

TUGAS AKHIR

ANALISIS KESTABILAN LERENG DENGAN *SOIL NAILING* DAN *SHOTCRETE* PADA AREA PT VALE (*SLOPE STABILITY ANALYSIS USING SOIL NAILING AND SHOTCRETE IN THE PT VALE AREA*)

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



**Amanda Allisya Aswat
21511266**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2026**

TUGAS AKHIR

ANALISIS KESTABILAN LERENG DENGAN *SOIL NAILING* DAN *SHOTCRETE* PADA AREA PT VALE (*SLOPE STABILITY ANALYSIS USING SOIL NAILING AND SHOTCRETE IN THE PT VALE AREA*)



Telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

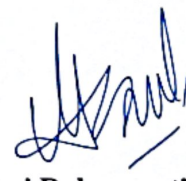
Diuji pada tanggal 15 Juli 2026

Oleh Dewan Penguji :

Pembimbing

Penguji I

Penguji II



Anisa Nur Amalina, S.T., M.Eng.
NIK : 215111305

Dr. Hanindya Kusuma Artati, S.T., M.T.
NIK : 045110407

Melinda Dwi Rahmawati, S.T., M.Eng.
NIK : 245111202

Mengesahkan

Plt. Ketua Program Studi Teknik Sipil




Dinia Anggraheni, S.T., M.Eng.

NIK: 165110105

24/7-26

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila dikemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 22 Juli 2026

yang membuat pernyataan,



Amanda Allisya Aswat

(21511266)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Kestabilan Lereng Dengan *Soil Nailing* Dan *Shotcrete* Pada Area PT Vale”. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia

Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini, penulis banyak mendapatkan bantuan, bimbingan, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Ibu Anisa Nur Amalina, S. T., M. Eng., selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk membimbing penulis hingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan.
2. Ibu Dr. Hanindya Kusuma Artati, S.T., M.T., selaku Penguji 1 yang telah memberikan masukan, saran, dan motivasi kepada penulis.
3. Ibu Melinda Dwi Rahmawati, S.T., M.Eng., selaku Penguji 2 yang telah memberikan masukan, saran, dan motivasi kepada penulis.
4. Aswat T. Ranggo dan Andi Arfah, selaku orang tua penulis tercinta yang telah berkorban, memberi dukungan dan selalu memberikan doa yang tiada henti dari awal hingga selesainya Tugas Akhir ini.
5. Fernanda Aurellia, Nailah Anindhyta, Mohd Rayyan, Fathi Fauzhi, Anggun Nabillah dan Thoriq Nabillah, selaku kakak dan adik penulis yang selalu menghibur dan memberikan dukungan kepada penulis.
6. Ramadhika Gusti Permana yang selalu menemani dan memberikan dukungan selama proses pengerjaan Tugas Akhir, sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan.

7. Riskatul Mukarama Wahab dan Andi Iqbal, selaku sahabat yang membantu segala kebutuhan yang penulis butuhkan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah memberikan dukungan, motivasi, dan pengalaman serta perjalanan hidup selama penulis berada di bangku kuliah.

Penulis menyadari adanya kekurangan dalam Tugas Akhir ini, namun penulis berharap hasil karya ini tetap dapat memberikan kontribusi dan manfaat bagi pihak yang membutuhkan.

Yogyakarta, 22 Juli 2026

yang membuat pernyataan,



Amanda Allisya Aswat

(21511266)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xv
ABSTRAK	xvii
<i>ABSTRACT</i>	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Tinjauan Umum	4
2.2 Penelitian Terdahulu	4
2.2.1 Perkuatan Lereng dengan <i>Soil Nailing</i>	4

2.2.2 Perkuatan Lereng dengan <i>Shotcrete</i>	5
2.2.3 Perbandingan Analisis Lereng Secara Analitik dan Numerik	6
2.3 Perbandingan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Yang Akan Dilakukan	8
BAB III LANDASAN TEORI	13
3.1 Tanah	13
3.1.1 Komponen Tanah	13
3.1.2 Klasifikasi Tanah	15
3.1.3 Properties Tanah	16
3.1.4 Kuat Geser Tanah	20
3.3 Pengujian Tanah	21
3.4 Stabilitas Lereng	22
3.4.1 Faktor Yang Mempengaruhi Stabilitas Lereng	22
3.4.2 Metode Penanggulangan Kelongsoran Lereng	23
3.4.3 Analisis Stabilitas Lereng Dengan Metode <i>Irisan</i>	24
3.4.5 Beban Gempa	27
3.5 <i>Soil Nailing</i>	28
3.5.1 Komponen <i>Soil Nailing</i>	29
3.5.2 Tahanan Friksi (<i>Axial Skin Resistance</i>) pada <i>Soil Nailing</i>	32
3.5.3 Analisis Stabilitas Lereng dengan Perkuatan <i>Soil Nailing</i> dan <i>Shotcrete</i>	35
3.6 Program SLOPE/W	44
3.7 Program PLAXIS	46
BAB IV METODE PENELITIAN	48
4.1 Tinjauan Umum	48

4.2 Lokasi Penelitian	48
4.3 Metode Penelitian	49
4.4 Data Penelitian	50
4.5 Bagan Alir	50
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN	54
5.1 Parameter Tanah	54
5.2 Topografi dan Geometri Lereng	57
5.3 Analisis Stabilitas Lereng Eksisting	58
5.2.1 Pemodelan Lereng Eksisting pada SLOPE/W	58
5.2.2 Analisis Stabilitas Lereng Eksisting dengan Program PLAXIS	60
5.2.3 Analisis Stabilitas Lereng Eksisting dengan Metode <i>Fellenius</i>	62
5.3 Analisis Stabilitas Lereng Setelah Perkuatan <i>Soil Nailing</i> dan <i>Shotcrete</i>	65
5.3.2 Perhitungan Manual dengan Perkuatan dengan Metode Baji (<i>Wedge</i>)	80
5.4 Pembahasan	102
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	107
6.1 Kesimpulan	107
6.2 Saran	108
DAFTAR PUSTAKA	109
LAMPIRAN	112

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu	9
Tabel 3. 1 Berat Jenis Tanah	14
Tabel 3. 2 Tabel Sudut Geser Internal Tanah	17
Tabel 3. 3 Korelasi Nilai N-SPT dengan Kohesi Tanah Lempung	18
Tabel 3. 4 Korelasi Macam Tanah dengan Nilai Modulus Elastisitas	19
Tabel 3. 5 Korelasi Jenis Tanah dengan Nilai <i>Poisson's Ratio</i>	20
Tabel 3. 6 Tabel Sudut Kemiringan Lereng	22
Tabel 3. 7 Properti Baja Ulir Untuk <i>Soil Nailing</i>	30
Tabel 3. 8 Korelasi Metode Instalasi Nail dengan Koefisien Tekanan Tanah Lateral	33
Tabel 3. 9 Estimasi Nilai Sudut Gesek <i>Interface</i>	33
Tabel 3. 10 Perkiraan Nilai K_s	39
Tabel 3. 11 Estimasi Nilai <i>Ultimate Bond Strength</i>	40
Tabel 5. 1 Parameter Tanah Hasil <i>Back Analysis</i>	55
Tabel 5. 2 Nilai N-SPT	56
Tabel 5. 3 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Lereng Eksisting Tiap Pias dengan Metode <i>Fellenius</i>	64
Tabel 5. 4 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Lereng Modifikasi Tiap Pias dengan Metode <i>Fellenius</i>	70
Tabel 5. 5 Rekapitulasi Hasil Perhitungan <i>Axial Skin Resistance</i>	74
Tabel 5. 6 Rekapitulasi Spesifikasi <i>Soil Nailing</i>	75
Tabel 5. 7 Hasil Pembacaan Grafik C1, C2, dan C3 Tiap Lapis Tanah	81
Tabel 5. 8 Rekapitulasi Hasil Perhitungan L_e , T_i dan V_e pada <i>Nail</i> Diameter 25 mm	85
Tabel 5. 9 Rekapitulasi Hasil Perhitungan L_e , T_i , dan V_e pada <i>Nail</i> Diameter 29 mm	86

Tabel 5. 10 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Stabilitas Global pada <i>Nail</i> Diameter 25 mm	88
Tabel 5. 11 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Stabilitas Global pada <i>Nail</i> Diameter 29 mm	89
Tabel 5. 12 Rekapitulasi Nilai Li pada Tiap <i>Nail</i>	96
Tabel 5. 13 Rekapitulasi Nilai Faktor Keamanan Terhadap Putus Tulangan pada <i>Nail</i> Diameter 25 mm	98
Tabel 5. 14 Rekapitulasi Nilai Faktor Keamanan Terhadap Putus Tulangan pada <i>Nail</i> Diameter 29 mm	99
Tabel 5. 15 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Stabilitas terhadap Cabut Tulangan pada <i>Nail</i> Diameter 25 mm	100
Tabel 5. 16 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Stabilitas terhadap Cabut Tulangan pada <i>Nail</i> Diameter 29 mm	101
Tabel 5. 17 Rekapitulasi Nilai SF	104

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Diagram Fase Tanah	14
Gambar 3. 2 Klasifikasi Tanah Berdasarkan USCS	15
Gambar 3. 3 Gaya-Gaya yang Bekerja pada Irisan	25
Gambar 3. 4 Peta Zonasi Gempa Indonesia	28
Gambar 3. 5 Nilai PGA di Lokasi Penelitian	28
Gambar 3. 6 Detail <i>Soil Nailing</i> Dengan Permukaan <i>Shotcrete</i>	29
Gambar 3. 7 Grafik <i>Adhesion Factor</i>	34
Gambar 3. 8 Macam Analisis Stabilitas External dan Internal	36
Gambar 3. 9 Gaya yang Bekerja dalam Metode Baji (<i>Wedge</i>)	37
Gambar 3. 10 Korelasi Koefisien C1, C2 dan C3	39
Gambar 3. 11 Stabilitas Terhadap Penggulingan Pada Perkuatan <i>Soil Nailing</i>	41
Gambar 3. 12 Keruntuhan Putus Tulangan	42
Gambar 3. 13 Keruntuhan Cabut Tulangan	44
Gambar 4. 1 Lokasi Penelitian	49
Gambar 4. 2 Kondisi Lereng Di Area Penelitian	49
Gambar 4. 3 Bagan Alir Penelitian	51
Gambar 4. 4 Bagan Alir Analisis Stabilitas Lereng dengan Program PLAXIS	52
Gambar 4. 5 Bagan Alir Analisis Stabilitas Lereng dengan Program SLOPE/W	53
Gambar 5. 1 Titik Pengujian SPT	54
Gambar 5. 2 Hasil Klasifikasi Tanah USCS	56
Gambar 5. 3 Peta Kontur Lereng Eksisting	57
Gambar 5. 4 Geometri Lereng Eksisting	58
Gambar 5. 5 Hasil Analisis Stabilitas Lereng Eksisting dengan SLOPE/W Tanpa Beban Gempa	59
Gambar 5. 6 Hasil Analisis Lereng Eksisting dengan SLOPE/W pada Kondisi Gempa	60

Gambar 5. 7 Hasil Analisis Distribusi <i>Total Displacement</i> Lereng Eksisting Tanpa Gempa	61
Gambar 5. 8 Hasil Analisis <i>Safety Factor</i> Lereng Eksisting Tanpa Gempa	61
Gambar 5. 9 Hasil Analisis Stabilitas Lereng Eksisting Dengan PLAXIS pada Kondisi Gempa	62
Gambar 5. 10 Pembagian Pias Lereng Eksisting untuk Perhitungan Metode <i>Fellenius</i>	63
Gambar 5. 11 Geometri Lereng Setelah Modifikasi Kemiringan	66
Gambar 5. 12 Hasil Analisis Distribusi <i>Total Displacement</i> Lereng Modifikasi Tanpa Gempa	66
Gambar 5. 13 Hasil Analisis <i>Safety Factor</i> Lereng Modifikasi Tanpa Gempa	67
Gambar 5. 14 Hasil Analisis Distribusi <i>Total Displacement Lereng</i> Modifikasi pada Kondisi Gempa	67
Gambar 5. 15 Hasil Analisis <i>Safety Factor Lereng</i> Modifikasi pada Kondisi Gempa	68
Gambar 5. 16 Pembagian Pias Lereng Modifikasi untuk Perhitungann Metode <i>Fellenius</i>	69
Gambar 5. 17 Profil Lereng Setelah <i>Soil Nailing</i>	76
Gambar 5. 18 Detail A Profil Lereng Setelah <i>Soil Nailing</i>	77
Gambar 5. 19 Hasil Analisis Distribusi <i>Total Displacement</i> Lereng <i>Soil Nailing</i> Tanpa Gempa	78
Gambar 5. 20 Hasil Analisis <i>Safety Factor</i> Lereng <i>Soil Nailing</i> Tanpa Gempa	78
Gambar 5. 21 Hasil Analisis Distribusi <i>Total Displacement</i> Lereng <i>Soil Nailing</i> pada Kondisi Gempa	79
Gambar 5. 22 Hasil Analisis <i>Safety Factor</i> Lereng <i>Soil Nailing</i> pada Kondisi Gempa	79
Gambar 5. 23 Penentuan Panjang Le	84
Gambar 5. 24 Detail A Penentuan Panjang Le	84
Gambar 5. 25 Diagram Tekanan Tanah Lateral	91
Gambar 5. 26 Penentuan Tinggi Li	95
Gambar 5. 27 Detail A Penentuan Tinggi Li	96

Gambar 5. 28 Rekapitulasi Nilai SF Lereng Eksisting	104
Gambar 5. 29 Rekapitulasi Nilai SF Lereng Modifikasi	105
Gambar 5. 30 Rekapitulasi Nilai SF Lereng <i>Soil Nailing</i>	105
Gambar 5. 31 Rekapitulasi Nilai SF	106

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Uji <i>Boring Log</i> BH-01	113
Lampiran 2 Pengujian Sampel Pengeboran	114
Lampiran 3 Pengujian Berat Volume Lapisan Tanah A1	115
Lampiran 4 Pengujian Berat Volume Lapisan Tanah A2	116
Lampiran 5 Pengujian Kadar Air dan Berat Jenis Lapisan Tanah A1 dan A2	117
Lampiran 6 Pengujian Analisis Ukuran Butir pada Lapisan Tanah A1	118
Lampiran 7 Pengujian Analisis Ukuran Butir pada Lapisan Tanah A2	119
Lampiran 8 <i>Triaxial Test</i> pada Lapisan Tanah A1	120
Lampiran 9 <i>Triaxial Test</i> pada Lapisan Tanah A2	121
Lampiran 10 <i>Consolidation Test</i> pada Lapisan Tanah A1	122
Lampiran 11 <i>Consolidation Test</i> pada Lapisan Tanah A2	123
Lampiran 12 Dokumentasi <i>Boring Log</i> BH 01	124
Lampiran 13 Dokumentasi <i>Boring Log</i> BH 01	125
Lampiran 14 Geometri Lereng	126

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

SF	= Safety Factor / Faktor Keamanan Lereng
FK	= Faktor Keamanan
c	= Kohesi tanah (kN/m ²)
ϕ	= Sudut geser internal tanah (°)
γ	= Berat volume basah tanah (kN/m ³)
Gs	= Specific Gravity / Berat jenis tanah
W	= Beban irisan tanah (kN/m)
Q	= Beban merata (kN/m ²)
x	= Panjang irisan tanah (m)
U _i	= Tekanan air pori pada dasar irisan (kN/m ²)
U _r	= Tekanan air pori pada sisi irisan (kN/m ²)
T _i	= Resultan gaya geser efektif pada dasar irisan (kN)
N _i	= Resultan gaya normal efektif pada dasar irisan (kN)
X _i	= Gaya geser efektif sepanjang irisan (kN)
E _i	= Gaya normal efektif sepanjang dasar irisan (kN)
H	= Tinggi lereng (m)
K _s	= Koefisien tekanan tanah
PGA	= Peak Ground Acceleration (g)
ν	= Rasio Poisson
E	= Modulus elastisitas tanah (kN/m ²)
q	= Beban tambahan pada permukaan tanah (kN/m ²)
SPT	= Standard Penetration Test
USCS	= Unified Soil Classification System
FHWA	= Federal Highway Administration
ASTM	= American Society for Testing and Materials
SNI	= Standar Nasional Indonesia
LEM	= Limit Equilibrium Method

PGA	= Peak Ground Acceleration
PVC	= Polyvinyl Chloride
PLTA	= Pembangkit Listrik Tenaga Air
STA	= Station
PLAXIS	= Program for Finite Element Analysis in Soil and Rock Mechanics
SLOPE/W	= Software analisis stabilitas lereng
MPa	= Mega Pascal
kN	= Kilo Newton
m	= Meter
mm	= Milimeter
kgf	= Kilogram force

ABSTRAK

Kestabilan lereng merupakan aspek penting dalam menjamin keselamatan dan keberlangsungan operasional pada area pertambangan terbuka. Lereng pada area *Top Upper Gallery* Balambano Dam PT Vale memiliki potensi ketidakstabilan akibat kondisi geometri lereng, karakteristik tanah, serta pengaruh beban gempa sehingga diperlukan upaya perkuatan untuk meningkatkan faktor keamanannya. Penelitian yang berjudul "Analisis Kestabilan Lereng dengan *Soil Nailing* dan *Shotcrete* pada Area PT Vale" ini bertujuan untuk menganalisis kondisi tanah eksisting berdasarkan data *Standard Penetration Test* (SPT), mengevaluasi nilai faktor keamanan lereng sebelum dan sesudah perkuatan, serta menentukan desain perkuatan lereng yang paling optimal menggunakan kombinasi *soil nailing* dan *shotcrete*.

Penelitian dilakukan menggunakan pendekatan analitik dan numerik. Analisis stabilitas lereng eksisting dilakukan dengan metode *Bishop* melalui program SLOPE/W, metode elemen hingga menggunakan PLAXIS, serta perhitungan manual menggunakan metode *Fellenius*. Selanjutnya dilakukan modifikasi geometri lereng untuk mengurangi sudut kemiringan lereng, kemudian dianalisis kembali menggunakan PLAXIS. Evaluasi stabilitas internal dan eksternal perkuatan dilakukan dengan metode baji (*wedge*). Variasi desain yang dianalisis meliputi penggunaan diameter *nail* sebesar 25 mm dan 29 mm, dengan panjang *nail* 6 m, spasi horizontal dan vertikal 1 m, kemiringan pemasangan 15°, serta kemiringan lereng 45°, sehingga dapat ditentukan konfigurasi perkuatan yang paling efektif..

Hasil penelitian menunjukkan bahwa lereng eksisting berada pada kondisi tidak aman dengan nilai faktor keamanan sebesar 1,030 (SLOPE/W), 0,956 (PLAXIS), dan 1,057 (*Fellenius*) pada kondisi tanpa beban gempa, sedangkan pada kondisi gempa nilai faktor keamanannya sebesar 0,751 (SLOPE/W) dan 0,717 (PLAXIS). Setelah dilakukan modifikasi geometri lereng serta pemasangan *soil nailing* dan *shotcrete*, nilai faktor keamanan meningkat menjadi 1,811 pada kondisi tanpa gempa dan 1,216 pada kondisi gempa berdasarkan analisis PLAXIS, sehingga memenuhi persyaratan keamanan. Hasil analisis metode baji menunjukkan bahwa penggunaan *nail* berdiameter 29 mm memberikan nilai faktor keamanan global sebesar 2,77 serta memenuhi persyaratan stabilitas internal terhadap putus dan cabut tulangan. Oleh karena itu, desain perkuatan yang paling optimal adalah *soil nailing* berdiameter 29 mm dengan panjang 6 m, spasi 1 m × 1 m, kemiringan pemasangan 15°, dan kemiringan lereng 45°, yang dikombinasikan dengan *shotcrete* sebagai pelindung permukaan lereng.

Kata Kunci: Stabilitas lereng, *Soil Nailing*, *Shotcrete*, SLOPE/W, PLAXIS, *Fellenius*

ABSTRACT

Slope stability is a crucial aspect in ensuring the safety and continuity of operations in open-pit mining areas. The slopes in the Top Upper Gallery area of PT Vale's Balambano Dam have the potential for instability due to slope geometry, soil characteristics, and the effects of earthquake loads, necessitating reinforcement efforts to increase their safety factor. This study, entitled "Slope Stability Analysis with Soil Nailing and Shotcrete in the PT Vale Area," aims to analyze existing soil conditions based on Standard Penetration Test (SPT) data, evaluate the slope safety factor before and after reinforcement, and determine the optimal slope reinforcement design using a combination of soil nailing and shotcrete.

The study employed analytical and numerical approaches. The stability analysis of the existing slope was performed using the Bishop method using the SLOPE/W program, the finite element method using PLAXIS, and manual calculations using the Fellenius method. Next, the slope geometry was modified to reduce the slope angle, followed by further analysis using PLAXIS. The internal and external stability of the reinforcement were evaluated using the wedge method. The design variations analyzed included nail diameters of 25 mm and 29 mm, a nail length of 6 m, horizontal and vertical spacing of 1 m, an installation slope of 15°, and a slope gradient of 45°, allowing for the most effective reinforcement configuration.

The results showed that the existing slope was in an unsafe condition with safety factors of 1.030 (SLOPE/W), 0.956 (PLAXIS), and 1.057 (Fellenius) under non-seismic conditions, while under seismic conditions the safety factors were 0.751 (SLOPE/W) and 0.717 (PLAXIS). After modifying the slope geometry and installing soil nailing and shotcrete, the safety factors increased to 1.811 under non-seismic conditions and 1.216 under seismic conditions based on the PLAXIS analysis, thus meeting safety requirements. The results of the wedge method analysis show that the use of 29 mm diameter nails provides a global safety factor of 2.77 and meets the internal stability requirements against reinforcement breakage and pullout. Therefore, the most optimal reinforcement design is 29 mm diameter soil nailing with a length of 6 m, a spacing of 1 m × 1 m, an installation slope of 15°, and a slope of 45°, combined with shotcrete as a slope surface protector.

