dilihat pada **Gambar 9**.

Setelah seluruh *phase* telah di input, dilakukan *calculation* terhadap seluruh *phase* tersebut. *Calculation* dilakukan dengan tidak memilih *nodes* karena tidak diperlukan menganalisis menggunakan grafik *output* dari *Plaxis*. Setelah proses *calculation* seluruh *phase* selesai, masing-masing *phase* tersebut ditinjau deformasi dan faktor keamanan pada titik puncak atas lereng.



Gambar 8. Phase pada Aplikasi Plaxis



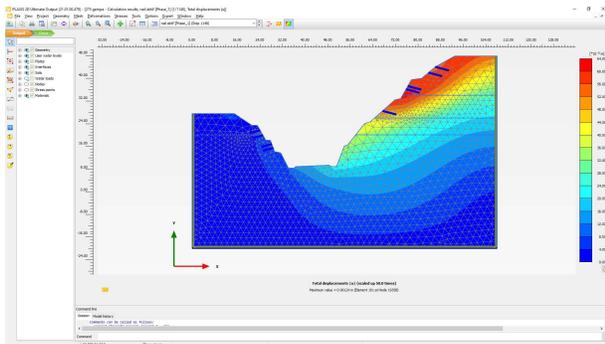
Gambar 9. Pseudostatic Pada Plaxis

D. Analisis Deformasi dan Stabilitas Lereng

Pada masing-masing *phase nail* aktif dan gempa ditinjau deformasi bagian puncak lereng. Sedangkan *phase safety factor* digunakan untuk melihat nilai faktor keamanan lereng dengan variasi beban gempa yang ditinjau. Berikut contoh output dari aplikasi *plaxis* pada *phase nail* aktif (eksisting) dapat dilihat pada **Gambar 10 dan 11**.

Analisis deformasi dilakukan pada puncak lereng tertinggi bagian kanan yaitu pada koordinat $x = 93,081$ $y = 47,847$. **Gambar 11** menunjukkan deformasi horizontal yang terjadi adalah $22,328 \times 10^{-3}$ m. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada kondisi pemodelan eksisting, puncak lereng bagian kanan bergeser arah horizontal sebesar 2,23 cm. Titik puncak lereng bagian kiri memiliki ketinggian yang lebih rendah dari lereng bagian kanan. Puncak lereng tersebut berada pada koordinat $x = 15$ $y = 27,524$. Deformasi yang terjadi pada lereng tersebut adalah $1,958 \times 10^{-3}$ m. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada kondisi pemodelan eksisting, puncak lereng bagian kiri bergeser arah horizontal sebesar 0,19 cm. Deformasi yang terjadi pada puncak lereng bagian kiri lebih kecil jika dibandingkan dengan deformasi puncak lereng bagian kanan. Hal tersebut terjadi karena lereng kanan lebih tinggi dari pada lereng kiri. Selain itu konsistensi tanah pada lereng kiri lebih bagus dari pada lereng kanan.

Pada kondisi pemodelan eksisting dianalisis juga faktor keamanan kondisi eksisting. **Gambar 12** menunjukkan nilai faktor keamanan pada *phase SF*. Faktor keamanan yang didapat adalah 3,319. Lereng tersebut masih aman karena faktor keamanan masih diatas 1,5.