Keywords: *Slope stability, Soil Nailing, Shotcrete, SLOPE/W, PLAXIS, Fellenius*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kegiatan pertambangan terbuka memiliki risiko tinggi terhadap terjadinya ketidakstabilan lereng yang dapat menyebabkan gangguan operasional, kerusakan fasilitas, dan bahaya kecelakaan kerja. Potensi terjadinya keruntuhan lereng atau longsor karena dipengaruhi oleh beberapa hal, misalnya adanya galian, kemiringan lereng yang curam, intensitas curah hujan yang tinggi, terjadi pergerakan tanah, maupun kondisi tanah yang kurang baik. Terjadinya longsor karena adanya ketidakseimbangan antara gaya yang bekerja pada lereng yaitu gaya pendorong yang terjadi pada lereng lebih besar dari pada gaya penahan yang berada di lereng tersebut (Pragustus dkk, 2019). Kondisi tersebut sangat relevan untuk lingkungan pertambangan tropis seperti Indonesia yang memiliki curah hujan tinggi.

PT Vale Indonesia, sebagai salah satu perusahaan pertambangan nikel terbesar, beroperasi pada wilayah dengan kondisi geologi dan geografis yang kompleks serta sangat berisiko dari aspek kestabilan lereng. Secara geologis, kawasan ini dipengaruhi oleh keberadaan patahan aktif seperti Sesar Matano, yang menurut penelitian bahwa akumulasi energi (*locking*) pada Sesar Matano mengindikasikan bahwa sesar aktif dan berpotensi untuk menghasilkan gempa yang besar (Sarsito, 2010). Keberadaan zona patahan dan aktivitas gempa berulang dapat menghasilkan getaran kuat yang meningkatkan risiko ketidakstabilan lereng, terutama pada area pertambangan terbuka yang sudah mengalami perubahan morfologi dan kondisi geoteknik akibat proses eksploitasi. Dengan demikian, kestabilan lereng pada area operasi PT Vale menjadi isu kritis yang memerlukan analisis yang mendalam, terutama pada lereng-lereng yang memiliki geometri curam atau berdekatan dengan infrastruktur tambang.

Salah satu metode stabilisasi lereng yang diterapkan pada area pertambangan adalah *soil nailing*. Metode ini bekerja dengan menambahkan elemen *nail* secara pasif untuk meningkatkan kohesi dan kekakuan massa tanah. Byrne, dkk (1998) menjelaskan bahwa *soil nailing* efektif dalam meningkatkan faktor keamanan karena mampu memperkuat zona pasif dan menahan pergerakan lateral tanah. Untuk memperkuat permukaan, sistem *soil nailing* biasanya dikombinasikan dengan *shotcrete*, yaitu lapisan beton semprot yang berfungsi mengikat permukaan lereng serta mendistribusikan tegangan. Menurut Aydogan, dkk (2011), kombinasi *soil nailing* dan *shotcrete* terbukti mampu menurunkan deformasi lereng secara signifikan pada kondisi tanah yang relatif lemah.

Dalam menganalisis efektivitas sistem perkuatan tersebut, diperlukan metode analisis numerik yang mampu menggambarkan kondisi tanah dan interaksi struktur secara lebih realistis. PLAXIS merupakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga, telah menjadi standar industri dalam analisis geoteknik. Brinkgreve, dkk (2014) menyatakan bahwa PLAXIS mampu mensimulasikan deformasi, tegangan, serta urutan konstruksi secara akurat, sehingga cocok digunakan untuk memodelkan *soil nailing*, *shotcrete*, dan perubahan geometri lereng secara bertahap sebagaimana terjadi di area tambang.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana kondisi tanah eksisting di area *top upper gallery* Balambano DAM berdasarkan data SPT (*standard penetration test*) dan uji laboratorium?
2. Berapa angka aman lereng di area *top upper gallery* sebelum perkuatan dengan *soil nailing* dan *shotcrete*?
3. Bagaimana desain perkuatan lereng di area *top upper gallery* dengan *soil nailing* dan *shotcrete*?
4. Berapa angka aman lereng di area *top upper gallery* setelah perkuatan dengan *soil nailing* dan *shotcrete*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini antara lain:

1. Mengetahui kondisi tanah eksisting di area *top upper gallery Balambano DAM* berdasarkan data SPT (*standard penetration test*).
2. Mengetahui angka aman lereng di area *top upper gallery* sebelum perkuatan dengan *soil nailing* dan *shotcrete*.
3. Mengetahui desain perkuatan lereng di area *top upper gallery* dengan *soil nailing* dan *shotcrete*.
4. Mengetahui angka aman lereng di area *top upper gallery* setelah perkuatan dengan *soil nailing* dan *shotcrete*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian adalah sebagai berikut.

1. Mendukung upaya mitigasi risiko keruntuhan lereng melalui desain perkuatan lereng yang lebih aman dan efisien.
2. Bagi penulis, menambah pengetahuan dan pemahaman mengenai pentingnya mengetahui optimalisasi nilai keamanan pada lereng terutama di lokasi pertambangan.
3. Dapat dijadikan bahan pertimbangan atau dikembangkan lebih lanjut.
4. Dapat mengenal dan memberikan gambaran cara menganalisis stabilitas lereng menggunakan program PLAXIS.

1.5 Batasan Penelitian

Adapun batasan dalam penelitian ini adalah:

1. Lokasi penelitian pada lereng area PT. Vale, Sorowako, Sulawesi Selatan.
2. Data tanah didapat dari PT. Lycon Asia Mandiri yang bekerjasama dengan PT.Vale.
3. Stratigrafi tanah disesuaikan berdasarkan wawancara kondisi di lapangan
4. Penelitian ini tidak mencakup rincian gambar, prosedur, dan perkiraan biaya yang terperinci.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Lereng adalah bagian dari permukaan bumi yang memiliki kemiringan tertentu terhadap bidang datar. Bentuknya bisa terjadi secara alami maupun dibuat oleh aktivitas manusia. Lereng yang terbentuk secara alami misalnya lereng bukit dan tebing sungai, sedangkan lereng buatan manusia seperti galian, timbunan, tanggul dan kanal sungai serta lereng tambang terbuka (Analiser dan Nurhakiki, 2019). Lereng perlu diperhatikan kestabilannya karena perubahan kondisi tanah atau pengaruh luar dapat memicu terjadinya pergerakan tanah atau longsor.

2.2 Penelitian Terdahulu

Adapun penelitian terdahulu yang berkaitan dengan analisis kestabilan lereng dengan *soil nailing* dan *shotcrete* sebagai berikut.

2.2.1 Perkuatan Lereng dengan *Soil Nailing*

Wibowo, dkk (2023) melakukan penelitian yang berjudul “Pengaruh Sudut Pemasangan *Nail* Terhadap Stabilisasi Lereng Metode *Soil Nailing* Di Ruas Jalan Giriwoyo-Glonggong”. Pada penelitian ini membahas mengenai angka keamanan (*safety factor*) lereng yang dibentuk untuk menyediakan ruang bagi trase Jalan Jalur Lintas Selatan yang berada di Ruas Jalan Giriwoyo –Glonggong KM. STA. 81+200. Perhitungan angka keamanan lereng eksisting dilakukan secara manual maupun dengan bantuan *Software Geoslope* 2012. Perhitungan lereng eksisting tidak memenuhi nilai rekomendasi angka keamanan lereng permanen yang diberikan SNI 8460:2017, yakni sebesar 1,50. Perkuatan dilakukan dengan metode *soil nailing* dengan tipe *drilled and grouted*. *Final facing* menggunakan beton semprot (*shotcrete*). Hasil perhitungan menyatakan bahwa sudut aman pemasangan *nail* terhadap bidang horizontal adalah pada *range* 17° s/d 20°. Dari analisa yang dilakukan, sudut pemasangan *nail* memiliki pengaruh terhadap angka

keamanan global lereng. SNI 8460:2017 memberikan rekomendasi sudut pemasangan *nail* 10° s/d 20° namun untuk kasus di lokasi penelitian ini, sudut 10° s/d 16° tidak memenuhi syarat stabilitas internal (putus *nail* & cabut *nail*). Dilakukan simulasi perhitungan angka keamanan dengan variasi sudut pemasangan *nail* 10° s/d 20° dengan kesimpulan yang didapat adalah semakin besar sudut pemasangan *nail* maka semakin kecil nilai angka keamanan global lereng.

Kurniawan, dkk (2022) melakukan penelitian yang berjudul “Perkuatan Lereng Jalan Menggunakan *Shotcrete* Pembangunan Ruas Jalan Segmen 01 Tawang-Ngalang” penelitian ini membahas tentang rencana pembangunan ruas jalan segmen 01 Tawang-Ngalang yang terkendala dengan galian dalam sehingga terdapat beda elevasi yang membentuk sebuah lereng. Tujuan dari penelitian ini untuk mencari Faktor Keamanan (FK) lereng pada kondisi asli dan kondisi setelah dilakukan perkuatan dengan *soil nailing* dan *shotcrete* serta mencari pengaruh geometri *soil nailing* terhadap nilai faktor keamanan dengan metode kesetimbangan batas dan menggunakan *software Slide V7.0 by rocscience*. Material properties didapat dari hasil uji sifat fisik dan uji sifat mekanik di laboratorium. Sementara geometri lereng dan spesifikasi *shotcrete* dan *soil nailing* tidak dirubah. Berdasarkan hasil analisis didapat nilai FK lereng tanpa perkuatan berkisar 0,736-0,987 dengan metode *Bishop*, Janbu, Morgenster – Price. Setelah dilakukan perkuatan dengan variasi panjang 0,5H, 0,75H dan 1H dengan sudut 20° , 25° , 30° , 35° didapat nilai FK terendah 1,033 dan FK tertinggi 1,772. Pengaruh sudut pada pemasangan *soil nailing* hanya menaikkan FK 0,5%-3% dan pengaruh panjang *soil nailing* terhadap nilai FK adalah 8%-15%. Pada Sta 1+800 didapat geometri efektif adalah 0,75H dengan sudut $27,5^{\circ}$, Sta 1+825 0,75H dengan sudut 29° dan Sta 1+850 1H dengan sudut 31° .

2.2.2 Perkuatan Lereng dengan *Shotcrete*

Putro, dkk. (2023) melakukan penelitian yang berjudul “Analisis Kestabilan Lereng Dengan Perkuatan *Shotcrete* Menggunakan PLAXIS (Studi Kasus : Ruas Jalan Tarempa – Rintis Sta 07+800 Kab. Anambas).”. Penelitian ini membahas permasalahan stabilitas lereng yang disebabkan oleh gangguan keseimbangan pada

lereng. Tujuan utama dari analisis kestabilan lereng adalah untuk memperoleh nilai faktor keamanan (*safety factor*, *SF*). Berdasarkan SNI 8460:2017, nilai faktor keamanan yang digunakan adalah sebesar 1,5 dengan mempertimbangkan biaya, konsekuensi kegagalan lereng, serta tingkat ketidakpastian dalam kondisi analisis. Metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah pemodelan menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D untuk menghitung nilai faktor keamanan pada kondisi awal lereng dan kondisi lereng setelah diberikan perkuatan berupa beton semprot (*shotcrete*). Hasil analisis kestabilan lereng pada ruas jalan Tarempa–Rintis STA 07+800 menunjukkan bahwa pada kondisi awal lereng dengan tanah jenuh diperoleh nilai faktor keamanan sebesar 1,183. Nilai tersebut berada di bawah batas aman, sehingga diperlukan upaya penanganan lereng untuk mencegah terjadinya longsor yang dapat mengganggu arus lalu lintas. Perkuatan menggunakan *shotcrete* dipilih sebagai metode proteksi kestabilan lereng. Setelah dilakukan analisis menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D, nilai faktor keamanan lereng pada kondisi jenuh meningkat menjadi 1,730. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan perkuatan *shotcrete* efektif dalam meningkatkan kestabilan lereng hingga memenuhi persyaratan faktor keamanan sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Hasil dari penelitian ini dapat dijadikan sebagai panduan dalam mendapatkan nilai angka aman lereng menggunakan aplikasi PLAXIS 2D.

2.2.3 Perbandingan Analisis Lereng Secara Analitik dan Numerik

Utomo dan Artati (2019) melakukan penelitian yang berjudul “Analisis Stabilitas Lereng Dengan Perkuatan *Soil Nailing* Dengan Menggunakan Program Geoslope”. Penelitian ini bersifat teoritis dan dimodelkan menggunakan program geoslope. Analisis menggunakan program geoslope akan dibandingkan dengan perhitungan manual menggunakan metode *Fellenius* dan *Bishop* pada lereng tanpa penguatan. Sedangkan untuk lereng dengan penguatan *soil nailing*, analisis yang dilakukan menggunakan metode baji manual akan dibandingkan dengan program geoslope. Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini adalah perhitungan manual metode *Fellenius* diperoleh $SF = 0,9292 < 1,3$ (tidak aman) dan metode *Bishop* diperoleh $SF = 1,125 < 1,3$ (tidak aman). Sedangkan analisis metode *Fellenius*

program geoslope diperoleh $SF = 0,933 < 1,3$ (tidak aman) dan metode *Bishop* diperoleh $SF = 1,125$ (tidak aman). Untuk perhitungan metode baji paku tanah, pada paku 10o, $SF = 1,5391 > 1,3$ (aman) dan program geoslope memperoleh SF tanpa beban gempa = $2,294 > 1,3$ (aman) dan SF dengan beban gempa $1,278 > 1,1$ (aman). Pada paku 20o, $SF = 1,5977 > 1,3$ (aman) dan program geoslope memperoleh SF tanpa beban gempa = $2,944 > 1,3$ (aman) dan SF dengan beban gempa = $1,503 > 1,3$ (aman). Pada paku 30o, $SF = 1,6051 > 1,3$ (aman) dan untuk program geoslope, SF tanpa beban gempa = $3,253 > 1,3$ (aman) dan SF dengan beban gempa = $1,653 > 1,3$ (aman). Dari hasil analisis ditemukan bahwa perbedaan nilai SF antara metode baji dan program geoslope disebabkan oleh metode baji yang menggunakan bidang longsor planar dan geoslope yang menggunakan bidang longsor melingkar

Lomi, dkk (2025) melakukan penelitian yang berjudul “Analisis Kestabilan Lereng pada *Inlet* dan *Outlet* Dengan Perkuatan *Shotcrete* dan *Soil Nailing* (Studi Kasus: Bangunan Pengambilan Bendungan Manikin)”. Penelitian ini berlokasi di Bendungan Manikin terletak di Desa Kuaklalo, Nusa Tenggara Timur (NTT), dengan kondisi geologi yang kurang baik yang didominasi oleh tanah lempung bobonaro yang merupakan salah satu jenis tanah yang ekspansif. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai faktor keamanan pada lereng *inlet* dan *outlet* bangunan pengambilan tanpa perkuatan *shotcrete* dan *soil nailing* dan akibat adanya pembebanan dan setelah diberikan perkuatan *shotcrete* dan *soil nailing*. Analisis stabilitas lereng inlet dengan Geostudio menggunakan dua kondisi yaitu kondisi nonNWL (*slope/w*) tanpa perkuatan $SF=1.141$, dengan perkuatan $SF=1.303$, dan kondisi NWL (*seep/w*) tanpa perkuatan $SF=1.528$, dengan perkuatan $SF=1.844$. Dengan perhitungan manual stabilitas lereng *inlet* tanpa perkuatan $SF=1.260$, akibat adanya gempa $SF=1.148$ dan analisis stabilitas dengan perkuatan *shotcrete* dan *soil nailing* terhadap keruntuhan global $SF=1,708$. Hasil perhitungan stabilitas lereng *outlet* tanpa perkuatan *slope/w* $SF=1.490$, dengan perkuatan 1.597 lalu dengan perhitungan manual tanpa perkuatan menggunakan metode *Bishop* $SF=1.791$, akibat gempa $SF=1.600$ dan analisis stabilitas dengan perkuatan *shotcrete* dan *soil nailing* terhadap keruntuhan global $SF=1,665$.

2.3 Perbandingan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Yang Akan Dilakukan

Berikut merupakan penelitian sekarang dengan beberapa penelitian di atas disajikan dalam bentuk tabel . Dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Penulis Parameter	Wibowo, dkk (2023)	Kurniawan, dkk (2022)	Putro, dkk (2023)	Utomo dan Artati (2019)	Lomi, dkk (2025)	Aswat (2026)
Judul	Peningkatan Stabilitas Lereng Dengan <i>Soil Nailing</i> Dan <i>Shotcrete</i> (Studi Pada Ruas Jalan Ponorogo - Pacitan)	Perkuatatan Lereng Jalan Menggunakan <i>Shotcrete</i> Pembangunan Ruas Jalan Segmen 01 Tawang-Ngalang	Analisis Kestabilan Lereng Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> Menggunakan <i>PLAXIS</i> (Studi Kasus : Ruas Jalan Tarempa – Rintis Sta 07+800 Kab. Anambas).	Analisis Stabilitas Lereng Dengan Perkuatan <i>Soil Nailing</i> Dengan Menggunakan Program Geoslope (Studi Kasus: Dusun Gemawang, Desa Sinduadi, Kecamatan Mlati, Kabupaten Sleman, D.I Yogyakarta)	Analisis Kestabilan Lereng pada <i>Inlet</i> dan <i>Outlet</i> Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan <i>Soil Nailing</i> (Studi Kasus: Bangunan Pengambilan Bendungan Manikin)	Analisis Kestabilan Lereng Dengan <i>Soil Nailing</i> Dan <i>Shotcrete</i> Pada Area PT Vale
Tujuan	Mengetahui pengaruh sudut pemasangan nail terhadap angka keamanan global lereng.	Untuk mencari Faktor Keamanan lereng pada kondisi asli dan kondisi setelah dilakukan perkuatan dan mencari pengaruh geometri <i>soil nailing</i> terhadap nilai faktor keamanan dengan metode kesetimbangan batas.	Memperoleh faktor keamanan dengan <i>software</i> PLAXIS 2D. pada kondisi awal lereng dan kondisi lereng setelah dilakukan perkuatan <i>shotcrete</i> .	Mengetahui tingkat keamanan lereng serta membandingkan hasil analisis stabilitas lereng menggunakan perhitungan manual dan aplikasi GeoSlope pada kondisi lereng tanpa perkuatan dan dengan perkuatan <i>soil nailing</i>	Menganalisis pengaruh perkuatan <i>soil nailing</i> terhadap stabilitas lereng dengan membandingkan nilai faktor keamanan sebelum dan sesudah perkuatan	Mengetahui angka aman lereng sebelum dan sesudah dilakukan perkuatan serta mengetahui design perkuatan <i>soil nailing</i> dan <i>shotcrete</i>

Lanjutan Tabel 2.2 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Penulis Parameter	Wibowo, dkk (2023)	Kurniawan, dkk (2022)	Putro, dkk (2023)	Utomo dan Artati (2019)	Lomi, dkk (2025)	Aswat (2026)
Metode	<i>Software</i> PLAXIS 2D	Pengendalian kinerja <i>soil nailing</i> dilakukan melalui <i>pull-out test</i> yang menghasilkan parameter berupa kurva hubungan beban terhadap perpindahan, gaya tarik maksimum (<i>maximum pull-out force</i>), serta perpindahan total massa tanah.	Metode kesetimbangan batas (LEM), Metode Janbu, Metode <i>Morgenstern and Price</i> , <i>Slide V7</i> by roscience.	Metode kesetimbangan batas (LEM), metode <i>Fellenius</i> , Metode <i>Taylor</i> , Program Geoslope	Metode <i>Fellenius</i> , <i>Software</i> LEM.	Metode <i>Bishop</i> , Metode <i>Fellenius</i> , Metode Baji (<i>wedge</i>), <i>Software</i> PLAXIS 2D

Lanjutan Tabel 2.3 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Penulis Parameter	Wibowo, dkk (2023)	Kurniawan, dkk (2022)	Putro, dkk (2023)	Utomo dan Artati (2019)	Lomi, dkk (2025)	Aswat (2026)
Hasil	Sudut aman pemasangan <i>nail</i> terhadap bidang horizontal adalah pada <i>range</i> 17° s/d 20°. SNI 8460:2017 memberikan rekomendasi sudut pemasangan <i>nail</i> 10° s/d 20° namun untuk kasus di lokasi penelitian ini, sudut 10° s/d 16° tidak memenuhi syarat stabilitas internal (putus nail & cabut <i>nail</i>). Dilakukan simulasi perhitungan angka keamanan	Nilai FK lereng tanpa perkuatan berkisar 0,736-0,987 dengan metode <i>Bishop</i>, Janbu, <i>Morgenster</i> – <i>Price</i>. Setelah dilakukan perkuatan dengan variasi panjang 0,5H, 0,75H dan 1H dengan sudut 20°, 25°, 30°, 35° didapat nilai FK terendah 1,033 dan FK tertinggi 1,772. Pengaruh sudut pada pemasangan <i>soil nailing</i> hanya menaikkan FK 0,5%-3% dan pengaruh panjang <i>soil</i>	Pada kondisi awal didapatkan faktor keamanan sebesar 1,183 pada kondisi tanah jenuh, sehingga diperlukan penanganan pada lereng agar tidak terjadi kelongsoran yang menyebabkan terganggunya arus lalu lintas. Perkuatan <i>shotcrete</i> menjadi metode yang dipilih sebagai proteksi kestabilan lereng yang mendapatkan nilai faktor keamanan sebesar 1,730 dalam	Perhitungan manual metode <i>Fellenius</i> diperoleh $SF = 0,9292 < 1,3$ (tidak aman) dan metode <i>Bishop</i> diperoleh $SF = 1,125 < 1,3$ (tidak aman). Sedangkan analisis metode <i>Fellenius</i> program geoslope diperoleh $SF = 0,933 < 1,3$ (tidak aman) dan metode <i>Bishop</i> diperoleh $SF = 1,125$ (tidak aman). Untuk perhitungan metode baji paku tanah, pada paku 10o, $SF = 1,5391 > 1,3$ (aman) dan program geoslope memperoleh SF tanpa beban gempa = $2,294 > 1,3$ (aman) dan SF dengan beban gempa $1,278 > 1,1$ (aman). Pada paku 20o, $SF = 1,5977 > 1,3$ (aman) dan program geoslope	Stabilitas lereng <i>outlet</i> tanpa perkuatan <i>slope/w</i> $SF=1.490$, dengan perkuatan 1.597 lalu dengan perhitungan manual tanpa perkuatan menggunakan metode <i>Bishop</i> $SF=1.791$, akibat gempa $SF=1.600$ dan analisis stabilitas dengan perkuatan <i>shotcrete</i> dan <i>soil inleting</i> terhadap keruntuhan global $SF=1,665$.	Desain <i>soil nailing</i> yang paling optimal adalah yang menggunakan diameter 29 mm dengan kemiringan dinding lereng 45°, dan spasi 1,1 m. Menghasilkan nilai SF tanpa gempa pada PLAXIS sebesar 1,798 dan dengan beban gempa sebesar 1,229

Lanjutan Tabel 2.4 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Penulis Parameter	Wibowo, dkk (2023)	Kurniawan, dkk (2022)	Putro, dkk (2023)	Utomo dan Artati (2019)	Lomi, dkk (2025)	Aswat (2026)
Hasil	dengan variasi sudut pemasangan nail 10° s/d 20° dengan kesimpulan yang didapat adalah semakin besar sudut pemasangan nail maka semakin kecil nilai angka keamanan global lereng.	<i>nailing</i> terhadap nilai FK adalah 8%-15%. Pada Sta 1+800 didapat geometri efektif adalah 0,75H dengan sudut 27,5°, Sta 1+825 0,75H dengan sudut 29° dan Sta 1+850 1H dengan sudut 31°.	kondisi jenuh setelah dilakukan analisis dengan program PLAXIS	memperoleh SF tanpa beban gempa = 2,944 > 1,3 (aman) dan SF dengan beban gempa = 1,503 > 1,3 (aman). Pada paku 30o, SF = 1,6051 > 1,3 (aman) dan untuk program geoslope, SF tanpa beban gempa = 3,253 > 1,3 (aman) dan SF dengan beban gempa = 1,653 > 1,3 (aman).		