Gambar 10. Output Total Displacement Pada Plaxis

Soil element	Node	Local number	X [m]	Y [m]	u _x [10 ⁻³ m]	u _y [10 ⁻³ m]	u [10 ⁻³ m]
Clus. 1 - El. 1 Layer 1 Soil_6_1	23386	1	97.447	47.847	-19.223	-56.043	59.248
	23298	2	93.081	47.847	-22.328	-54.502	58.899
	23308	3	95.650	44.959	-22.844	-52.592	57.339
	23303	4	95.264	47.847	-21.385	-55.948	59.895
	23300	5	94.366	46.403	-23.202	-54.475	59.210
	23313	6	96.549	46.403	-20.610	-54.459	58.228
	23302	7	96.356	47.847	-20.425	-56.094	59.697
	23304	8	94.173	47.847	-22.037	-55.481	59.697
	23301	9	93.723	47.125	-22.968	-54.808	59.426
	23299	10	95.008	45.681	-23.141	-53.698	58.472
	23312	11	96.099	45.681	-21.615	-53.584	57.780
	23314	12	96.998	47.125	-19.807	-55.263	58.705
	23305	13	95.906	47.125	-21.055	-55.371	59.239
	23306	14	94.815	47.125	-22.118	-55.273	59.534
	23307	15	95.457	46.403	-21.968	-54.594	58.848

Gambar 11. Detail Deformasi Pada Titik Tinjau

Reached values	
Reached total time	0.000 day
CSP - Relative stiffness	1.672E-3
ForceX - Reached total force X	0.000 kN
ForceY - Reached total force Y	0.000 kN
Pmax - Reached max pp	4385 kN/m ²
ΣM _{stage} - Reached phase proportion	0.000
ΣM _{weight} - Reached weight proportion	1.000
ΣM _{sf} - Reached safety factor	3.319

Gambar 12. Faktor Keamanan Pada Phase SF

Analisis deformasi dan faktor keamanan dilanjutkan pada *phase* variasi beban gempa yang telah di input pada bagian *pseudostatic*. Berikut rekapitulasi deformasi dan faktor keamanan pada kondisi variasi beban gempa dapat dilihat pada Tabel 6 dan Gambar 13.

Sesuai SNI 8460:2017 Pasal 10 tentang deformasi dinding *soil nailing*, deformasi maksimum pada puncak dinding lereng dapat diprediksi menggunakan rumus empiris. Untuk tanah pasiran adalah $1/500 \times h$. Dimana h adalah tinggi lereng. Dalam penelitian ini lereng yang ditinjau adalah lereng

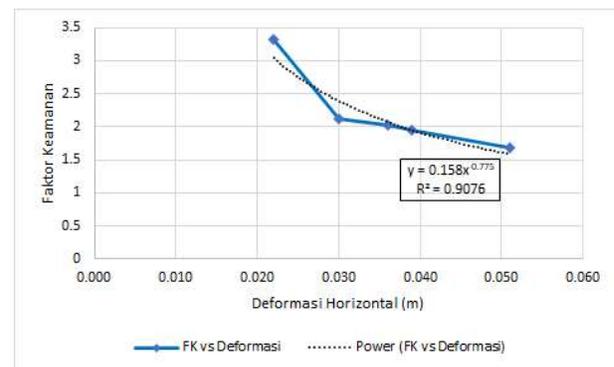
sisinya kanan yang memiliki ketinggian 38,96 m. Berikut perhitungan deformasi maksimum sesuai SNI 8460:2017:

$$\begin{aligned} \delta_h &= 1/500 \times h \\ &= 1/500 \times 38.96 \text{ m} \\ &= 0,08 \text{ m} \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut diperoleh deformasi maksimum pada puncak dinding adalah 0,08 m. Seluruh angka deformasi yang didapat dari hasil pemodelan masih dibawah dari nilai deformasi maksimum. Namun tetap perlu diperhatikan pengaruh dari beban Gempa yang cenderung memperbesar nilai deformasi lereng.