BAB III

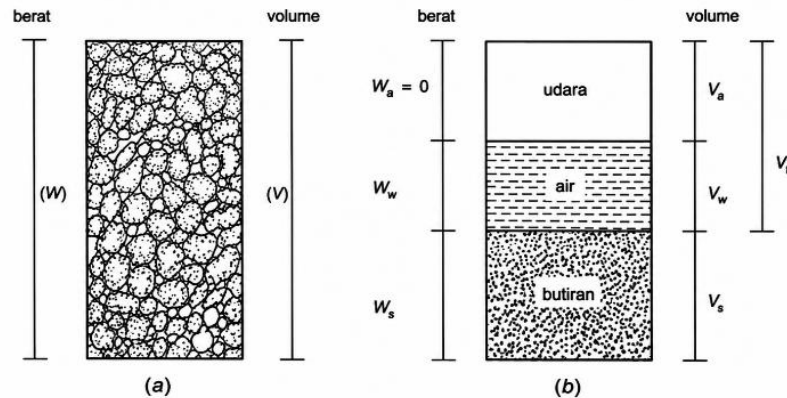
LANDASAN TEORI

3.1 Tanah

Menurut Hardiyatmo (2017) tanah merupakan material alam yang tersusun atas agregat butiran mineral yang tidak terikat secara kimia, serta mengandung bahan organik, air, dan udara yang mengisi ruang antar butir, sehingga sifat mekaniknya sangat dipengaruhi oleh interaksi antar komponen tersebut. Selain tersusun atas komponen padat, air, dan udara, tanah juga memiliki karakteristik yang sangat beragam tergantung pada proses pembentukannya, jenis mineral penyusun, ukuran butiran, serta kondisi lingkungan di sekitarnya. Perbedaan karakteristik tersebut menyebabkan setiap jenis tanah memiliki sifat fisik dan mekanik yang berbeda, sehingga responsnya terhadap beban maupun perubahan kondisi lingkungan juga tidak sama.

3.1.1 Komponen Tanah

Tanah tersusun atas tiga komponen utama, yaitu air, udara, dan butiran padat. Dalam analisis geoteknik, udara umumnya dianggap tidak memberikan pengaruh yang signifikan, sedangkan air memiliki peranan penting terhadap perilaku tanah. Rongga-rongga di antara butiran tanah dapat terisi sebagian atau seluruhnya oleh air maupun udara. Tanah dikatakan berada dalam kondisi jenuh sebagian apabila rongga tersebut terisi oleh campuran air dan udara. Sementara itu, tanah kering merupakan kondisi di mana tidak terdapat kandungan air sama sekali di dalam pori-porinya. Berikut, ilustrasi yang menunjukkan fase dan komponen tanah dapat dilihat pada Gambar 3.1 dengan Gambar 1a menunjukkan lapisan tanah yang homogen dan volumenya relatif terhadap beratnya, sedangkan Gambar 1b menunjukkan lapisan atau rasio udara, air, dan butiran serta volume dan berat masing-masing komponen.



Gambar 3. 1 Diagram Fase Tanah

(Sumber: Hardiyatmo, 2012)

Dari memperhatikan gambar tersebut didapat beberapa parameter tanah yang berupa berat butiran (W_s), berat air (W_w), volume butiran (V_s), volume air (V_w), kadar air (w), angka pori (e), porositas (n), dan berat jenis (G_s). Jenis – jenis tanah pada umumnya bisa ditentukan melalui tabel klasifikasi berat jenis. *Specific Gravity* atau berat jenis tanah adalah perbandingan antara berat volume butiran tanah terhadap berat volume air pada suhu tertentu (umumnya 4°C). Nilai ini menunjukkan seberapa berat partikel tanah dibandingkan air. Nilai G_s tidak memiliki dimensi. Secara umum, berat jenis tanah berada pada kisaran 2,65 hingga 2,75. Untuk tanah tidak berkoheisi biasanya digunakan nilai G_s sekitar 2,67, sedangkan pada tanah kohesif non-organik berkisar antara 2,68 sampai 2,72. Nilai berat jenis untuk berbagai jenis tanah disajikan dalam Tabel 3.1 sebagai berikut.

Tabel 3. 1 Berat Jenis Tanah

Jenis Tanah	Berat Jenis (G_s)
Kerikil	2,65 – 2,68
Pasir	2,65 – 2,68
Lanau Anorganik	2,62 – 2,68
Lempung Organik	2,58 – 2,65
Lempung Anorganik	2,68 – 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 – 1,80

Sumber: Hardiyatmo (2017)

3.1.3 Properties Tanah

Di antara berbagai sifat fisik dan non-fisik tanah, fokus utama penelitian ini adalah berat volume basah (γ), sudut gesekan internal (ϕ), kohesi (c), modulus elastisitas (E), dan *poisson's ratio* (ν).

1. Berat volume basah (γ)

Berat volume basah tanah merupakan ukuran berat tanah pada setiap satuan volume dalam kondisi asli yang masih mengandung kadar air. Istilah ini juga sering disebut sebagai berat satuan basah dan memiliki peranan penting dalam perencanaan maupun analisis berbagai konstruksi, seperti jalan, fondasi, tanggul, dan dinding penahan tanah. Besarnya nilai berat satuan basah dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya jenis tanah, kandungan air, tingkat kepadatan, serta perbandingan rongga di dalam tanah..

Secara umum, bertambahnya kadar air dan proses pemadatan akan meningkatkan nilai berat satuan basah tanah. Penentuan nilai tersebut dapat dilakukan secara empiris dengan cara menimbang tanah lembap yang volumenya telah diketahui, kemudian membagi beratnya dengan volume tanah tersebut. Agar hasil yang diperoleh lebih akurat, pengukuran biasanya dilakukan beberapa kali. Volume tanah dapat ditentukan melalui pengukuran dimensi wadah atau menggunakan cincin sampel tanah. Adapun kadar air tanah diperoleh dengan membandingkan berat tanah sebelum dan sesudah proses pengeringan menggunakan oven.

Satuan yang digunakan untuk menyatakan berat satuan lembap tanah umumnya adalah kilogram per meter kubik (kg/m^3) atau pon per kaki kubik (pcf). Misalnya, tanah dengan berat satuan lembap 20 kN/m^3 ditimbang sebesar 20 kilogram per meter kubik dalam keadaan lembap alaminya. Berikut Tabel 3.2 yang merupakan korelasi antara nilai N-SPT terhadap berat volume pada tanah pasir.

Tabel 3. 2 Korelasi Nilai N-SPT dengan Berat Volume Basah pada Tanah Pasir

Parameter	Tanah Pasir			
N	0 - 10	11 - 30	31 - 50	>50
Berat volume basah (kN/m^3)	12 - 16	14 - 18	15 - 20	18 - 23

(Sumber: *Soil Mechanics*, William T., 1962)

2. Sudut Geser Internal (ϕ)

Sudut geser internal tanah merupakan salah satu parameter utama yang digunakan untuk mengetahui kemampuan tanah dalam menahan gaya geser maupun deformasi akibat pembebanan. Parameter ini juga dikenal dengan istilah sudut gesekan internal atau sudut tahanan geser. Nilainya menunjukkan batas kemiringan maksimum yang masih mampu dipertahankan tanah tanpa mengalami kelongsoran atau keruntuhan.

Besarnya sudut geser internal dipengaruhi oleh berbagai kondisi tanah, seperti jenis material penyusunnya, distribusi ukuran butir, tingkat porositas, kandungan air, serta adanya bahan pengikat di dalam tanah. Tanah non-kohefif, misalnya pasir dan kerikil, umumnya memiliki sudut geser internal yang lebih besar dibandingkan tanah kohefif seperti lempung.

Parameter ini sangat penting dalam perencanaan konstruksi karena berhubungan langsung dengan kestabilan lereng, kekuatan fondasi, dan desain dinding penahan tanah. Nilai sudut geser internal dapat diperoleh melalui pengujian laboratorium, seperti uji geser langsung dan uji kompresi triaksial, maupun pengujian lapangan seperti *Standard Penetration Test* (SPT) dan *Cone Penetration Test* (CPT). Berikut ini pada Tabel 3.3 ditampilkan beberapa nilai sudut geser internal untuk berbagai jenis tanah.

Tabel 3. 3 Tabel Sudut Geser Internal Tanah

Jenis Tanah	Sudut Geser Internal
Kerikil Berpasir	35° - 40°

Lanjutan Tabel 3. 3 Tabel Sudut Geser Internal Tanah

Jenis Tanah	Sudut Geser Internal
c	35° - 40°
Pasir Padat	35° - 40°
Pasir Lepas	30°
Lempung Berlanau	25° - 30°
Lempung	20° - 25°

(Sumber: Das, 1985)

3. Kohesi (c)

Kemampuan tanah untuk menahan tekanan geser dikenal sebagai kohesivitas tanah. Kekuatan geser tanah, atau gaya maksimum yang dapat ditahan sebelum gagal dan mulai mengalami deformasi, adalah cara umum untuk mengukur kohesi. Banyak elemen, termasuk jenis tanah, kadar air, distribusi ukuran partikel, dan keberadaan bahan organik atau mineral, dapat memengaruhi kohesivitas tanah. Sementara tanah dengan kohesivitas rendah mungkin rentan terhadap tanah longsor dan jenis ketidakstabilan lainnya, tanah dengan kohesi tinggi cenderung lebih stabil dan kurang rentan terhadap erosi. Berikut Tabel 3.4 yang menunjukkan korelasi nilai N-SPT dengan kohesi tanah lempung.

Tabel 3. 4 Korelasi Nilai N-SPT dengan Kohesi Tanah Lempung

Konsistensi	N	C (kN/m ²)
Sangat lunak	0 – 2	< 12
Lunak	2 – 4	12 - 25
Sedang	4 – 8	25 – 50
Kaku	8 – 15	50 – 100
Sangat kaku	15 – 30	100 – 200
Keras	>30	> 200

(Sumber: Terzhagi dan Peck, 1967)

4. Modulus Elastisitas (E)

Modulus elastisitas merupakan parameter yang menunjukkan tingkat kekakuan tanah terhadap beban yang bekerja. Nilai ini menggambarkan kemampuan tanah dalam menahan perubahan bentuk atau deformasi. Semakin besar nilai modulus elastisitas, maka tanah akan semakin kaku dan mengalami deformasi yang lebih kecil. Dalam penelitian ini, nilai modulus elastisitas digunakan sebagai salah satu parameter input pada pemodelan lereng dan ditentukan berdasarkan jenis tanah yang terdapat di lokasi penelitian. Nilai modulus elastisitas yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.5 Berikut.

Tabel 3. 5 Korelasi Macam Tanah dengan Nilai Modulus Elastisitas

Macam Tanah	Modulus Elastisitas (Mpa)
Lempung	
Sangat lunak	2 – 15
Lunak	5 – 25
Sedang	15 – 50
Keras	50 – 100
Berpasir	25 – 250
Pasir	
Berlanau	5 – 20
Lepas (<i>Loose</i>)	10 – 25
Padat	50 – 81
Pasir dan Kerikil	
Lepas (<i>Loose</i>)	50 – 150
Padat	100 – 200
Serpih	150 – 5000
Lanau	2 - 20

(Sumber: Bowles, 1997)

5. *Poissons's Ratio* (ν)

Poisson's Ratio merupakan parameter yang menunjukkan hubungan antara deformasi arah vertikal dan deformasi arah horizontal pada tanah akibat pembebanan. Ketika tanah menerima beban dan mengalami pemampatan ke arah vertikal, tanah juga akan mengalami pengembangan ke arah samping. Nilai *Poisson's Ratio* digunakan untuk menggambarkan besarnya perubahan tersebut. Dalam pemodelan geoteknik, parameter ini berperan dalam menentukan perilaku deformasi tanah dan distribusi tegangan selama proses pembebanan. Nilai *Poisson's Ratio* yang digunakan pada penelitian ini disesuaikan dengan jenis tanah yang terdapat di lokasi penelitian dan disajikan pada Tabel 3.6 berikut.

Tabel 3. 6 Korelasi Jenis Tanah dengan Nilai *Poisson's Ratio*

Macam Tanah	<i>Poissons's Ratio</i> (ν)
Lempung jenuh	0,4 – 0,5
Lempung tak jenuh	0,1 – 0,3
Lempung berpasir	0,2 – 0,3
Lanau	0,3 – 0,35
Pasir padat	0,2 – 0,4
Pasir kasar ($e= 0,4 - 0,7$)	0,15
Pasir halus ($e= 0,4 - 0,7$)	0,25
Batu	0,1 – 0,4
Lepas (Loose)	0,1 – 0,3

(Sumber: Bowles, 1997)

3.1.4 Kuat Geser Tanah

Menurut Hardiyatmo (2018), kuat geser tanah merujuk pada gaya yang muncul akibat perlawanan butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Selama proses pembebanan, tanah ditahan oleh dua faktor, yaitu kohesi tanah yang bergantung pada jenis dan kepadatan tanah, serta gesekan antara butir-butir tanah, yang besarnya sebanding dengan tegangan normal pada bidang geserannya.

Persamaan yang digunakan yaitu persamaan coulomb (1776). Persamaan tersebut ditunjukkan pada Persamaan 3.1 berikut.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (3.1)$$

Dengan:

τ = Kuat geser dalam (kN/m^2)

c = Kohesi (kN/m^2)

σ = Tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m^2)

φ = Sudut geser dalam ($^\circ$)

3.3 Pengujian Tanah

Untuk mengetahui kesesuaian suatu tanah terhadap pekerjaan teknik dan konstruksi tertentu, diperlukan pemeriksaan serta pengujian sifat fisik, kimia, dan mekaniknya. Proses ini dilakukan dengan berbagai cara, seperti pengeboran, pengambilan sampel, pengujian, serta analisis terhadap contoh tanah.

Tujuan utama penyelidikan tanah adalah untuk memahami karakteristik serta perilaku tanah di lokasi pembangunan, sehingga perencanaan pondasi dan pelaksanaan konstruksi dapat dilakukan dengan aman, tahan lama, dan hemat biaya. Melalui investigasi ini, insinyur dan ahli geologi dapat menentukan jenis pondasi yang sesuai, kapasitas daya dukung tanah, kedalaman pondasi, serta berbagai parameter desain penting lainnya.

Selain itu, hasil penyelidikan tanah juga sangat penting dalam kajian geoteknik dan lingkungan, terutama untuk mendeteksi potensi bahaya seperti lubang runtuh, longsor, dan tanah yang terkontaminasi. Data yang diperoleh dapat digunakan untuk merancang solusi seperti stabilisasi lereng, pengendalian erosi, serta perbaikan kondisi tanah. Secara umum, investigasi tanah dilakukan melalui beberapa tahap, yaitu pengeboran, pengambilan sampel, dan pengujian sampel. Menurut Hardiyatmo (2012), contoh pengujian tanah meliputi Uji Geser Langsung, Uji Triaksial, dan Uji Kompresi Tak Terbatas.

3.4 Stabilitas Lereng

Analisis stabilitas lereng adalah analisis untuk mengetahui tingkat keamanan suatu lereng. Tujuannya adalah untuk menilai kestabilan berbagai jenis lereng, baik lereng alami maupun lereng buatan seperti timbunan tanah. Analisis ini penting dalam perencanaan konstruksi, misalnya pada pembangunan jalan raya, serta pada perkuatan lereng yang berpotensi longsor, terutama saat terjadi gempa.

Suatu lereng dikatakan stabil apabila tidak mengalami pergerakan dan tidak memiliki potensi untuk bergerak. Kondisi ini terjadi ketika gaya penahan pada lereng lebih besar dibandingkan gaya penggerakannya. Berikut disajikan Tabel 3.7 Klasifikasi Kemiringan Lereng berdasarkan SNI 03-1997-1995.

Tabel 3. 7 Tabel Sudut Kemiringan Lereng

Sudut Kemiringan Lereng (°)	Kondisi Menurut SNI 03-1997-1995.
45	Sedang
60	Curam
90	Curam

(Sumber: SNI 03-1997-1995)

3.4.1 Faktor Yang Mempengaruhi Stabilitas Lereng

Stabilitas lereng atau tanggul dapat dipengaruhi oleh sejumlah faktor. Berikut adalah beberapa elemen kunci yang dipertimbangkan oleh insinyur geoteknik ketika mengevaluasi stabilitas lereng.

1. Karakteristik Tanah: Jenis, kandungan, dan kekuatan tanah semuanya memiliki peran penting dalam stabilitas lereng. Dibandingkan dengan tanah non-kohesif seperti pasir, tanah kohesif, seperti lempung, seringkali memiliki kekuatan geser yang lebih tinggi dan lebih stabil.
2. Kandungan air: Kandungan air tanah memiliki dampak besar pada stabilitas lereng. Kekuatan, berat, dan tekanan air tanah dapat meningkat seiring dengan peningkatan kandungan air, yang dapat menyebabkan lereng runtuh.
3. Geometri lereng: Stabilitas lereng dapat dipengaruhi oleh sudut, ketinggian, dan bentuk lereng. Lereng cekung lebih stabil daripada lereng cembung,

sedangkan lereng yang lebih curam biasanya kurang stabil daripada lereng yang lebih landai.

4. Vegetasi: Dengan memperkuat tanah dan membatasi erosi, vegetasi dapat menstabilkan lereng. Namun, menghilangkan vegetasi dapat membahayakan stabilitas lereng.
5. Beban eksternal: Lereng dapat mengalami beban tambahan dari struktur di luarnya, seperti bangunan, jalan, atau struktur lainnya, yang dapat meningkatkan gaya yang menekannya dan mengurangi stabilitasnya.
6. Kondisi geologis: Stabilitas lereng dapat dipengaruhi oleh kondisi geologis, seperti adanya patahan, retakan, atau fitur geologis lainnya.
7. Iklim: Dengan memengaruhi karakteristik tanah dan jumlah air dalam tanah, faktor iklim termasuk curah hujan, suhu, dan siklus beku-cair juga dapat berdampak pada stabilitas lereng.

Stabilitas lereng adalah masalah rumit yang membutuhkan pertimbangan cermat dari berbagai elemen. Insinyur geoteknik memeriksa stabilitas lereng menggunakan berbagai pendekatan untuk menentukan langkah-langkah apa yang harus diambil untuk memastikan stabilitas dan keamanan.

Sementara itu, Cruikshank (2002) menyatakan bahwa stabilitas lereng bergantung pada tiga parameter mekanika tanah; yang pertama berkaitan dengan kekuatan tanah yang meliputi kohesi, gesekan, saling mengunci butiran, dan faktor-faktor lainnya, yang kedua adalah geometri tanah termasuk bentuk permukaan tanah, bentuk permukaan longsor, pola pelapisan tanah, dan keberadaan retakan atau zona geser, dan yang ketiga adalah tekanan air pori termasuk gaya rembesan.