Tabel 6. Rekapitulasi Faktor Keamanan dan Deformasi

No.	Phase	Deformasi (m)	Faktor Keamanan
1.	Nail Aktif (Eksisting)	0,02232	3,319
2.	Gempa 0.4g	0,03008	2,120
3.	Gempa 0.45g	0,03632	2,026
4.	Gempa 0.5g	0,03962	1,946
5.	Gempa 0.55g	0,05081	1,685



Gambar 13. Hubungan Faktor Keamanan vs Deformasi

Gambar 13 menunjukkan bahwa semakin besar beban gempa yang diberikan maka deformasi pada puncak lereng semakin besar. Pada *phase nail* aktif (eksisting) lereng menahan beban statik yaitu berat sendiri tanah. Dalam kondisi tersebut deformasi yang terjadi pada puncak lereng yaitu 0,02232 m. Deformasi tersebut naik sebesar 36,36% menjadi 0,03008 m pada *phase* Gempa 0,4g. Peningkatan deformasi semakin besar jika ditinjau dari deformasi awal pada *phase nail* aktif (eksisting). *Phase* 0,45g dan 0,5g terjadi peningkatan deformasi sebesar 63,64% dan 77,27% dari *phase nail* aktif (eksisting). Deformasi terbesar terjadi pada *phase* Gempa 0,55g yaitu 0,051 m. Pada *phase* tersebut terjadi peningkatan deformasi sebesar 131,82% dari *phase nail* aktif (eksisting). Peningkatan deformasi pada analisis ini memiliki hasil yang bervariasi dengan peningkatan beban gempa

0,05g, namun deformasi cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya beban gempa.

Untuk faktor keamanan semakin besar beban gempa maka semakin kecil faktor keamanan lereng yang dianalisis. Penurunan faktor keamanan dapat dilihat pada **Tabel 6** dan **Gambar 13**. Pada kondisi eksisting, hasil analisis faktor keamanan menunjukkan angka 3,319, namun ketika ditambah beban gempa sebesar 0,4g faktor keamanan turun 36,13% menjadi 2,12. Hal tersebut menunjukkan bahwa beban gempa berpengaruh signifikan terhadap kestabilan lereng. Pada variasi beban gempa 0,4g; 0,45g; 0,5g terjadi penurunan rata-rata faktor keamanan sebesar 2,62%. Penurunan faktor keamanan terbesar terjadi pada *phase* Gempa 0,55g yaitu turun 7,86% dari *phase* *naill* aktif (eksisting). Faktor keamanan pada *phase* Gempa 0,55g adalah 1,685. Namun angka tersebut menunjukkan bahwa lereng masih dalam keadaan stabil.

Deformasi dan faktor keamanan pada *phase* Gempa 0,55g menunjukkan peningkatan deformasi terbesar dan penurunan faktor keamanan terbesar. Hal tersebut terjadi karena *phase* Gempa 0,55g merupakan *phase* dengan variasi beban gempa maksimum diluar dari ketentuan *Peak Ground Acceleration (PGA)* dari Peta PusGEN 2017. Oleh karena itu pengelola lereng (Kementerian PUPR) perlu mewaspadaai jika terjadi perubahan atau peningkatan *Peak Ground Acceleration (PGA)* di kemudian hari.

Percepatan puncak di permukaan tanah dapat mengakibatkan gaya-gaya inersia signifikan pada lereng atau timbunan dan gaya tersebut dapat mengakibatkan ketidakstabilan atau deformasi permanen (SNI 8460:2017). Oleh karena itu semakin besar beban gempa yang diberikan, maka deformasi pada puncak lereng semakin besar dan faktor keamanan lereng semakin menurun. Penurunan faktor keamanan akibat gempa pernah diteliti oleh Martha Ramdhani, dkk [11]. Penelitian tersebut melakukan analisis lereng dengan kemiringan 60° dan ketinggian 14m dengan 3 lapisan tanah. Jika ditinjau dari nilai kohesi, tanah yang digunakan pada penelitian ini dominan berbutir halus dan memiliki konsistensi medium. Hasil dari penelitian tersebut adalah faktor keamanan lereng menurun setelah diberi beban gempa. Faktor keamanan tanpa beban gempa adalah 1,221 kemudian turun sebesar 5% setelah diberi beban gempa menjadi 1,16. Penelitian yang sama juga telah dilakukan oleh Raifah Rezzyanti, dkk [12]. Penelitian tersebut menganalisis lereng dengan pengaruh frekuensi dan amplitudo gempa yang sudah pernah terjadi. Jenis tanah pada penelitian ini dominan berbutir halus. Hal tersebut ditunjukkan dengan hasil pengujian analisa saringan yaitu lolos saringan 200 sebesar 54,65% dan 53,098%. Konsistensi tanah adalah lunak jika ditinjau dari