3.4.2 Metode Penanggulangan Kelongsoran Lereng

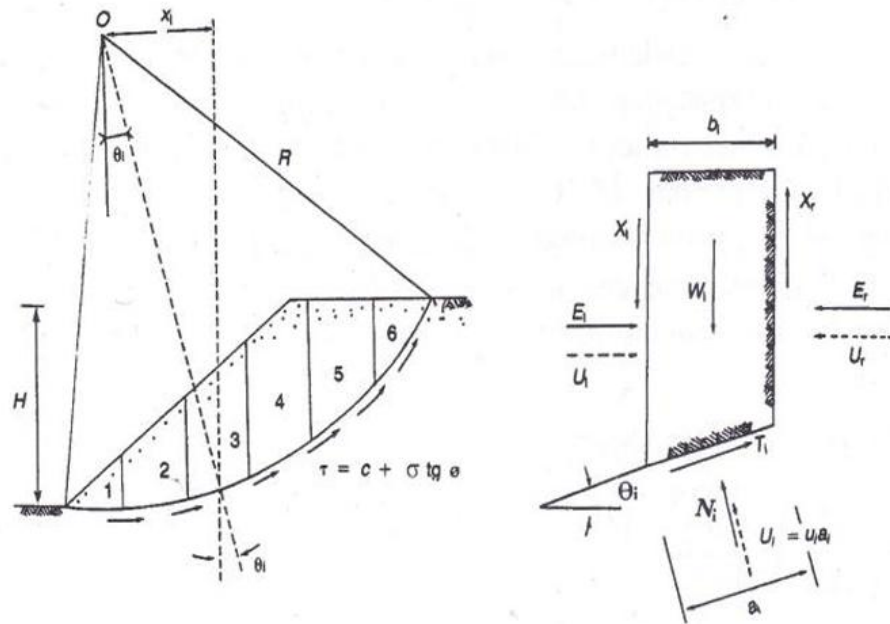
Peristiwa longsor pada lereng dapat menimbulkan berbagai kerugian, baik terhadap lingkungan maupun infrastruktur di sekitarnya. Oleh karena itu, diperlukan upaya penanganan yang tepat untuk mengurangi potensi terjadinya kelongsoran. Beberapa metode yang umum digunakan dalam pengendalian longsor lereng antara lain sebagai berikut:.

1. Mengurangi sudut kemiringan lereng agar beban tanah pada lereng menjadi lebih kecil sehingga kestabilan lereng meningkat dan risiko erosi dapat diminimalkan.
2. Pembuatan terasering pada lereng untuk memperkecil kemiringan permukaan tanah sekaligus memperlambat aliran air hujan sehingga infiltrasi air ke dalam tanah dapat dikendalikan.
3. Pembangunan dinding penahan tanah menggunakan pasangan batu maupun beton bertulang yang berfungsi menahan tekanan tanah dan mencegah pergerakan lereng.
4. Pemanfaatan material geotekstil sebagai elemen perkuatan tanah karena memiliki kuat tarik yang tinggi sehingga mampu mengurangi potensi erosi dan amblesan tanah.
5. Penerapan metode *soil nailing* sebagai sistem perkuatan lereng dengan memasang batang baja ke dalam tanah untuk meningkatkan kestabilan massa tanah.

3.4.3 Analisis Stabilitas Lereng Dengan Metode *Irisan*

Analisis stabilitas lereng dengan metode irisan hanya dapat digunakan ketika tanah tidak homogen. Bila tanah tidak homogen dan aliran rembesan terjadi di dalam tanah tidak menentu, cara yang lebih cocok adalah dengan metode irisan (*Method of slice*).

Gaya normal yang bekerja pada suatu titik di lingkaran bidang longsor, terutama dipengaruhi oleh berat tanah di atas titik tersebut. Dalam metode irisan, massa tanah yang longsor dipecah-pecah menjadi beberapa irisan vertikal. Kemudian, keseimbangan dari tiap-tiap irisan diperhatikan. Gambar 3.3 memperlihatkan satu irisan dengan gaya-gaya yang bekerja



Gambar 3. 3 Gaya-Gaya yang Bekerja pada Irisan
(Sumber: Hardiyatmo, 2008)

Dengan :

X_1, X_r = Gaya geser efektif di sepanjang irisan

E_1, E_r = Gaya normal efektif yang bekerja sepanjang dasar irisan

T_i = Resultan gaya geser efektif yang bekerja sepanjang dasar irisan

N_i = Resultan gaya normal efektif yang bekerja sepanjang dasar irisan

U_i, U_r = Tekanan air pori yang bekerja di kedua sisi irisan

U_i = Tekanan air pori di dasar irisan

3.4.3.1 Metode *Fellenius*

Metode *Fellenius* merupakan metode analisis stabilitas lereng yang didasarkan pada konsep keseimbangan momen terhadap bidang longsor berbentuk lingkaran. Dalam metode ini, massa tanah yang berada di atas bidang longsor dibagi menjadi sejumlah irisan vertikal, kemudian faktor keamanan dihitung dari perbandingan antara gaya geser penahan dan gaya penggerak sepanjang bidang longsor. Asumsi utama metode ini adalah gaya antaririsan diabaikan, sehingga

prosedur perhitungannya menjadi lebih sederhana. Meskipun demikian, metode *Fellenius* masih banyak digunakan dalam analisis stabilitas lereng karena memberikan hasil yang cukup baik dan berada pada kondisi yang konservatif (Duncan dkk, 2014). Gaya-gaya yang bekerja pada setiap irisan dapat dilihat pada Gambar 3.3 sebelumnya. Nilai faktor keamanan pada metode ini dinyatakan dalam Persamaan 3.1 berikut.

$$SF = \frac{\text{Jumlah momen dari tahanan geser sepanjang bidang longsor}}{\text{Jumlah momen dari berat massa tanah yang longsor}}$$

$$SF = \frac{\sum (\Sigma c a_i + W \cos \alpha \tan \varphi)}{\sum W \sin \alpha} \quad (3.1)$$

Dengan :

SF = Faktor aman

c = Kohesi tanah (kN/m²)

φ = Sudut geser dalam tanah (°)

a_i = Panjang lengkung lingkaran pada irisan ke-i (m)

W = Beban irisan tanah ke-i (kN)

3.4.3.2 Metode *Bishop*

Metode *Bishop* (Bishop, 1995) menganggap bahwa gaya-gaya yang bekerja pada sisi-sisi irisan mempunyai resultan nol pada arah vertikal. Meskipun begitu, metode ini masih banyak digunakan dalam praktik karena dianggap cukup sederhana dan kesalahan perhitungannya masih pada sisi yang aman. Dalam perhitungannya, massa tanah yang longsor dibagi menjadi irisan vertikal dan gaya yang bekerja pada setiap irisan ditunjukkan pada Gambar 3.3.

Metode analisis ini menjelaskan bahwa gaya-gaya yang bekerja pada sisi kiri dan kanan suatu irisan dianggap seimbang, sehingga resultan gaya pada arah yang tegak lurus bidang kelongsoran adalah nol. Nilai faktor keamanan pada metode ini dinyatakan dalam Persamaan 3.2 berikut.

$$SF = \frac{\left(\frac{c\Delta x + W \tan \varphi}{m} \right)}{W \sin \varphi} \quad (3.2)$$

Dengan :

SF = Faktor aman

c = Kohesi tanah (kN/m²)

φ = Sudut geser dalam tanah (°)

α = Sudut irisan dengan bidang longsor (°)

W = Beban irisan tanah ke-i (kN)

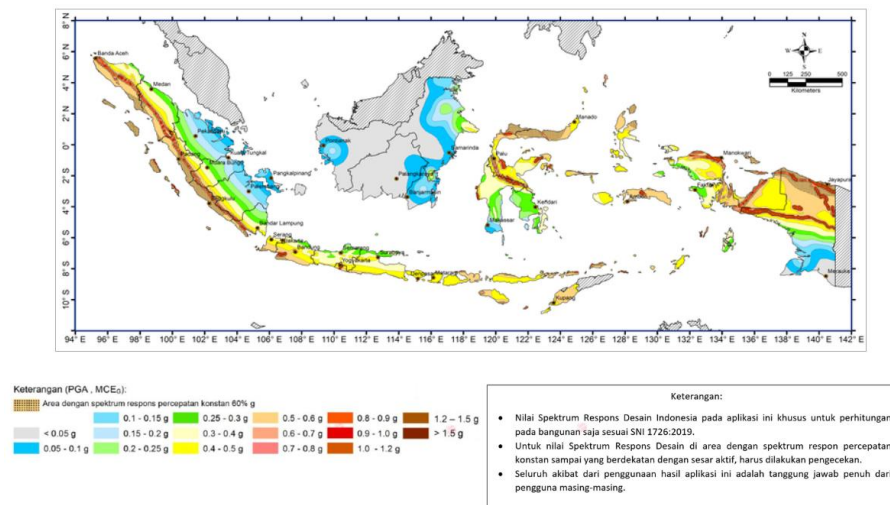
Δx = panjang irisan ke-n (m)

3.4.5 Beban Gempa

Analisis stabilitas lereng dalam penelitian ini dilakukan dengan memperhitungkan pengaruh beban gempa melalui pendekatan pseudostatik. Besarnya beban gempa ditentukan berdasarkan nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) yang diperoleh dari peta zonasi gempa Indonesia sesuai SNI 1726:2019. Berdasarkan peta tersebut, lokasi penelitian memiliki nilai PGA sebesar 0,5265 g, yang kemudian dikonversi menjadi koefisien seismik horizontal sebesar 0.26325.

Pemberian beban gempa menyebabkan bertambahnya gaya pendorong (*driving force*) pada lereng sehingga nilai faktor keamanan cenderung menurun dibandingkan dengan kondisi tanpa gempa. Oleh karena itu, analisis dengan mempertimbangkan beban gempa diperlukan untuk mengetahui apakah lereng masih memenuhi persyaratan keamanan serta untuk menentukan kebutuhan perkuatan apabila nilai faktor keamanan berada di bawah batas minimum yang dipersyaratkan.

Berikut Gambar 3.4 yang menunjukkan peta zonasi gempa Indonesia dan Gambar 3.5 yang menunjukkan nilai PGA di lokasi penelitian.



Gambar 3. 4 Peta Zonasi Gempa Indonesia
(Sumber : Kementerian PUPR, Aplikasi Desain Spektra Indonesia, 2019)

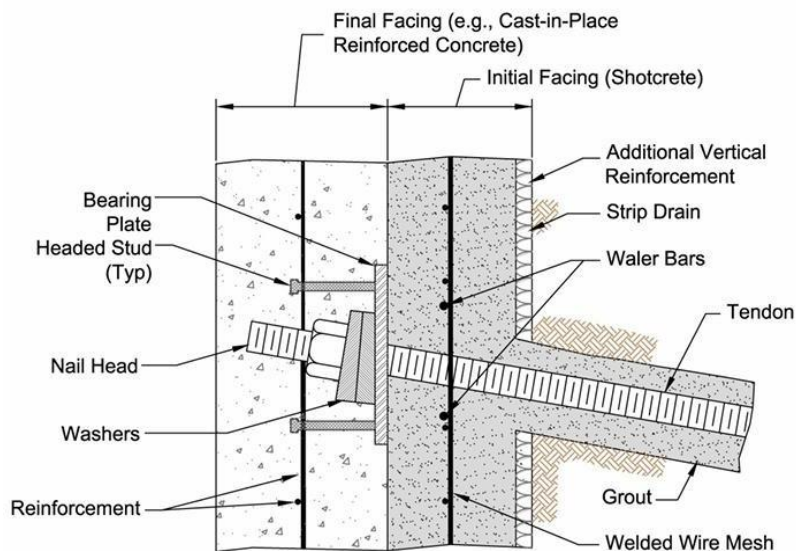
Kelas	Semua		Kelas	T0(detik)	Ts(detik)	Sds(g)	Sd1(g)
Rentang	Value: 6		SB	0.07	0.35	0.79	0.28
PGA	0.5210	(g) bedrock	SC	0.10	0.49	1.05	0.51
MCEg			SD	0.14	0.70	0.88	0.62
SS MCEr	1.3200	(g) bedrock	SE	0.19	0.97	0.77	0.75
S1 MCEr	0.5204	(g) bedrock					
TL	6	Detik					

Gambar 3. 5 Nilai PGA di Lokasi Penelitian
(Sumber : Kementerian PUPR, Aplikasi Desain Spektra Indonesia, 2019)

3.5 Soil Nailing

Soil nailing merupakan jenis perkuatan pasif pada tanah dengan menancapkan potongan potongan baja (*nail bar*) yang kemudian di-*grout*. *Soil nailing* digunakan secara khusus untuk menstabilisasi lereng atau galian yang lebih menguntungkan dibandingkan sistem dinding penahan tanah yang lain. Pada beberapa kondisi, *soil nailing* memberikan alternatif yang bisa dilakukan dilihat dari sisi kemungkinan pelaksanaan, biaya pembuatan, dan lamanya waktu pengerjaan jika dibandingkan dengan sistem perkuatan lereng yang lain (Lazarte,

2003). Berikut Gambar 3.6 yang menunjukkan detail *soil nailing* dengan permukaan *shotcrete*.



Gambar 3. 6 Detail Soil Nailing Dengan Permukaan Shotcrete
(Sumber: FHWA-NHI-14-007)

3.5.1 Komponen Soil Nailing

Secara umum elemen-elemen yang dibutuhkan dalam perkuatan dengan *soil nailing* dan *shotcrete* adalah sebagai berikut :

1. Batang Perkuatan Baja (*Nail Bars*)

Besarnya nilai kuat tarik yang dianjurkan oleh *Federal Highway Administration* (FHWA) adalah sebesar 420 MPa – 520 Mpa dengan diameter bervariasi yaitu 19mm, 22mm, 25mm, 29mm, 32mm, 36mm, dan 43mm, tergantung kebutuhan (Lazarte, 2003). Menurut standar ASTM A615 baja yang umum digunakan pada *soil nailing* adalah baja ulir dengan daya dukung tarik 420 Mpa (60 ksi atau Grade 60) atau 520 Mpa (75 ksi atau Grade 75). Properti baja ulir ditunjukkan pada Tabel 3.7 sebagai berikut.

Tabel 3. 8 Properti Baja Ulir Untuk Soil Nailing

Diameter		Luas Penampang		Berat Jenis		Kuat Leleh		Kapasitas Beban Aksial	
Inggris	mm	Inch ²	mm ²	Lbs/ft	kg/m	Ksi	MPa	Kips	kN
#6	19	0,44	284	0,86	21,8	60	414	26,4	118
						75	571	33,0	147
#7	22	0,60	387	0,99	25,1	60	414	36,0	160
						75	571	45,0	200
#8	25	0,79	510	1,12	28,4	60	414	47,4	211
						75	571	59,3	264
#9	29	1,00	645	1,26	32,0	60	414	60,0	267
						75	571	75,0	334
#10	32	1,27	819	1,43	36,3	60	414	76,2	339
						75	571	95,3	424
#11	36	1,56	1006	1,61	40,9	60	414	93,6	417
						75	571	117,0	520
#14	43	2,25	1452	1,86	47,2	60	414	135,0	601
						75	571	168,8	751

(Sumber: Bryne dkk, 1998)

2. *Nail Head*

Nail Head adalah bagian ujung dari baja yang menonjol keluar dari *wall facing* (tampilan dinding). Komponen ini memiliki pelat penahan, mur persegi enam, cincin, dan *headed stud*.

3. *Hex nut, washer dan anchor bearing plate*

Hex nut dan *washer* yang digunakan harus memiliki kuat leleh yang sama dengan batangan bajanya. *Anchor bearing plate* (pelat penahan, galvanized) berbentuk persegi dengan panjang masing masing sisi 200 – 200mm, tebal min 8mm dan kuat leleh 250 Mpa (ASTM A36).

4. *Grout (Cor Beton)*

Cor beton untuk *soil nailing* dapat berupa adukan semen pasir. Semen yang digunakan adalah semen type I, II dan III. Semen type I (normal) paling banyak digunakan untuk kondisi yang tidak memerlukan syarat khusus, semen type II digunakan jika menginginkan panas hidrasi lebih rendah dan ketahanan korosi terhadap sulfat yang lebih baik daripada semen type I,

sedangkan semen type III digunakan jika memerlukan waktu pengerasan yang lebih cepat.

5. *Centralizers* (Penengah)

Centralizers adalah alat yang dipasang pada sepanjang batangan baja dengan jarak tertentu (0.5 – 2.5 m) untuk memastikan tebal selimut beton sesuai dengan rencana sehingga dalam terhindar dari karat yang diakibatkan oleh oksidasi dalam tanah dapat dihindari. Alat ini terbuat dari PVC atau material sintetik lainnya.

6. *Reinforcement Connector (Coupler)* / Penghubung

Coupler / penghubung digunakan untuk menyambung potongan-potongan baja apabila terjadi penyambungan baja karena kebutuhan biaya yang terlalu tinggi.

7. *Wire Rope*

Wire rope atau kawat seling baja adalah kawat baja yang dipilin untuk membuat tali dari bahan baja, digunakan dalam kebutuhan menarik, menguikar atau mengangkat sebuah beban yang memiliki beban berat.

8. *Wire Rope Clips*

Wire rope clips atau yang bisa juga disebut dengan *wire rope clamp* adalah alat pengikat yang digunakan untuk menahan dan mengikat ujung mata *wire rope* sling agar tidak terlepas. Penggunaan *wire rope clips* atau *wire rope clamps* ini adalah sebagai pengganti dari pembuatan *wire rope sling* dengan menggunakan talurit/ *mechanical splice*.

9. *Wall Facing (Chain Link)*

Berupa rangkaian kawat baja dengan kuat tarik minimum 41 kgf/mm², ketahanan puntir 60, berat lapisan seng minimum 275 gram/m², tidak boleh menunjukkan adanya deposit warna tembaga, serta lapisan seng tidak boleh menyerpih, retak-retak atau mengelupas. Permukaan kawat bronjong harus halus dan rata serta bebas dari cacat-cacat berupa serpihan, retak, pengelupasan maupun cacat yang dapat merugikan dalam pemakaian. Diameter kawat anyaman 3.0 ± 0.12 mm. Umur rencana ketahanan chain link ini minimum untuk pemakaian 10 (sepuluh) tahun.

10. *Thimble*

Pelat pengarah *wire rope* 10 mm *galvanized*, untuk meratakan beban *wire rope* pada *rock bolt*. Umur rencana ketahanan *thimble* ini minimum untuk pemakaian 10 (sepuluh) tahun.

11. *Turnbuckle*

Sekrup atau sekrup peregangan adalah alat untuk mengatur ketegangan atau panjang *wire rope* diameter 10 mm, batang pengikat, dan sistem pengencang lainnya. Terdiri dari dua baut mata berulir, satu *screwed* ke setiap ujung bingkai logam kecil, satu dengan tangan kiri *rope* dan yang lainnya dengan tangan kanan *rope*. Ketegangan dapat disesuaikan dengan memutar bingkai, yang menyebabkan kedua baut mata disekrupkan atau keluar bersamaan, tanpa memutar baut mata atau kabel yang terpasang.

3.5.2 Tahanan Friksi (*Axial Skin Resistance*) pada *Soil Nailing*

Tahanan friksi atau *axial skin resistance* merupakan tahanan geser yang berkembang pada bidang kontak antara *grout*, *nail* dan tanah di sekitarnya. Tahanan ini berperan dalam menahan gaya tarik yang bekerja pada *nail* sehingga mencegah terjadinya kegagalan berupa tercabutnya tulangan (*pullout failure*). Besarnya tahanan friksi dipengaruhi oleh jenis tanah, karakteristik tanah, metode pemasangan, serta sifat antarmuka (*interface*) antara *grout* dan tanah. Oleh karena itu, perhitungan tahanan friksi perlu dilakukan untuk memastikan kapasitas ikatan (*bond capacity*) yang tersedia mampu menahan gaya tarik yang bekerja pada *nail*. Berikut properties yang digunakan untuk menentukan *axial skin resistance*.

1. Koefisien Tekanan Tanah Lateral (K)

Pada tanah berbutir, distribusi tegangan horizontal di sekitar *nail* dipengaruhi oleh koefisien tekanan tanah lateral (K). Nilai K menunjukkan perbandingan antara tegangan horizontal efektif terhadap tegangan vertikal efektif tanah. Besarnya nilai K dipengaruhi oleh metode instalasi elemen perkuatan dan tingkat gangguan tanah yang terjadi selama proses konstruksi. Nilai koefisien tekanan tanah lateral yang digunakan dalam perhitungan tahanan friksi ditunjukkan pada Tabel 3.8 berikut.

Tabel 3. 9 Korelasi Metode Instalasi Nail dengan Koefisien Tekanan Tanah Lateral

Metode Instalasi	K
Tiang pancang, <i>displacement</i> besar	(1-2) K_o
Tiang pancang, <i>displacement</i> kecil	(0,75-1,75) K_o
<i>Bored pile</i>	(0,75-1) K_o

(Sumber: Das, 2017)

2. Sudut Gesek *Interface* (δ)

Sudut gesek *interface* (δ) merupakan sudut gesek yang terjadi pada bidang kontak antara material *grout* atau baja dengan tanah di sekitarnya. Nilai δ umumnya dinyatakan sebagai fungsi dari sudut gesek dalam tanah (ϕ) dan dipengaruhi oleh kekasaran permukaan material yang berinteraksi dengan tanah. Semakin besar nilai δ , semakin besar pula tahanan geser yang dapat bekerja pada bidang kontak tersebut. Nilai sudut gesek *interface* yang digunakan dalam analisis dapat ditentukan dengan Tabel 3.9 berikut.

Tabel 3. 10 Estimasi Nilai Sudut Gesek *Interface*

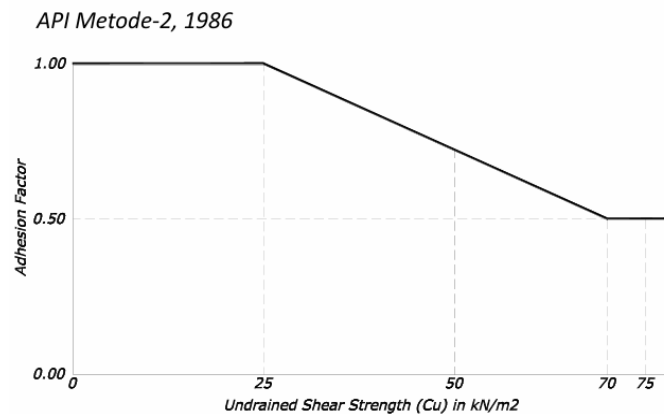
<i>Interface</i>	δ
Baja halus	(0,5-0,7) ϕ
Baja kasar	(0,7-0,9) ϕ
<i>Precast concrete</i>	(0,8-1) ϕ
<i>Cast in place</i>	ϕ

(Sumber: Das, 2017)

3. *Adhesion Factor* (α)

Pada tanah kohesif, mekanisme transfer beban antara *grout* dan tanah tidak hanya dipengaruhi oleh gesekan, tetapi juga oleh *adhesion* yang berkembang pada bidang kontak. Besarnya *adhesion* dinyatakan dalam *adhesion factor* (α), yang nilainya bergantung pada kuat geser tak terdrainase tanah (*undrained shear strength*). Nilai faktor adhesi umumnya diperoleh berdasarkan hubungan empiris yang disajikan dalam bentuk

grafik atau kurva korelasi. Grafik penentuan *adhesion factor* yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.7 berikut.