nilai kohesi 15,9 kPa dan 4,11 kPa. Hasil perhitungan faktor keamanan lereng tanpa menggunakan gempa adalah 1,053. Namun, ketika lereng diberi beban faktor keamanannya menurun menjadi 0,994. Penurunan faktor keamanan yang terjadi sebesar 5,6%. Aditia Febriasyah, dkk melakukan analisis stabilitas lereng akibat beban gempa 4,9 SR [13]. Jenis tanah yang digunakan pada penelitian ini dominan tanah berbutir halus. Hasil penelitian tersebut adalah pada kondisi eksisting faktor keamanan lereng yang didapat adalah 1,327 sedangkan dengan pengaruh gempa didapat faktor keamanan 0,920. Penurunan faktor keamanan terjadi sebesar 30,67%.

Berdasarkan data dari output pemodelan *Plaxis* didapatkan regresi *power*. Regresi *power* menghasilkan $R^2 = 0,9076$. Angka tersebut mendekati 1 menandakan bahwa regresi tersebut dapat digunakan untuk memprediksi faktor keamanan lereng dengan variasi beban gempa. Hasil regresi *power* dihitung dengan Persamaan 5.

$$y = 0.158x^{-0.775} \quad (5)$$

dimana:

x = deformasi

y = faktor keamanan

Berdasarkan Persamaan 5 dari hasil regresi dihitung deformasi yang terjadi pada saat faktor keamanan = 1 (kritis). Berikut perhitungan deformasi pada saat faktor keamanan = 1 (kritis) :

$$y = 0.158x^{-0.775}$$

$$1 = 0.158x^{-0.775}$$

$$x = 0.09 \text{ m}$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut lereng mencapai faktor keamanan = 1 (kritis) pada saat puncak lereng bergeser sejauh 0.09 m. Nilai tersebut dapat dijadikan ukuran sebagai batas bahaya sebelum lereng mengalami longsor.

Pengukuran deformasi puncak lereng dilakukan menggunakan inklinometer. Pada kondisi eksisting lereng belum dipasang alat inclinometer tersebut. Oleh karena itu perlu segera dipasang alat inklinometer pada puncak lereng agar dapat melakukan pengamatan deformasi arah horizontal.

4. Kesimpulan

Pada analisis faktor keamanan dan deformasi pada lereng dengan kekuatan *soil nailing* dengan pengaruh beban gempa, dapat disimpulkan bahwa:

1. Pada kondisi eksisting, puncak lereng kanan koordinat x = 93,081 y = 47,847 mengalami deformasi sebesar $22,328 \times 10^{-3}$ m. Puncak lereng kiri koordinat x = 15 y = 27,524 mengalami deformasi $1,958 \times 10^{-3}$ m. Deformasi yang terjadi pada puncak lereng bagian kiri lebih kecil jika dibandingkan dengan deformasi puncak lereng

bagian kanan. Hal tersebut terjadi karena lereng kanan lebih tinggi dari pada lereng kiri. Selain itu konsistensi tanah pada lereng kiri lebih bagus dari pada lereng kanan.