Gambar 3. 7 Grafik *Adhesion Factor*
(Sumber: API, 1986)

3.5.2.1 Tahanan Friksi pada Tanah Pasir dan Tanah Lempung

Pada tanah pasir atau tanah non-kohefif, tahanan friksi dihitung berdasarkan pendekatan tegangan efektif yang mempertimbangkan tegangan vertikal efektif tanah, koefisien tekanan tanah lateral (K), dan sudut gesek *interface* (δ). Tahanan geser yang berkembang pada bidang kontak *grout* dan tanah diasumsikan sebanding dengan tegangan normal efektif yang bekerja pada permukaan *soil nailing*.

Pada tanah lempung atau tanah kohefif, tahanan friksi dihitung menggunakan pendekatan adhesi yang didasarkan pada kuat geser tak terdrainase tanah (*undrained shear strength*). Dalam metode ini, tahanan geser pada bidang kontak *grout* dan tanah dinyatakan sebagai hasil kali antara *adhesion factor* (α) dan kuat geser tanah. Pendekatan ini digunakan karena perilaku tanah kohefif lebih dipengaruhi oleh kohesi dibandingkan gesekan antarbutir.

Persamaan yang digunakan untuk menghitung tahanan friksi pada tanah pasir dan tanah lempung ditunjukkan pada Persamaan 3.3 berikut.

$$Q_s = \sum p \times \Delta L \times f \quad (3.3)$$

Dengan :

Q_s = tahanan friksi

Σp = jumlah perimeter keliling nail

ΔL = unit panjang *nail*

f = unit tahanan friksi

Perhitungan unit tahanan friksi (f) pada tanah pasir dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.4 berikut.

$$f = K \times \sigma'_v \times \tan \delta \quad (3.4)$$

Dengan :

f = unit tahanan friksi pada tanah pasir

K = koefisien tekanan tanah lateral

σ'_v = tegangan efektif vertikal

δ = sudut gesek *interface*

Sedangkan untuk perhitungan unit tahanan friksi (f) pada tanah lempung dapat dilakukan dengan Persamaan 3.5 berikut.

$$f = \alpha \times c_u \quad (3.5)$$

Dengan :

f = unit tahanan friksi pada tanah lempung

α = *adhesion factor*

c_u = *undrained cohesion*

3.5.3 Analisis Stabilitas Lereng dengan Perkuatan *Soil Nailing* dan *Shotcrete*

Suatu perkuatan dinding penahan tanah harus dirancang agar aman/ stabil terhadap pengaruh-pengaruh gaya dalam dan gaya luar. Analisis terbagi menjadi dua yaitu stabilitas luar atau stabilitas luar (*external stability*) dan stabilitas dalam

(*internal stability*). Berikut disajikan Gambar 3.8 yang menunjukkan macam-macam analisis stabilitas external dan internal.

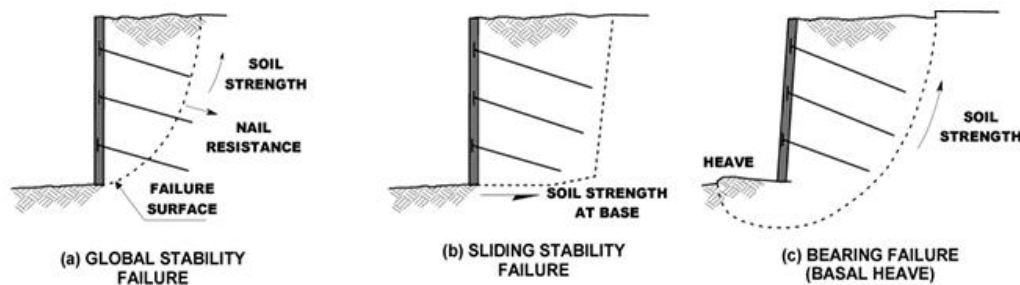


FIGURE 1: EXTERNAL FAILURE MODES

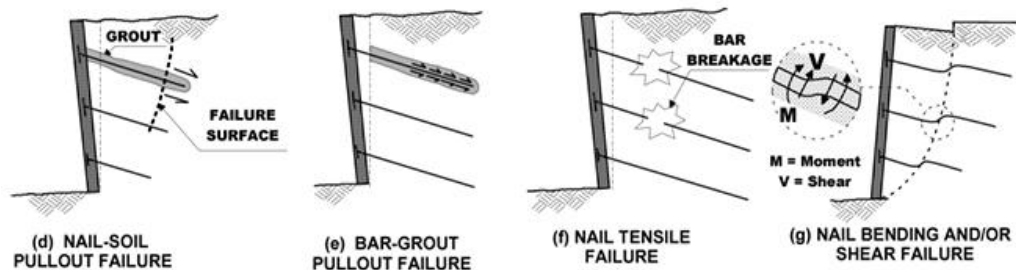
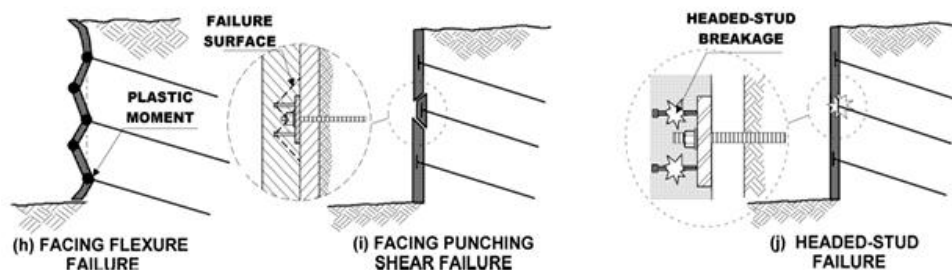


FIGURE 2: INTERNAL FAILURE MODES



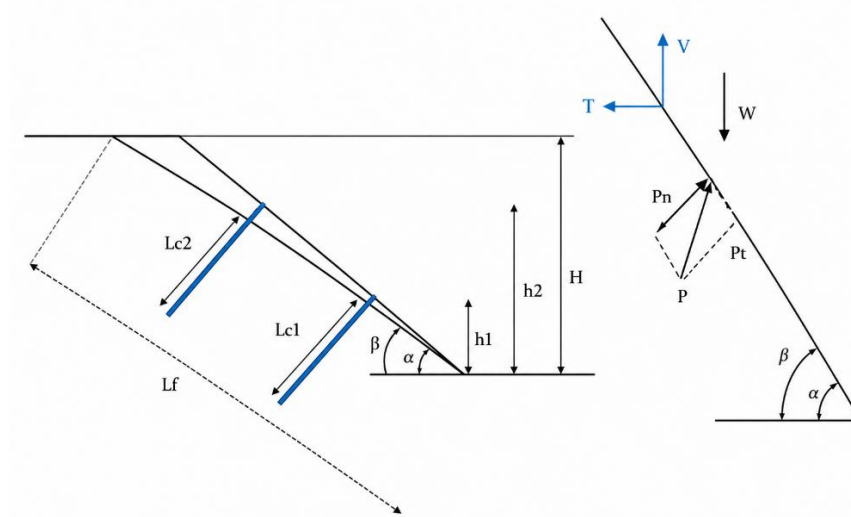
Gambar 3. 8 Macam Analisis Stabilitas External dan Internal
(Sumber: Lazarte dkk, 2012)

3.5.2.1 Analisis Stabilitas Eksternal

Analisis stabilitas eksternal dilakukan untuk menentukan faktor keamanan terhadap longsohnya lereng akibat gaya eksternal.

1. Faktor aman terhadap keruntuhan lereng global (*Global Stability Failure*)
Perkuatan lereng harus aman terhadap keruntuhan, pada perhitungan manual, mengadopsi metode baji (*wedge*) dengan bidang longsor planar. Berdasarkan SNI 8460:2017, faktor keamanan minimum terhadap stabilitas

global yaitu sebesar $\geq 1,5$. Gaya yang bekerja dalam metode baji ditunjukkan pada Gambar 3.9 berikut.



Gambar 3. 9 Gaya yang Bekerja dalam Metode Baji (Wedge)
(Sumber: Wibowo dkk., 2022)

Berdasarkan Gambar 3.9 didapatkan Persamaan 3.6 dan Persamaan 3.7 berikut ini.

$$\sum T_i - P_n \sin \alpha + P_t \cos \alpha = 0 \quad (3.6)$$

$$W - P_n \cos \alpha - P_t \sin \alpha - \sum V_i = 0 \quad (3.7)$$

Perhitungan nilai faktor keamanan suatu lereng ditunjukkan pada Persamaan 3.8 berikut

$$FS = \frac{c \cdot L_f + W \cos \alpha \cdot \tan \phi + (\sum T_i \sin(\alpha + i) - \sum V_i \cos(\alpha + i)) \tan \phi}{w \cdot \sin \alpha - \sum T_i \cos(\alpha + i) - \sum V_i \sin(\alpha + i)} \quad (3.8)$$

Dengan :

FS = faktor aman

c = kohesi tanah

ϕ = sudut gesek dalam tanah ($^\circ$)

α = sudut kemiringan bidang longsor terhadap garis horisontal

W = berat irisan tanah ke-n (kN/m)

Q = beban mati di atas lereng (kN/m)

Lf = panjang lengkung lingkaran pada irisan ke-n (m)

Le = panjang nail bar di belakang bidang longsor (m)

- β = kemiringan lereng ($^{\circ}$)
 I = kemiringan *nail* ($^{\circ}$)
 ΣT_i = jumlah daya dukung terhadap gaya tarik (kN/m)
 ΣV_i = jumlah daya dukung gaya geser (kN/m)

a. Gaya Geser dan Gaya Tarik Ijin Global

Perhitungan gaya geser dan gaya tarik izin global pada suatu *nail bar* dapat ditentukan menggunakan Persamaan 3.9 dan Persamaan 3.10 berikut.

$$V = \frac{R_n}{2\sqrt{1+4\tan^2(90^\circ-\alpha)}} \quad (3.9)$$

$$T = 4 V \tan(90^\circ-\alpha) \quad (3.10)$$

Dengan:

V = gaya geser ijin *nail bar*

T = gaya tarik ijin *nail bar*, dan

R_n = daya dukung tarik *nail bar*

Perhitungan gaya geser izin pada tanah dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.11 berikut..

$$V = P_p = \frac{D}{2} L_o \quad (3.11)$$

Dengan:

V = gaya geser ijin pasif tanah

D = diameter *nail bar*+*grouting*

$L_o = \sqrt[4]{\frac{4EI}{K_s D}}$ panjang penyaluran

EI = kekauan *nail bar*, diameter *nail bar* tanpa *grouting*

K_s = modulus reaksi lateral tanah pada Tabel 3.14, dan

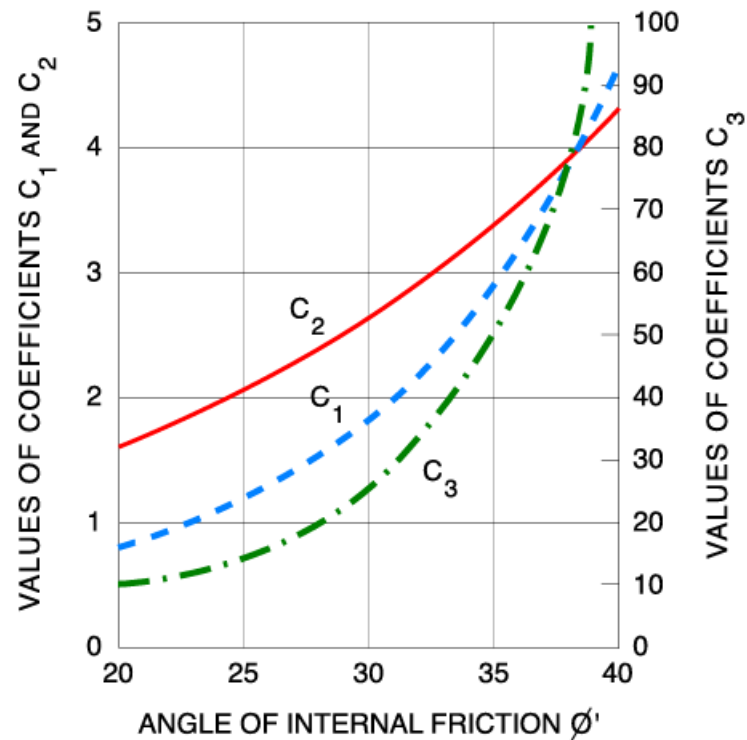
$P_p = \frac{P_u}{2}$

= tegangan pasif yang dibatasi menjadi setengah tegangan pasif ultimit dan dihitung dari nilai terkecil pada Persamaan 3.12 dan Persamaan 3.13 berikut

$$P_u = (C_1 \times Z + C_2 \times D) \gamma Z \quad (3.12)$$

$$P_u = C_3 D \gamma Z \quad (3.13)$$

Nilai koefisien C_1 , C_2 , dan C_3 ditunjukkan pada Gambar 3.10 berikut



Gambar 3. 10 Korelasi Koefisien C_1 , C_2 dan C_3
(Sumber: API,1987)

Nilai modulus reaksi lateral menurut Bowles ditunjukkan pada Tabel 3.10 berikut.

Tabel 3. 11 Perkiraan Nilai K_s

Jenis Tanah	K_s , kef	K_s , kN/m ³
Pasir lepas	300-100	4800 – 16000
Pasir padat sedang	60-500	9600 – 80000
Pasir padat	400-800	64000 – 128000
Pasir padat berlempung	200-500	32000 – 80000
Tanah berlempung	150-300	24000 – 48000
$q_u \leq 200$ kPa (4ksf)	75-150	12000 – 24000
$200 < q_u \leq 400$ kPa	150-300	24000 – 48000
$q_u > 800$ kPa	>300	>48000

(Sumber: Bowles,1996)

Gaya tarik izin pada *nail* harus dibatasi berdasarkan nilai gaya geser izin terkecil antara *nail bar* dan tanah. Besarnya nilai tersebut dapat ditentukan menggunakan Persamaan 3.14 berikut..

$$\frac{V_{max}^2}{R_c^2} + \frac{T_{max}^2}{R_n^2} = 1 \quad (3.14)$$

Dengan:

V_{max} = gaya geser ijin global

T_{max} = gaya tarik ijin global, dan

$R_c = \frac{R_n}{2}$ = daya dukung geser *nail bar*

b. Gaya Tarik Ijin Dari Perkuatan *Soil Nailing*

Gaya ijin global dapat digunakan jika gaya ijin global lebih besar dari gaya tarik ijin masing-masing *nail*. Perhitungan ini ditunjukkan dengan Persamaan 3.15 berikut

$$T_i = \frac{\pi \times D \times L_e \times f_{max}}{SF} \quad (3.15)$$

Nilai F_{max} adalah daya dukung geser pada ikatan tanah dengan permukaan sepanjang *nail bar*, sebaiknya dilakukan pengujian di lapangan untuk mendapatkan nilai ini. Berikut nilai f_{max} ditunjukkan pada Tabel 3.11 berikut.

Tabel 3. 12 Estimasi Nilai *Ultimate Bond Strength*

Jenis tanah	<i>Ultimate bond strength, qs</i>	
	kPa	Psi
<i>Silty clay</i>	35-50	5-7
<i>Clayey silt</i>	90-140	13-20
<i>Loess</i>	25-75	4-11
<i>Soft clay</i>	20-30	3-4
<i>Stiff clay</i>	40-60	6-9
<i>Stiff clayey silt</i>	40-100	6-15
<i>Calcareous sandy clay</i>	90-140	13-20

(Sumber: Elias a Juran, 1991)

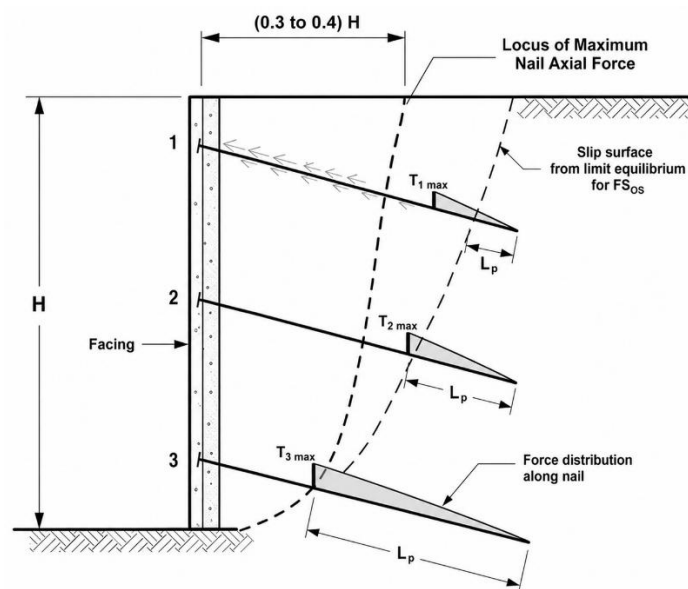
C_b	= Kohesi Tanah (kN/m^2)
BL	= Lebar Struktur
W	= Berat Irisan Tanah (kN/m)
Q	= Beban Mati Di Atas Lereng (kN/m)
ϕ	= Sudut Geser Dalam Tanah
H	= Tinggi Tanah (m)
γ	= Berat Isi Tanah (kN/m)

3.5.2.2 Analisis Stabilitas Internal

Analisis ini dilakukan untuk menentukan faktor keamanan penguatan lereng dengan paku tanah terhadap faktor internal seperti ukuran penguatan, termasuk kekuatan penguatan dan kemungkinan penguatan terpotong atau tercabut.

1. Faktor Aman (SF) Terhadap Putus Tulangan

Dalam analisis ini, dihitung rasio antara jarak antar tulangan dan tekanan tanah yang akan diterima oleh tulangan. Berikut Gambar 3.12 yang menunjukkan keruntuhan putus tulangan.



Gambar 3. 12 Keruntuhan Putus Tulangan
(Sumber: FHWA-NHI-14-007)

Berdasarkan FHWA-NHI-14-007, faktor keamanan minimum terhadap putus tulangan yaitu sebesar $\geq 1,8$. Perhitungan faktor aman terhadap putus tulangan dilakukan melalui Persamaan 3.19 dan Persamaan 3.20 di bawah ini

$$Fr = \frac{\left(\frac{0,25 \times \pi \times d^2 \times f_y}{1000} \right)}{\sigma_h \cdot S_v \cdot S_h} \quad (3.19)$$

$$\sigma_h = K a \gamma z \quad (3.20)$$

Dengan :

Fr = Faktor Keamanan terhadap putus tulangan

Sv = Jarak tulangan vertikal (m)

Sh = Jarak tulangan horizontal (m)

Fy = Gaya tarik baja penopang (MPa)

d = Diameter tulangan (mm)

Σh = Tekanan tanah horizontal pada kedalaman yang dianalisis (kN/m²)

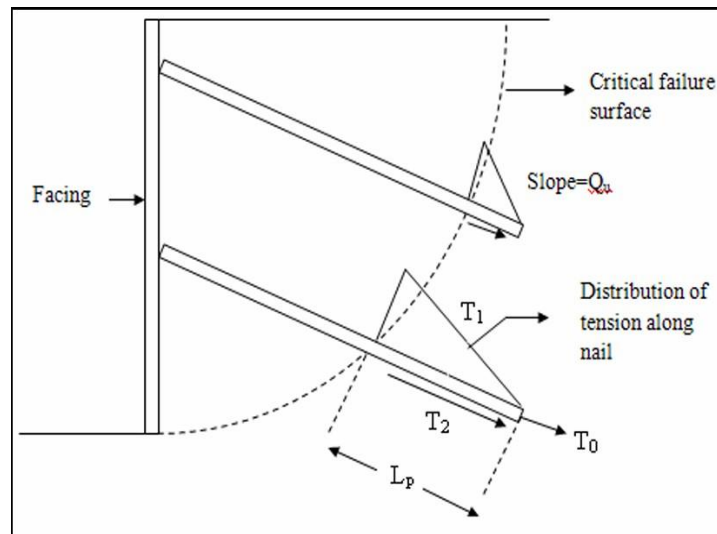
Γ = Berat kandungan tanah (kN/m)

z = Kedalaman tanah yang dianalisis (m)

δ = Sudut gesekan antara tanah pondasi dan dasar struktur (dengan asumsi pondasi beton yang sangat kasar $\tan \delta = \tan \phi$)

2. Faktor Aman (SF) Terhadap Cabut Tulangan

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan tulangan dalam menahan gaya-gaya yang bekerja. Analisis tersebut penting untuk memastikan tidak terjadi kegagalan struktur akibat pengaruh gaya tersebut. Berikut Gambar 3.13 yang menunjukkan keruntuhan cabut tulangan.