2. Pada pemodelan dengan variasi beban gempa, menunjukkan bahwa semakin besar beban gempa yang diberikan maka deformasi pada puncak lereng semakin besar. Peningkatan deformasi pada analisis ini memiliki hasil yang bervariasi dengan peningkatan beban gempa 0,05g, namun deformasi cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya beban gempa. Untuk faktor keamanan, semakin besar beban gempa maka semakin kecil faktor keamanan lereng yang dianalisis. Pada variasi beban gempa 0,4g; 0,45g; 0,5g terjadi penurunan rata-rata faktor keamanan sebesar 2,62%.
3. Deformasi dan faktor keamanan pada *phase* Gempa 0,55g menunjukkan peningkatan deformasi terbesar dan penurunan faktor keamanan terbesar. Hal tersebut terjadi karena *phase* Gempa 0,55g merupakan *phase* dengan variasi beban gempa maksimum diluar dari ketentuan *Peak Ground Acceleration (PGA)* dari Peta PusGEN 2017. Oleh karena itu pengelola lereng (Kementerian PUPR) perlu mewaspadaai jika terjadi perubahan atau peningkatan *Peak Ground Acceleration (PGA)* di kemudian hari.
4. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut lereng mencapai faktor keamanan = 1 (kritis) pada saat puncak lereng bergeser sejauh 0.09 m. Nilai tersebut dapat dijadikan ukuran sebagai batas bahaya sebelum lereng mengalami longsor.

5. Daftar Pustaka

- [1] Lazarte et al, "Soil Nail Walls Reference Manual," FHWA-NHI-14-007 FHWA GEC 007, FHWA GEC 007, February 2015
- [2] Hutahayan, P.P., Trides, Tommy, "Analisis Pengaruh Air Tanah Terhadap Kestabilan Lereng Menggunakan Finite Element Method pada PT. Bharinto Ekatama, Kabupaten Kutai Barat Kalimantan Timur," *Jurnal Teknolodi Mineral FT UNMUL*, vol. 6, no. 2, hal. 9-20, 2018.
- [3] Ghareh, Soheil,, "Parametric Assessment of Soil-Nailing Retaining Structures in Cohesive and Cohesionless Soils," *Measurement* 73 (2015), hal. 341-351, 2015
- [4] USGS,2021,https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/, diakses November 2021
- [5] Gouw, T.L., Saptyanto, Krisandi, "Hitung Balik Nilai Kekakuan Tanah dari hasil Pile Loading Test dengan Menggunakan Program Plaxis," *HATTI*, Des, 2012
- [6] Bowles, Joseph E., "Foundation Analysis and Design", Thrid Edition, New York : Mc. Graw-Hill Companies, Inc, 1982.
- [7] Look, Burt, "Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables", London : Taylor & Francis/Balkema, 2007.
- [8] Babu, G.L.S. Singh, S.P., "Simulation of Soil Nail Structures using PLAXIS 2D," *Plaxis Buletin Spring Issue*, hal. 16-21, 2009.
- [9] Pusat Studi Gempa Nasional, "Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017", Jakarta, 2017.
- [10] Badan Standardisasi Nasional, "Standar Nasional Indonesia SNI 8460:2017 Persyaratan perancangan geoteknik", Jakarta, 2017.
- [11] Ramdhani, Martha., N. S. Surjandari, dan Y. M. Purwana, "Analisis Stabilitas Lereng Akibat Beban Gempa Dengan Perkuatan Dinding Penahan Tanah Menggunakan Software Geoslope Di Desa Tambakmerang - Girimarto - Wonogiri", *eJurnal Matriks Teknik Sipil*, hal. 195-201, Maret 2016.
- [12] Rekzyanti Raifah., S. Balamba., dan L. Manaroinsong, "Analisa Kestabilan Lereng Akibat Gempa", *TEKNO*, vol. 16, No. 66, Des 2016.
- [13] Febriansya, Aditia., A. K. Somantri, A. K. Kamal, S. F. Suryadi, dan A. R. Willianto, "Analisis Stabilitas Lereng Akibat Beban Gempa 4,9 SR Pada Kasus Longsoran Jalan Bandung-Tasik Km. 48 Kabupaten Garut", *POTENSI*, vol. 23, no. 1, April 2021.

Halaman ini sengaja dikosongkan