Gambar 3. 13 Keruntuhan Cabut Tulangan

(Sumber: Prashant dkk, 2010)

Berdasarkan FHWA-NHI-14-007, faktor keamanan minimum terhadap cabut tulangan yaitu sebesar ≥ 2 . Perhitungan faktor keamanan terhadap putus tulangan, dapat dilakukan menggunakan Persamaan 3.21 sebagai berikut.

$$F_p = \frac{\pi q_u D_{dh} L_p}{\sigma_h S_v S_h} \quad (3.21)$$

Dengan :

F_p = Faktor Keamanan terhadap penarikan tulangan baja

S_v = Jarak tulangan vertikal (m)

q_u = kekuatan ikatan maksimum (kN/m^2)

σ_h = Tekanan tanah horizontal pada kedalaman yang dianalisis (kN/m^2),

L_p = Panjang tulangan pada zona pasif (m)

ϕ = Sudut gesekan internal tanah ($^\circ$)

D_{dh} = Diameter lubang bor (m)

3.6 Program SLOPE/W

SLOPE/W merupakan program analisis geoteknik yang digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng berdasarkan metode kesetimbangan batas (*Limit Equilibrium Method*). Program ini merupakan bagian dari paket GeoStudio yang

dikembangkan oleh Seequent dan banyak digunakan dalam bidang teknik sipil, pertambangan, maupun geoteknik untuk mengevaluasi keamanan lereng alami dan lereng buatan terhadap potensi longsor. Dalam analisisnya, SLOPE/W mampu menghitung nilai faktor keamanan (*Factor of Safety*/FOS) dengan mempertimbangkan kondisi geometri lereng, parameter tanah, muka air tanah, serta pengaruh beban luar.

SLOPE/W memiliki fungsi utama untuk menentukan tingkat kestabilan lereng dan mencari bidang longsor kritis yang berpotensi menyebabkan keruntuhan lereng. Program ini dapat digunakan untuk menganalisis berbagai kondisi, seperti lereng alami, timbunan tanah, bendungan, tanggul, maupun lereng yang telah diperkuat menggunakan *soil nailing*, geotekstil, dan dinding penahan tanah. Selain itu, SLOPE/W juga mampu memberikan visualisasi hasil analisis berupa bidang gelincir, distribusi gaya, dan nilai faktor keamanan sehingga memudahkan pengguna dalam mengevaluasi kondisi lereng secara menyeluruh.

Adapun dalam pengoperasian SLOPE/W, terdapat beberapa tahapan yang perlu dilakukan sebagai bagian dari proses analisis.

1. Pembuatan Project baru

Tahap awal analisis dilakukan dengan membuka program GeoStudio dan memilih modul SLOPE/W untuk membuat project baru. Pada tahap ini pengguna menentukan sistem satuan yang digunakan, seperti meter dan kN, agar seluruh data yang dimasukkan memiliki keseragaman satuan dalam proses analisis.

2. Pembuatan Geometri Lereng

Tahap berikutnya adalah membuat geometri lereng berdasarkan kondisi eksisting di lapangan. Geometri yang dimasukkan meliputi tinggi lereng, sudut kemiringan lereng, panjang lereng, dan kondisi permukaan tanah. Pembuatan geometri dapat dilakukan secara manual maupun dengan mengimpor data hasil survei topografi atau gambar CAD.

3. Proses Perhitungan Analisis

Setelah seluruh data dimasukkan, dilakukan proses analisis dengan menjalankan perintah *Solve/Compute*. Pada tahap ini program akan menghitung faktor keamanan lereng berdasarkan metode yang dipilih serta mempertimbangkan seluruh parameter yang telah dimasukkan sebelumnya.

4. Interpretasi hasil Analisis

Tahap akhir adalah melakukan interpretasi terhadap hasil analisis yang diperoleh. Hasil tersebut meliputi nilai faktor keamanan, bentuk bidang longsor kritis, distribusi gaya, dan potensi keruntuhan lereng. Nilai faktor keamanan kemudian digunakan untuk menentukan apakah lereng dalam kondisi aman atau memerlukan perkuatan tambahan.

3.7 Program PLAXIS

PLAXIS merupakan salah satu perangkat lunak yang banyak dimanfaatkan dalam analisis geoteknik. Program ini berbasis metode elemen hingga dan digunakan untuk menyelesaikan berbagai permasalahan di bidang geoteknik dengan bantuan model-model tanah yang mampu mensimulasikan perilaku tanah secara mendekati kondisi nyata. PLAXIS juga dilengkapi dengan sistem pemodelan grafis yang cukup sederhana, sehingga pembuatan model yang kompleks dapat dilakukan dengan lebih efisien. Selain itu, hasil analisis yang dihasilkan dapat ditampilkan secara rinci. Dalam penelitian ini, digunakan model Mohr-Coulomb, yaitu model elastis-plastis dengan lima parameter utama, meliputi E dan μ sebagai parameter elastisitas tanah, ϕ dan c sebagai parameter plastisitas, serta ψ yang merepresentasikan sudut dilatasi.

Mengacu pada SNI 8460:2017, penerapan metode pseudostatik dalam PLAXIS mempertimbangkan pengaruh gempa yang dinyatakan dalam bentuk percepatan horizontal dan/atau vertikal. Nilai koefisien seismik yang digunakan didasarkan pada percepatan puncak di permukaan atau *Peak Ground Acceleration* (PGA). Dalam hal ini, koefisien seismik horizontal yang digunakan dalam perhitungan diambil sebesar setengah dari nilai PGA tersebut.

Adapun dalam pengoperasian Plaxis, terdapat beberapa tahapan yang perlu dilakukan sebagai bagian dari proses analisis.

1. *Input data*

Pada tahap awal, dilakukan pemodelan pada software PLAXIS yang disesuaikan dengan kondisi aktual di lapangan. Data yang dimasukkan meliputi parameter tanah pada setiap lapisan, beban yang bekerja pada tanah, serta posisi dan kedalaman muka air tanah air

2. *Calculation*

Setelah seluruh data yang diperlukan telah dimasukkan, tahap berikutnya adalah menjalankan *calculation* terhadap model lereng yang telah dibuat.

3. *Output*

Setelah melakukan *calculation*, PLAXIS akan menampilkan *output* hasil perhitungan. Hasil dari *calculation* dapat berupa deformasi, distribusi tegangan, faktor keamanan, serta berbagai parameter geoteknik lainnya yang ditampilkan dalam bentuk visual maupun data numerik.

4. *Curve*

PLAXIS dapat dipakai untuk menggambarkan kurva hubungan antara dua variabel seperti hubungan beban terhadap *displacement* dan diagram tegangan-regangan.

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Tinjauan Umum

Penelitian ini berfokus pada analisis kestabilan lereng dengan membandingkan kondisi lereng sebelum dan sesudah diberikan perkuatan. Pada tahap awal, dilakukan analisis terhadap kondisi lereng eksisting (tanpa perkuatan). Perhitungan faktor keamanan lereng eksisting dilakukan menggunakan metode *Bishop* dengan SLOPE/W, perhitungan manual menggunakan metode *Fellenius* serta dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak PLAXIS berbasis metode elemen hingga untuk memperoleh gambaran perilaku lereng secara lebih detail.

Selanjutnya, dilakukan perencanaan perkuatan lereng menggunakan metode *soil nailing* yang dikombinasikan dengan *shotcrete*. Setelah perkuatan dirancang, analisis kestabilan lereng dilakukan kembali. Pada tahap ini, digunakan metode baji (*wedge method*) secara manual untuk menghitung faktor keamanan lereng setelah diberi perkuatan, serta analisis menggunakan PLAXIS untuk melihat perubahan nilai faktor keamanan. Hasil dari penelitian ini berupa perbandingan nilai faktor keamanan lereng sebelum dan sesudah perkuatan. Dari hasil tersebut dapat diketahui seberapa efektif penggunaan *soil nailing* dan *shotcrete* dalam meningkatkan kestabilan lereng.

4.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlokasi pada lereng di sekitar area PLTA Balambano di Kecamatan Wasuponda, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan. Secara astronomis terletak pada *Latitude* 2°38'36.60"S dan *Longitude* 121°13'12.38"E. Adapun peta lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4. 1 Lokasi Penelitian

Berikut Gambar 4.2 yang menunjukkan kondisi lereng di area penelitian.



Gambar 4. 2 Kondisi Lereng Di Area Penelitian

4.3 Metode Penelitian

Metode penelitian dilakukan dalam beberapa tahapan yaitu diawali dengan melakukan studi literatur terkait kestabilan lereng. Kemudian, dilakukan pengumpulan data lapangan yang akan digunakan dalam analisis yang berupa data pengujian SPT (*standard penetration test*), data laboratorium, data topografi dan data geometri lereng. Setelah mendapatkan data-data tersebut, dilakukan analisis

kondisi eksisting lereng menggunakan program SLOPE/W, PLAXIS dan perhitungan manual dengan metode *Fellenius* untuk mendapatkan angka aman kondisi eksisting lereng. Perhitungan metode *Bishop* dilakukan dengan program SLOPE/W dengan membagi lereng menjadi beberapa irisan untuk mengevaluasi keseimbangan gaya dan momen pada masing-masing irisan. Apabila angka aman lereng berada dibawah 1,5 maka langkah selanjutnya adalah mendesain perkuatan lereng dengan *soil nailing* dan *shotcrete*. Setelah mendesain perkuatan, dilakukan pemodelan dengan program PLAXIS 2D dan perhitungan manual menggunakan metode Baji (*wedge*). Perhitungan metode baji dilakukan secara manual dengan menganalisis kestabilan lereng berdasarkan keseimbangan gaya pada bidang gelincir berbentuk baji.

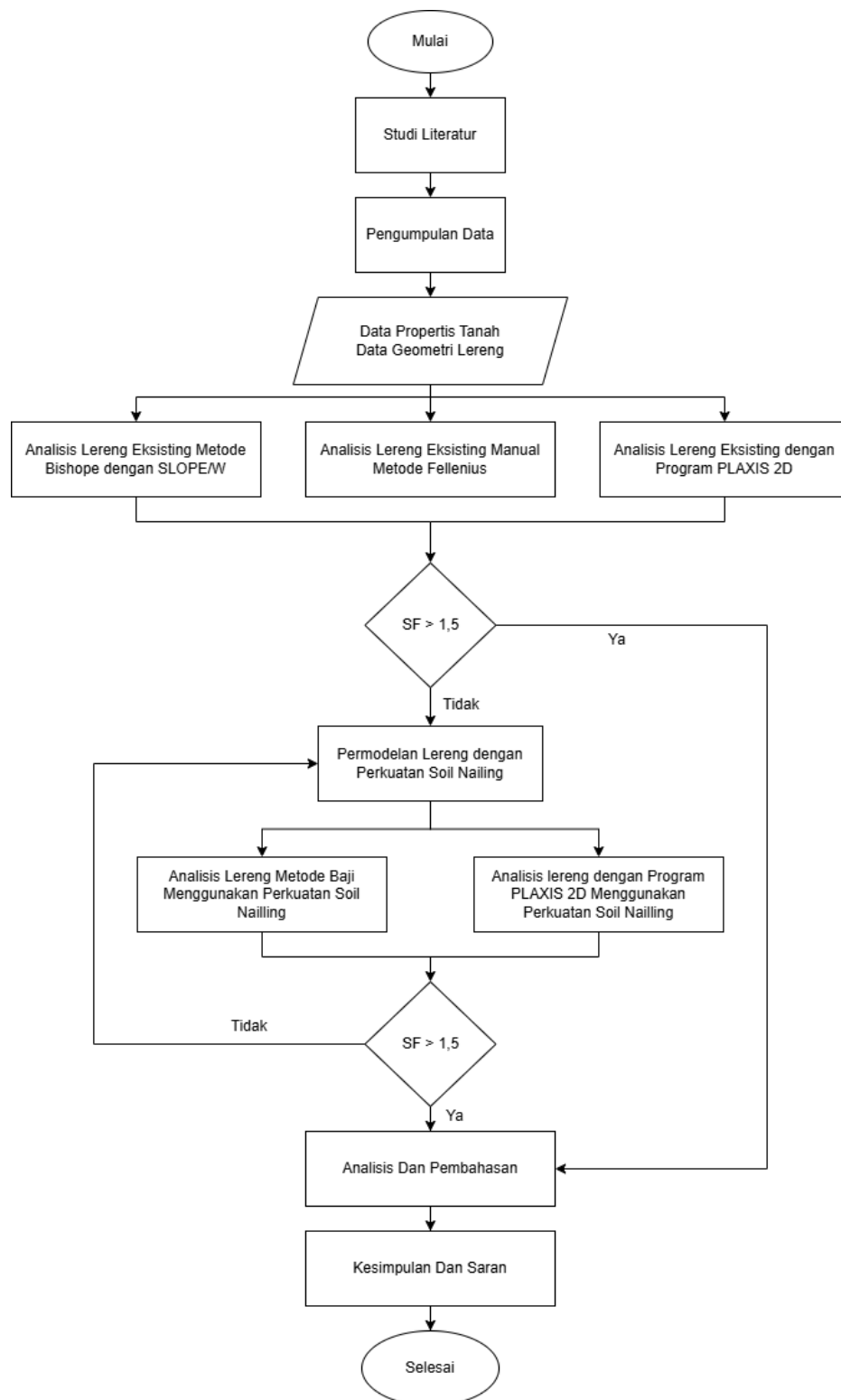
4.4 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari perusahaan kontraktor, yaitu PT. Lycon Asia Mandiri, yang bekerja sama dengan PT. Vale dalam proyek perkuatan lereng pada Balambano Dam. Data ini digunakan sebagai dasar dalam proses analisis penelitian. Data yang digunakan adalah sebagai berikut.

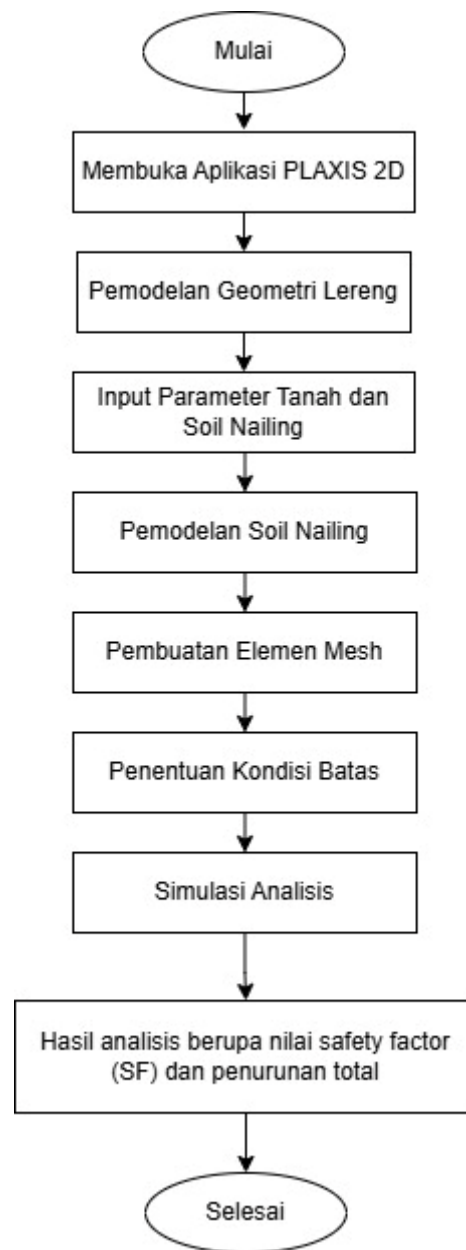
1. Data pengujian SPT (*Standard Penetration Test*).
2. Data laboratorium
3. Data topografi dan geometri lereng

4.5 Bagan Alir

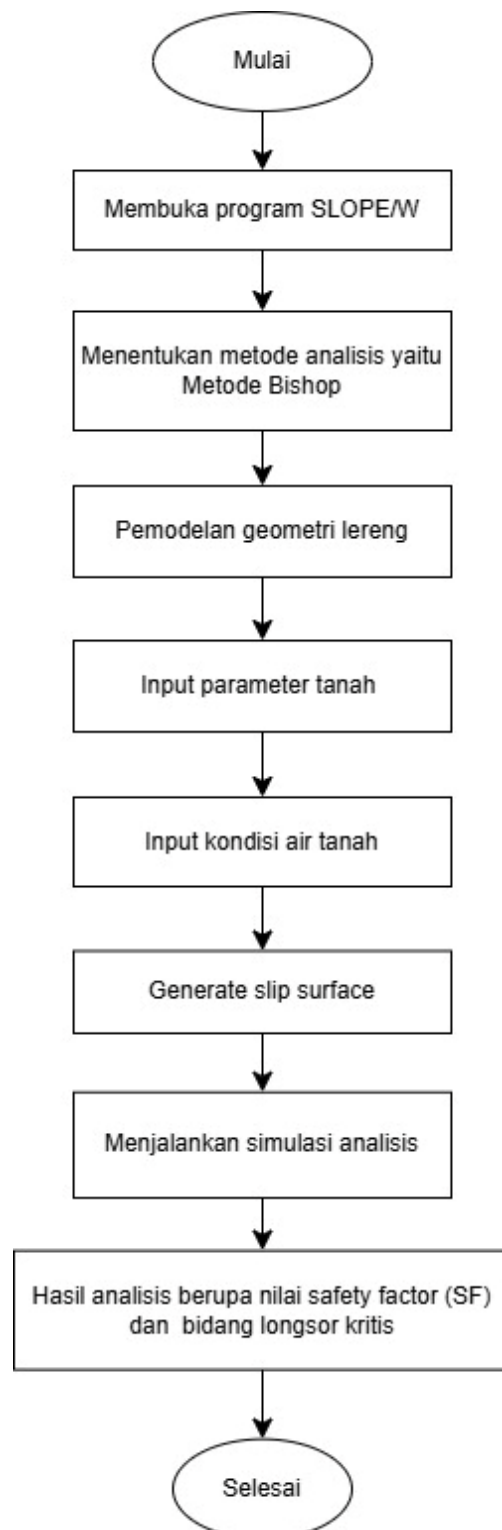
Bagan alir penelitian ini disusun untuk menggambarkan tahapan analisis yang akan dilakukan. Berikut bagan alir pada penelitian ini yang Dimana pada Gambar 4.3 menunjukkan bagan alir penelitian, pada Gambar 4.4 menunjukkan bagan alir analisis stabilitas lereng dengan *software* PLAXIS dan Gambar 4.5 yang menunjukkan bagan alir analisis stabilitas lereng dengan program SLOPE/W.



Gambar 4. 3 Bagan Alir Penelitian



Gambar 4. 4 Bagan Alir Analisis Stabilitas Lereng dengan *Software* PLAXIS



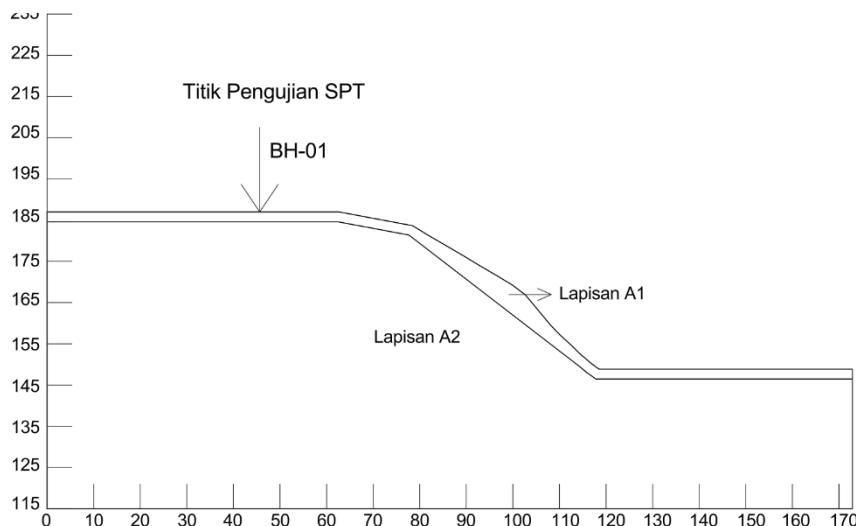
Gambar 4. 5 Bagan Alir Analisis Stabilitas Lereng dengan Program SLOPE/W

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Parameter Tanah

Parameter tanah diperoleh dari data pengujian SPT (*standard penetration test*) dan hasil pengujian laboratorium yang diberikan oleh PT Lycon Asia Mandiri. Didapatkan data dua lapisan tanah yang diberi kode A1 dan A2. Berikut merupakan Gambar 5.1 yang menunjukkan titik pengujian SPT.



Gambar 5. 1 Titik Pengujian SPT

Penentuan parameter tanah pada penelitian ini dilakukan dengan *back analysis* terhadap kondisi kelongsoran yang terjadi di lapangan, sehingga model lereng yang dianalisis dapat merepresentasikan kondisi longsor aktual di lapangan. Dengan *back analysis* tersebut, parameter tanah dikalibrasi dengan mempertimbangkan hasil investigasi lapangan serta kondisi geologi setempat.

Lapisan tanah A1 merupakan lapisan tanah bagian atas yang diasumsikan sebagai zona pelapukan (*weathered zone*). Penentuan parameter pada lapisan ini didasarkan pada korelasi nilai N-SPT dengan properties tanah pasir. Pada lapisan ini memiliki nilai kohesi dan sudut geser dalam yang relatif rendah agar dapat

merepresentasikan kondisi asli di lapangan yang menunjukkan adanya pelapukan pada *top soil*.

Sedangkan untuk lapisan tanah A2 merupakan lapisan tanah yang berada di bawah *top soil* dan masih merupakan tanah asli. Penentuan parameter tanah pada lapisan A2 dilakukan berdasarkan korelasi terhadap nilai SPT (*standard penetration test*) yang diperoleh dari hasil penyelidikan lapangan. Lapisan tanah A2 dianggap merepresentasikan kondisi tanah asli yang belum mengalami pelapukan. Berikut Tabel 5.1 yang menunjukkan parameter tanah yang akan digunakan untuk masing-masing lapisan A1 dan A2.

Tabel 5. 1 Parameter Tanah Hasil *Back Analysis*

Nama Lapisan				A1	A2
Indeks Properties		Simbol	Satuan		
1	Berat Volume Basah	γ_w	kN/m ³	15	22,24
2	Berat Volume Jenuh	γ_{sat}	kN/m ³	22,196	24,51
3	Modulus Elastisitas	E	Mpa	25	50
4	<i>Poisson Ratio</i>	ν	-	0,25	0,3
5	Sudut Geser Tanah	ϕ	°	22	30
6	Kohesi Tanah	c	kN/m ²	13	200
7	Analisis Ukuran Butir				
8	Kerikil		%	0.26	0.07
9	Pasir		%	92.17	90.62
10	Lanau		%	7.57	9.31
11	Lempung		%	0	0
12	Indeks Plastisitas		%	Non Plastis	Non Plastis

Berdasarkan data parameter tanah pada Tabel 5.1, selanjutnya dilakukan klasifikasi tanah menggunakan metode *Unified Soil Classification System* (USCS). Pada kotak yang berwarna merah, menunjukkan klasifikasi pada tanah A1 dan tanah A2 berdasarkan hasil analisis gradasi ukuran butir. Klasifikasi ini bertujuan untuk

mengidentifikasi jenis dan karakteristik tanah berdasarkan distribusi ukuran butir serta sifat plastisitasnya. Hasil klasifikasi tanah berdasarkan sistem USCS tersebut ditunjukkan pada Gambar 5.2 berikut.

Divisi Utama		Simbol Kelompok	Nama Jenis	Kriteria laboratorium	
Tanah berbutir kasar 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0.075 mm)	Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar (ukuran antara 4.75 mm - 75 mm)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir - kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \geq 4$, $C_c = \frac{(D_{20})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk GW Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$ $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \geq 6$, $C_c = \frac{(D_{20})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk SW Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$	
		GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir - kerikil, atau tidak mengandung butiran halus		
		GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir - lempung		
		GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil pasir - lempung		
	Pasir lebih dari 50 % dari fraksi kasar (ukuran antara 0.075 mm - 4.75 mm)	SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus		
		SP	Pasir gradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus		
		SM	Pasir berlanau, campuran pasir - lanau		
		SC	Pasir berlempung, campuran pasir - lempung		
		Lanau dan lempung batas cair 50 % atau kurang	ML		Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau lempung
			CL		Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus ("lean clay")
OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah				
MH	Lanau tak organik atau pasir halus diatome, lanau elastis				
Lanau dan lempung batas cair > 50 %	CH	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gembuk ("fat clay")			
	OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi			
	Tanah dengan kadar organik tinggi	P	Gambut ("peat") dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi		

Klasifikasi berdasarkan prosentase butiran halus, kurang dari 5%, bila saringan no. 200 > CL, SM, SC, 5% sampai 12% > CL, saringan, 200 > CL, ML, MH, OH, lebih 12%, bila saringan no. 200 = ML, CL, ML, MH, OH.

Daerah plastisitas Untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang mengandung plastisitas dan indeks keuletan dari daerah-daerah butiran halus Batas Atterberg yang tertera dalam daerah yang diarsir berarti butiran halus akan leleh lempung dan simbol

Batas Cair (LL) (%) Garis A: $PI = 0.73 (LL - 20)$

Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di: ASTM Designation D-2488

Gambar 5. 2 Hasil Klasifikasi Tanah USCS

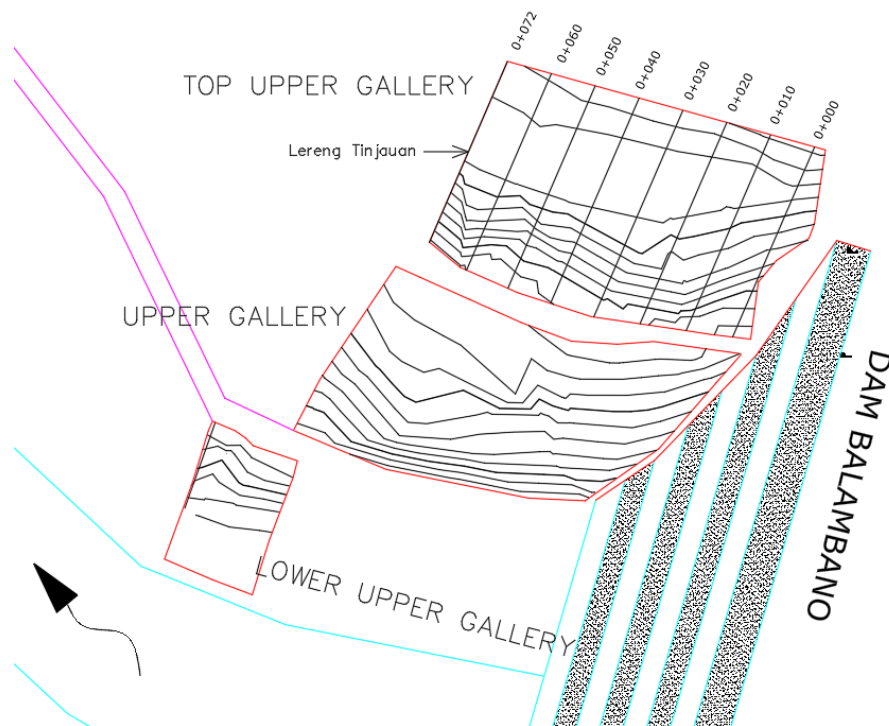
Setelah dilakukan klasifikasi tanah berdasarkan sistem USCS, selanjutnya dilakukan analisis terhadap data hasil pengujian *Standard Penetration Test* (SPT). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kepadatan dan karakteristik tanah pada setiap kedalaman pengeboran. Adapun hasil nilai N-SPT pada lokasi penelitian yang ditunjukkan pada Tabel 5.2 sebagai berikut.

Tabel 5. 2 Nilai N-SPT

Kedalaman (m)	N-SPT	Keterangan
0 - 2	30	<i>Dense</i>
2 - 4	>60	<i>Very dense</i>
4 - 6	>60	<i>Very dense</i>
6 - 8	>60	<i>Very dense</i>
8 - 10	>60	<i>Very dense</i>
10 - 12	>60	<i>Very dense</i>
12 - 14	>60	<i>Very dense</i>

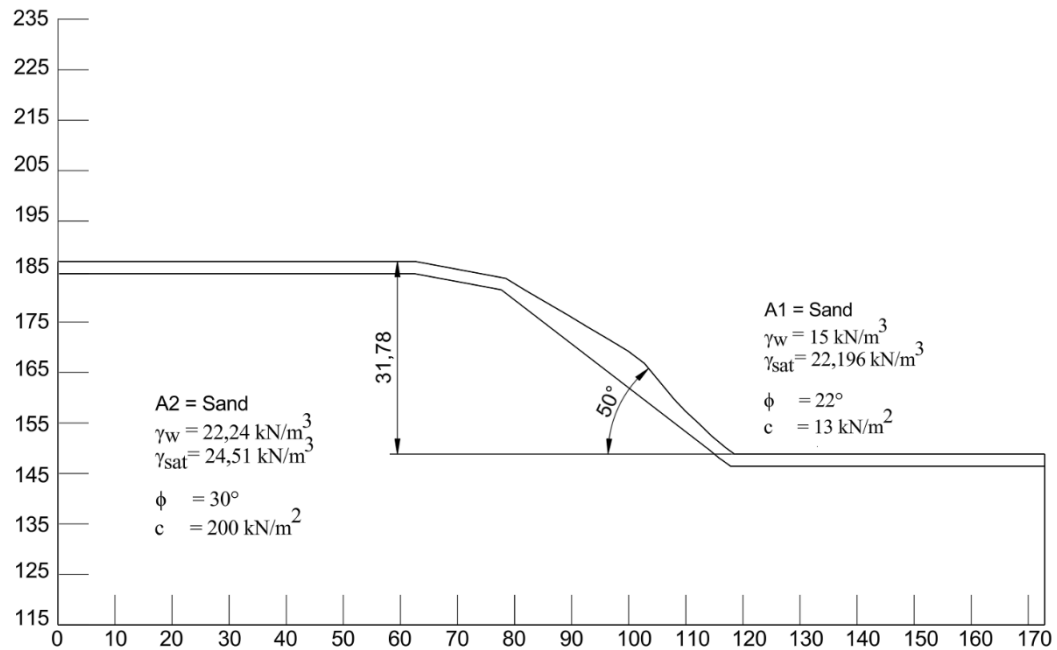
5.2 Topografi dan Geometri Lereng

Geometri lereng eksisting pada lokasi penelitian diperoleh dari data topografi yang berupa peta kontur lereng. Adapun bentuk peta kontur lereng pada masing-masing stasiun pengamatan ditunjukkan pada Gambar 5.3 berikut.



Gambar 5. 3 Peta Kontur Lereng Eksisting

Berdasarkan Gambar 5.3, didapatkan bahwa penampang lereng pada STA 0+030 memiliki kemiringan lereng paling curam, sehingga dapat mewakili kondisi lereng yang paling kritis dan berpotensi mengalami kelongsoran yang lebih tinggi dibandingkan penampang lainnya. Geometri lereng eksisting yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 5.4 berikut.



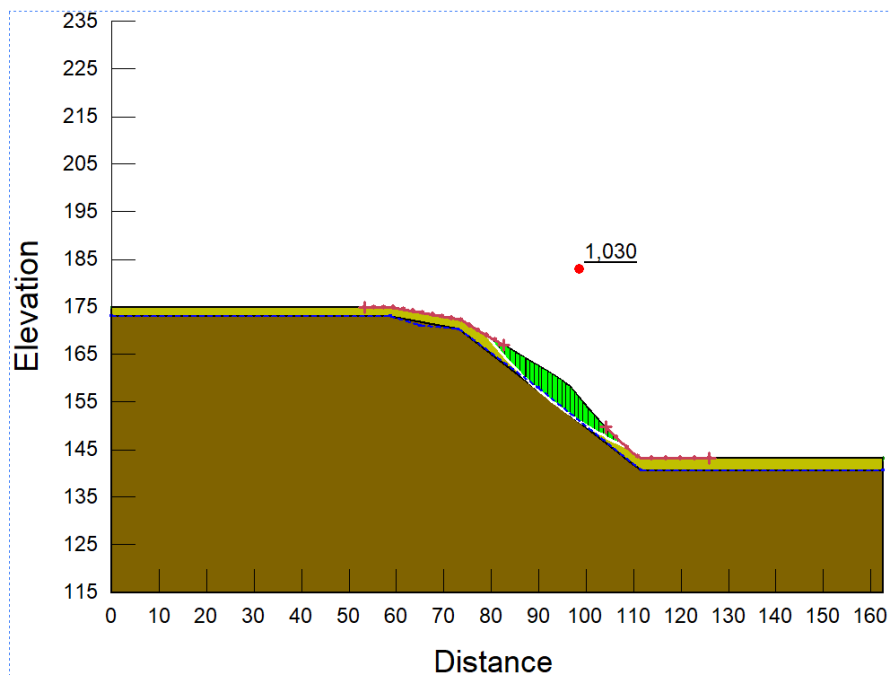
Gambar 5. 4 Geometri Lereng Eksisting

5.3 Analisis Stabilitas Lereng Eksisting

Analisis stabilitas lereng eksisting dilakukan menggunakan program SLOPE/W, *software* PLAXIS, serta perhitungan manual menggunakan metode *Fellenius*. Pemodelan lereng dilakukan berdasarkan data geometri lereng dan parameter karakteristik tanah yang telah ditentukan.

5.2.1 Pemodelan Lereng Eksisting pada SLOPE/W

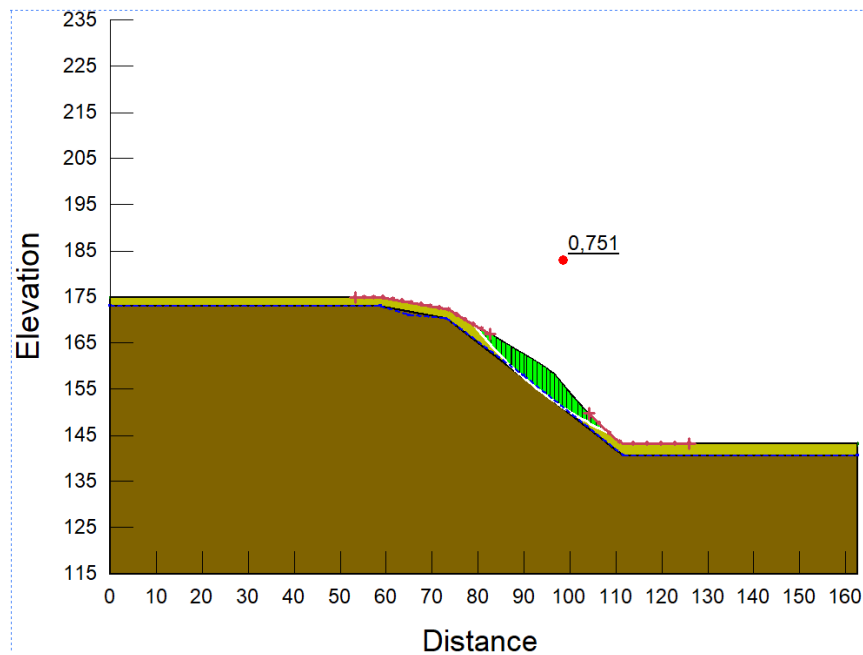
Dilakukan analisis stabilitas lereng dengan program SLOPE/W pada kondisi lereng tanpa pengaruh beban gempa. Hasil analisis berupa nilai *safety factor* (SF) dan bidang longsor kritis yang terbentuk ditampilkan pada Gambar 5.5 berikut



**Gambar 5. 5 Hasil Analisis Stabilitas Lereng Eksisting dengan SLOPE/W
Tanpa Beban Gempa**

Berdasarkan hasil analisis stabilitas lereng eksisting menggunakan program SLOPE/W, diperoleh nilai faktor keamanan (SF) sebesar 1,030. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kondisi lereng berada dalam keadaan tidak stabil karena nilai $SF < 1,5$. Bidang longsor kritis ditunjukkan oleh area berwarna hijau.

Selanjutnya dilakukan analisis dengan memasukkan pengaruh beban gempa pada lereng eksisting. Nilai PGA yang digunakan pada lokasi penelitian adalah sebesar 0,5264 g, yang kemudian dikonversikan menjadi koefisien seismik horizontal sebesar 0,2632. Hasil pemodelan stabilitas lereng pada kondisi gempa ditunjukkan pada Gambar 5.6 berikut.

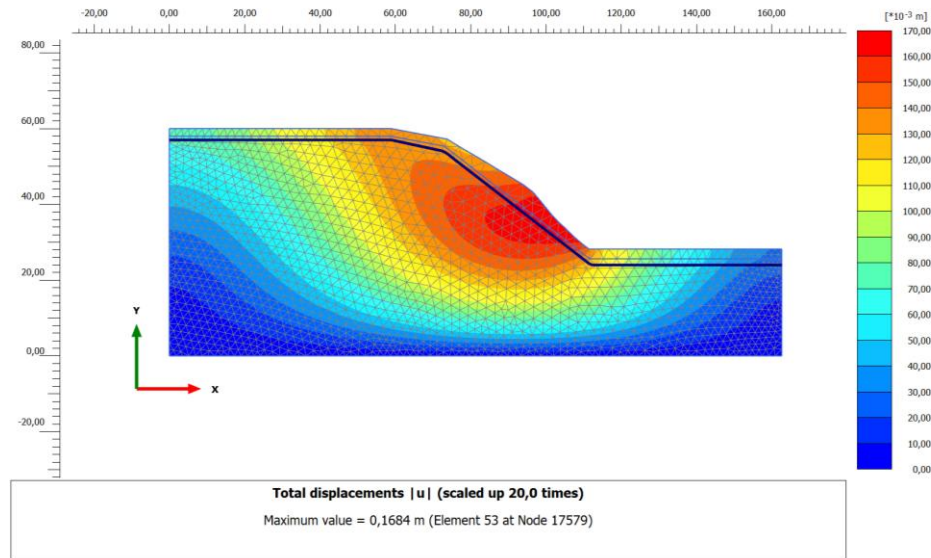


Gambar 5. 6 Hasil Analisis Lereng Eksisting dengan SLOPE/W pada Kondisi Gempa

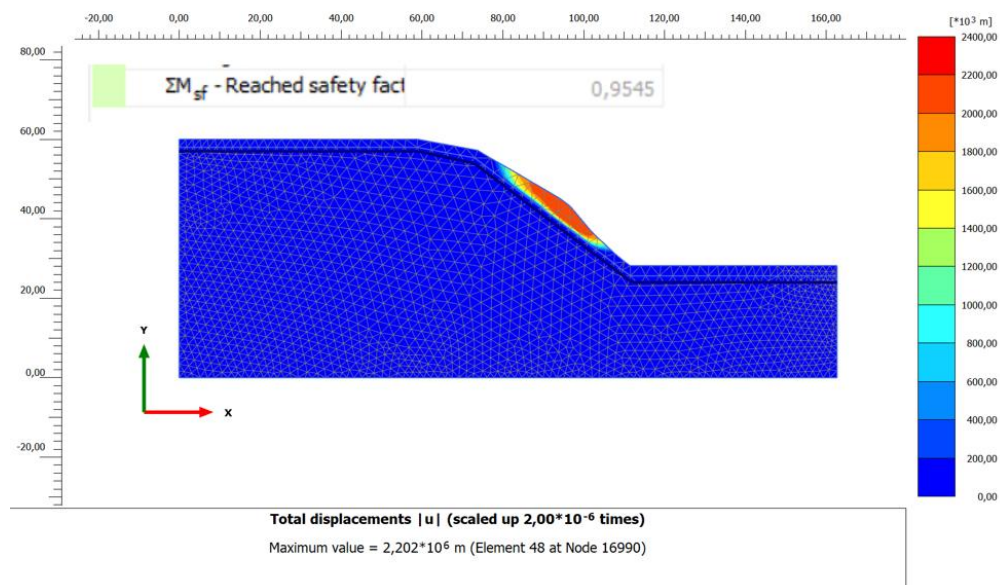
Hasil analisis SLOPE/W menunjukkan nilai faktor keamanan (SF) sebesar 0,751 setelah diberi beban gempa. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa lereng tidak stabil dan berpotensi mengalami longsor.

5.2.2 Analisis Stabilitas Lereng Eksisting dengan Program PLAXIS

Pemodelan lereng eksisting pada *software* PLAXIS dilakukan dengan model tanah menggunakan model *Mohr-Coulomb* lalu menambahkan geometri lereng, lapisan tanah, dan parameter tanah yang berupa berat isi tanah, kohesi, sudut geser dalam, modulus elastisitas, dan *poisson ratio*. Analisis PLAXIS juga menghasilkan nilai *total displacement* yang menunjukkan besarnya pergerakan tanah pada lereng serta lokasi deformasi maksimum yang berpotensi mengalami pergerakan tanah. Berikut hasil analisis stabilitas lereng eksisting tanpa gempa dan bidang longsor kritis yang terbentuk ditampilkan pada Gambar 5.7 dan 5.8 berikut



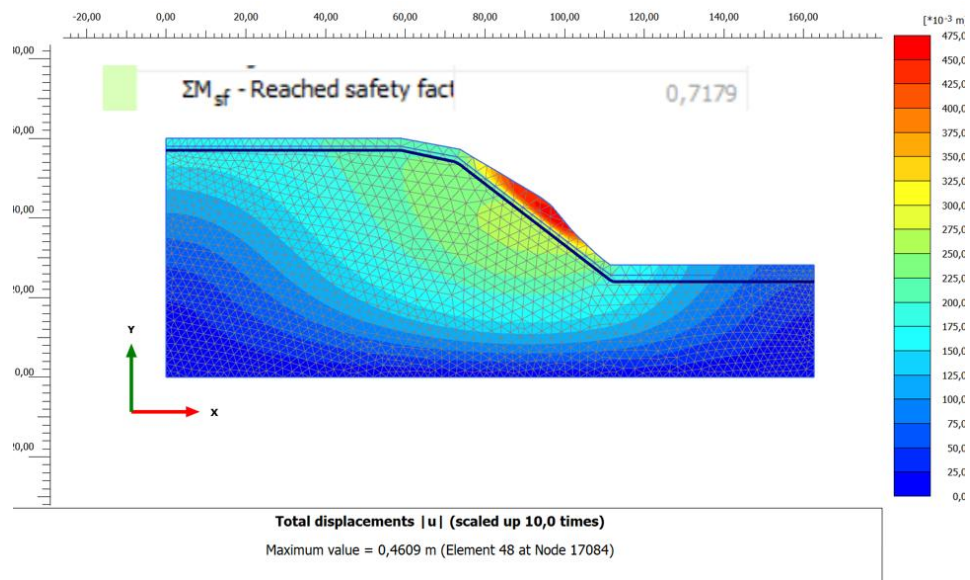
Gambar 5. 7 Hasil Analisis Distribusi *Total Displacement* Lereng Eksisting Tanpa Gempa



Gambar 5. 8 Hasil Analisis *Safety Factor* Lereng Eksisting Tanpa Gempa

Berdasarkan hasil analisis stabilitas lereng eksisting menggunakan program *software* PLAXIS, diperoleh nilai faktor keamanan (SF) tanpa pengaruh beban gempa adalah sebesar 0,9561 dengan nilai total *displacement* sebesar 0,168 m. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kondisi lereng berada dalam keadaan tidak stabil karena nilai $SF < 1,5$.

Analisis selanjutnya dilakukan dengan memasukkan pengaruh beban gempa pada model lereng eksisting menggunakan koefisien seismik horizontal sebesar 0,2632. Berikut Gambar 5.9 yang menunjukkan hasil pemodelan stabilitas lereng pada kondisi gempa.

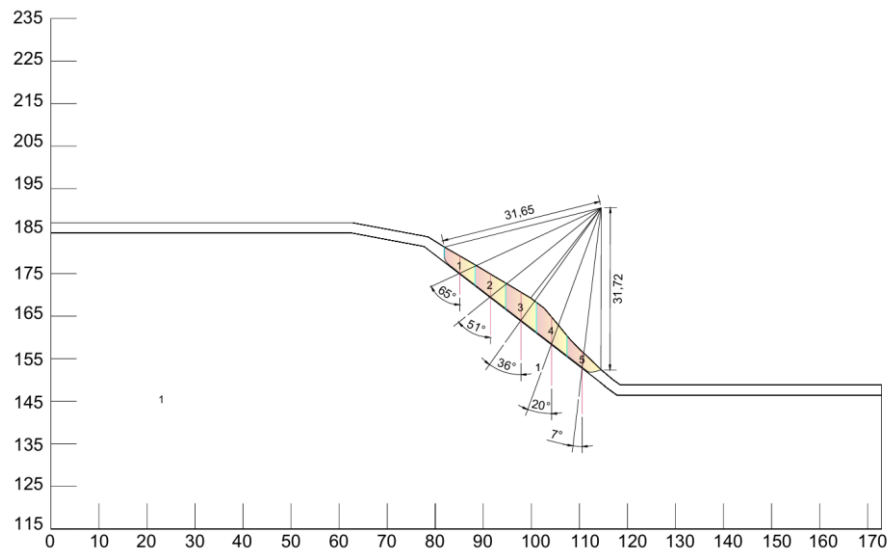


Gambar 5. 9 Hasil Analisis Stabilitas Lereng Eksisting Dengan PLAXIS pada Kondisi Gempa

Berdasarkan analisis pada *software* PLAXIS, lereng mengalami keruntuhan (*collapse*) saat diberikan beban gempa dengan deformasi maksimum sebesar 0,4609 m bidang zona longsor dan faktor keamanan terhadap gempa yaitu sebesar 0,717. Kondisi ini menunjukkan perlunya perkuatan lereng untuk meningkatkan stabilitas terhadap pengaruh gempa.

5.2.3 Analisis Stabilitas Lereng Eksisting dengan Metode *Fellenius*

Perhitungan faktor keamanan lereng dilakukan berdasarkan geometri lereng dan parameter tanah yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya. Sebagai dasar perhitungan, massa tanah yang berpotensi mengalami longsor dibagi menjadi beberapa pias sesuai dengan bidang gelincir yang telah ditentukan. Adapun bentuk bidang gelincir dan pembagian pias yang digunakan dalam analisis ditunjukkan pada Gambar 5.10 berikut.



Gambar 5. 10 Pembagian Pias Lereng Eksisting untuk Perhitungan Metode *Fellenius*

1. Perhitungan manual metode *Fellenius* pada pias ke - 1

a.) Menghitung berat irisan tanah (W)

$$\begin{aligned} W_1 &= \gamma \times A_1 \\ &= 15 \times 20,11 \\ &= 301,58 \text{ kN} \end{aligned}$$

b.) Menghitung radians (Rad)

$$\begin{aligned} \text{Rad}_1 &= \theta \times \frac{\pi}{180} \\ &= 65 \times \frac{\pi}{180} \\ &= 1,13 \end{aligned}$$

c.) Menghitung $\cos \alpha$

$$\begin{aligned} \cos \alpha_1 &= \cos (\text{Rad}_1) \\ &= \cos (1,13) \\ &= 0,42 \end{aligned}$$

d.) Menghitung $\sin \alpha$

$$\begin{aligned} \sin \alpha_1 &= \sin (\text{Rad}_1) \\ &= \sin (1,13) \end{aligned}$$

$$= 0,91$$

e.) Menghitung $W \times \cos \alpha$

$$\begin{aligned} W \times \cos \alpha &= 301,58 \times 0,42 \\ &= 127,45 \text{ kN} \end{aligned}$$

f.) Menghitung $W \times \sin \alpha$

$$\begin{aligned} W \times \sin \alpha &= 301,58 \times 0,91 \\ &= 273,32 \text{ kN} \end{aligned}$$

Setelah dilakukan perhitungan pada pias ke-1, perhitungan yang sama diterapkan pada seluruh pias. Rekapitulasi hasil perhitungan untuk setiap pias ditunjukkan pada Tabel 5.3 berikut.

Tabel 5. 3 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Lereng Eksisting Tiap Pias dengan Metode *Fellenius*

No.	Lapisan Tanah	Luas Irisan (m ²)	Berat Tanah (kN)	Sudut Irisan (°)	Radian	Cos α	Sin α	W.Cos α (kN)	W.Sin α (kN)
1.	A1	20,11	301,58	65	1,13	0,42	0,91	127,45	273,32
2.	A1	26,80	401,97	51	0,89	0,63	0,78	252,97	312,39
3.	A1	32,89	493,39	36	0,63	0,81	0,59	399,16	290,01
4.	A1	30,80	461,96	20	0,35	0,94	0,34	434,10	158,00
5.	A1	17,58	263,72	7	0,12	0,99	0,12	261,75	32,14
Total								1475,43	1065,86

Berdasarkan hasil perhitungan parameter pada setiap pias, nilai faktor keamanan (SF) lereng dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \sum c \cdot a_i &= c \times a_i \\ &= 13 \times 40,86 \\ &= 531,182 \text{ kN} \end{aligned}$$

Nilai a_i merupakan panjang bidang longsor yang didapatkan dari *software* AutoCAD yaitu sebesar 40,86 m.

$$\sum W \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi = 1475,43 \times \tan 22^\circ$$

$$= 596,11 \text{ kN}$$

$$\sum W \sin \alpha = 1065,86 \text{ kN}$$

$$SF = \frac{\sum (\sum c_{ai} + W \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi)}{\sum W \sin \alpha}$$

$$= \frac{\sum (531,182 + 596,11)}{1065,86}$$

$$= 1,057 < 1,5 \text{ (tidak aman)}$$

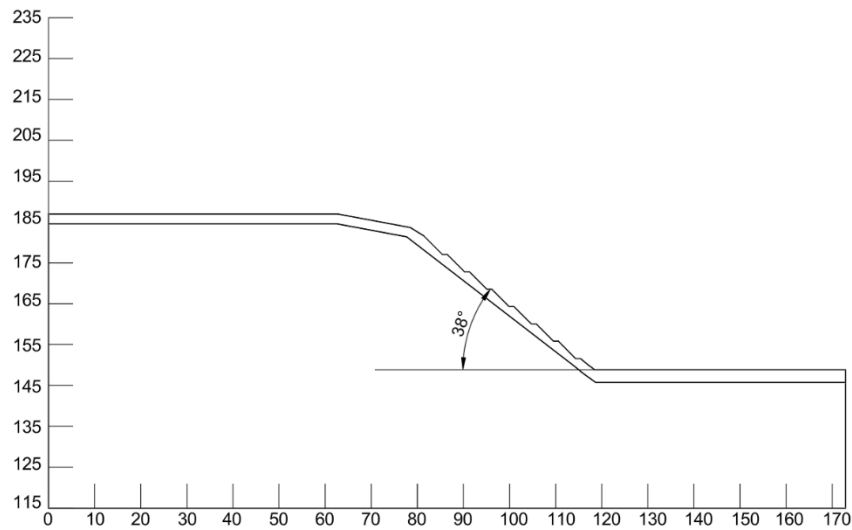
Berdasarkan hasil analisis nilai faktor aman (SF) tersebut, didapatkan bahwa lereng eksisting memiliki nilai SF sebesar $1,057 < 1,5$ (tidak aman). Setelah dilakukan perhitungan manual dengan metode *fellenius*, program SLOPE/W dan *software* PLAXIS, semua nilai SF berada dibawah 1,5. Berdasarkan SNI 8460:2017, nilai tersebut belum memenuhi persyaratan faktor keamanan minimum sebesar $\geq 1,5$, sehingga diperlukan desain perkuatan lereng dengan *soil nailing* untuk meningkatkan keamanannya.

5.3 Analisis Stabilitas Lereng Setelah Perkuatan *Soil Nailing* dan *Shotcrete*

Analisis perkuatan lereng dilakukan menggunakan *software* PLAXIS dan perhitungan manual dengan metode Baji (*wedge*). Pemodelan PLAXIS digunakan untuk mengetahui nilai SF dan deformasi lereng setelah diberi perkuatan. Sedangkan, metode baji digunakan untuk menghitung nilai SF secara manual berdasarkan keseimbangan gaya pada massa tanah yang berpotensi longsor. Berikut langkah- langkah dalam melakukan pemodelan lereng setelah perkuatan *soil nailing* dan *shotcrete*.

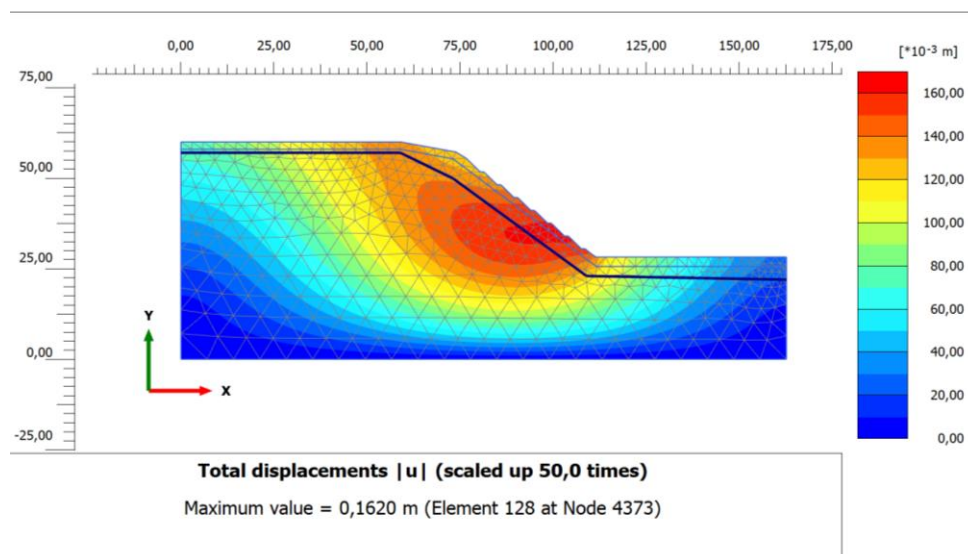
5.3.1.1 Modifikasi Kemiringan Lereng

Pemodelan perkuatan lereng menggunakan PLAXIS diawali dengan modifikasi geometri lereng. Modifikasi dilakukan melalui pengurangan sudut kemiringan lereng dengan penggalian dan pembuatan terasering. Sudut lereng yang awalnya 50° diubah menjadi 38° . Berikut Gambar 5.11 Yang menunjukkan geometri lereng setelah modifikasi kemiringan.

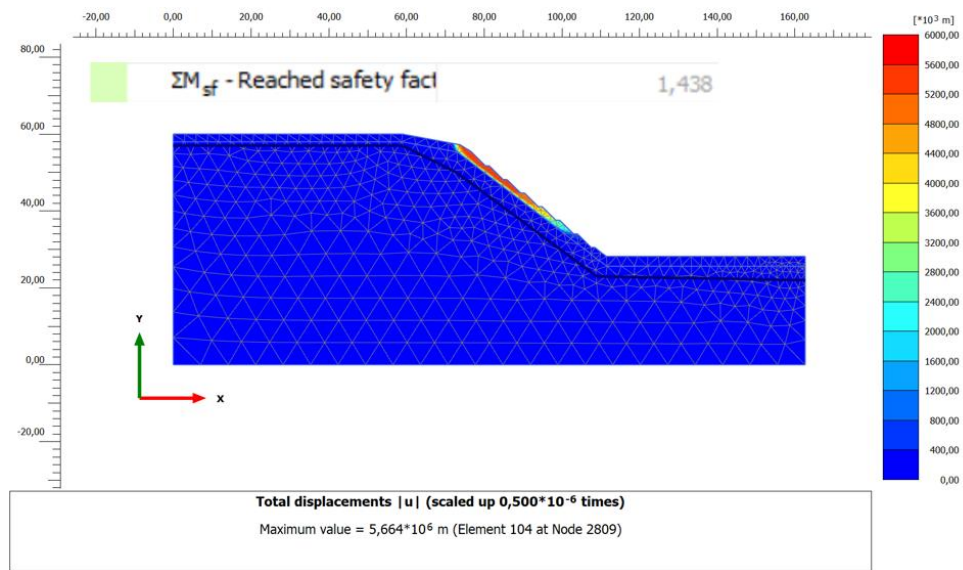


Gambar 5. 11 Geometri Lereng Setelah Modifikasi Kemiringan

Selanjutnya dilakukan analisis stabilitas lereng modifikasi menggunakan PLAXIS. Hasil analisis stabilitas lereng yang telah dimodifikasi tanpa pengaruh gempa ditunjukkan pada Gambar 5.12 dan Gambar 5.13 berikut.

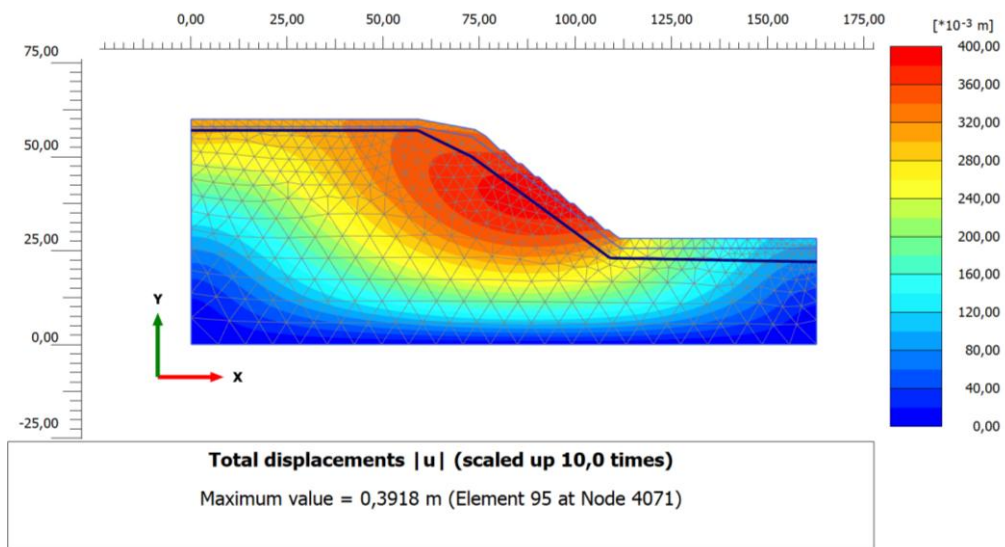


Gambar 5. 12 Hasil Analisis Distribusi *Total Displacement* Lereng Modifikasi Tanpa Gempa

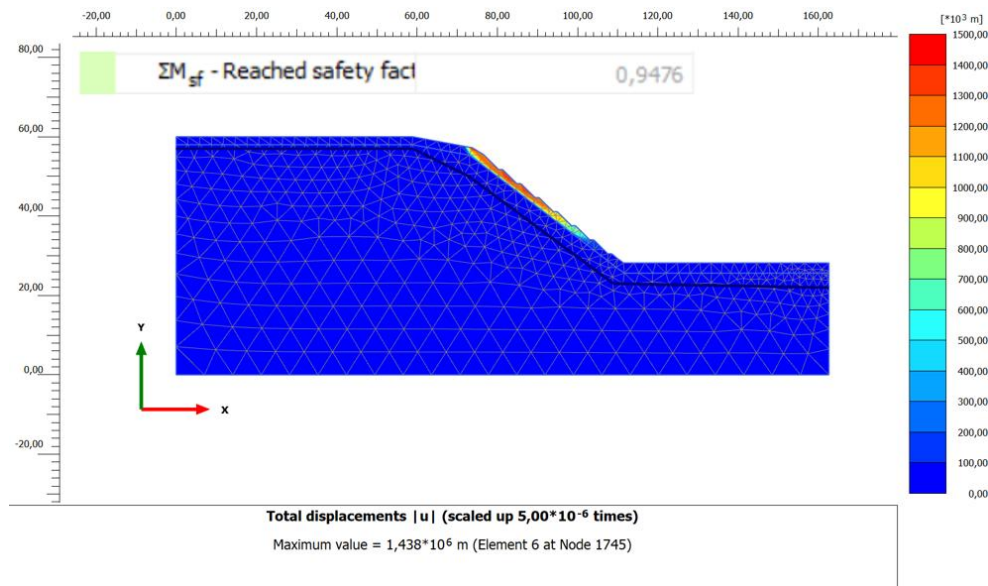


Gambar 5. 13 Hasil Analisis *Safety Factor* Lereng Modifikasi Tanpa Gempa

Hasil analisis stabilitas lereng yang telah dimodifikasi dengan pengaruh beban gempa ditunjukkan pada Gambar 5.14 dan 5.15 berikut.



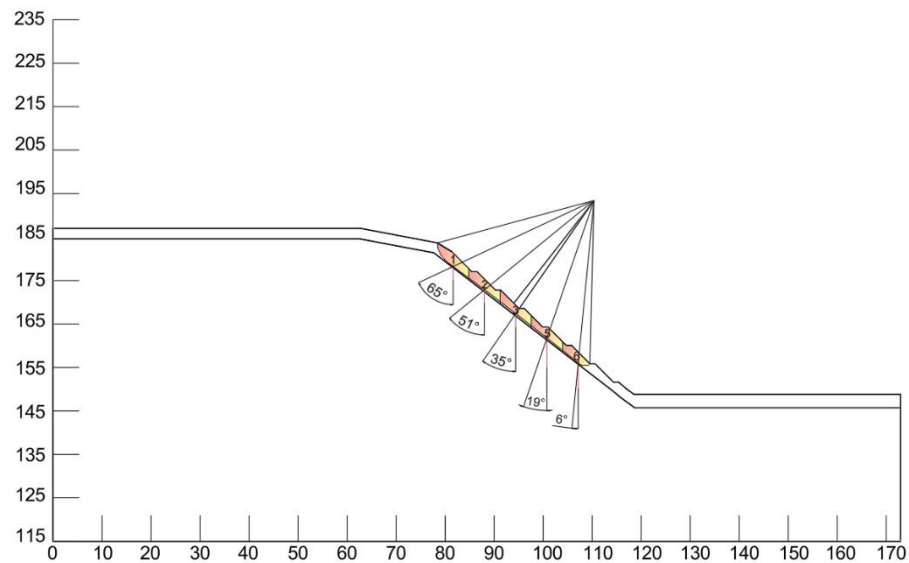
Gambar 5. 14 Hasil Analisis Distribusi *Total Displacement* Lereng Modifikasi pada Kondisi Gempa



Gambar 5. 15 Hasil Analisis *Safety Factor* Lereng Modifikasi pada Kondisi Gempa

Berdasarkan hasil analisis menggunakan PLAXIS tanpa pengaruh beban gempa, didapatkan nilai SF yaitu sebesar $1,438 < 1,5$ (tidak aman) dengan *total displacement* sebesar 0,162 m. Sedangkan untuk stabilitas lereng dengan pengaruh beban gempa didapatkan nilai SF sebesar $0,947 < 1,5$ (tidak aman) dengan *total displacement* sebesar 0,391 m. Hasil analisis menunjukkan bahwa modifikasi kemiringan lereng mampu meningkatkan stabilitas lereng, namun nilai SF yang didapatkan masih berada di bawah nilai SF yang disyaratkan. Oleh karena itu, diperlukan perkuatan tambahan berupa pemasangan *soil nailing* untuk meningkatkan nilai SF.

Sebelum dilakukan perencanaan pada *soil nailing*, analisis stabilitas lereng setelah modifikasi juga akan dihitung secara manual menggunakan metode *Fellenius*. Berikut bentuk bidang longsor serta pembagian pias yang digunakan dalam perhitungan ditunjukkan pada Gambar 5.16 berikut.



Gambar 5. 16 Pembagian Pias Lereng Modifikasi untuk Perhitungann Metode *Fellenius*

1. Perhitungan manual metode *Fellenius* pada pias ke - 1

a.) Menghitung berat irisan tanah (W)

$$\begin{aligned} W_1 &= \gamma \times A_1 \\ &= 15 \times 13,23 \\ &= 198,45 \text{ kN} \end{aligned}$$

b.) Menghitung radians (Rad)

$$\begin{aligned} \text{Rad}_1 &= \theta \times \frac{\pi}{180} \\ &= 65 \times \frac{\pi}{180} \\ &= 1,13 \end{aligned}$$

c.) Menghitung $\cos \alpha$

$$\begin{aligned} \cos \alpha_1 &= \cos (\text{Rad}_1) \\ &= \cos (1,05) \\ &= 0,50 \end{aligned}$$

d.) Menghitung $\sin \alpha$

$$\begin{aligned} \sin \alpha_1 &= \sin (\text{Rad}_1) \\ &= \sin (1,05) \end{aligned}$$

$$= 0,87$$

e.) Menghitung $W \times \cos \alpha$

$$\begin{aligned} W \times \cos \alpha &= 198,45 \times 0,50 \\ &= 99,225 \text{ kN} \end{aligned}$$

f.) Menghitung $W \times \sin \alpha$

$$\begin{aligned} W \times \sin \alpha &= 198,45 \times 0,87 \\ &= 171,86 \text{ kN} \end{aligned}$$

Setelah dilakukan perhitungan pada pias ke-1, perhitungan yang sama diterapkan pada seluruh pias. Rekapitulasi hasil perhitungan untuk setiap pias ditunjukkan pada Tabel 5.4 berikut.

Tabel 5. 4 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Lereng Modifikasi Tiap Pias dengan Metode *Fellenius*

No.	Lapisan Tanah	Luas Irisan (m ²)	Berat Tanah (kN)	Sudut Irisan (°)	Radian	Cos α	Sin α	W.Cos α (kN)	W.Sin α (kN)
1.	A1	13,23	198,45	65	1,13	0,42	0,91	83,87	179,86
2.	A1	11,64	174,6	51	0,89	0,63	0,78	109,88	135,69
3.	A1	11,6	174	35	0,61	0,82	0,57	142,53	99,80
4.	A1	11,2	168	19	0,33	0,95	0,33	158,85	54,70
5.	A1	8,99	134,85	6	0,10	0,99	0,10	134,11	14,10
Total								629,23	484,139

Berdasarkan hasil perhitungan parameter pada setiap pias, nilai faktor keamanan (SF) lereng dapat dihitung sebagai berikut.

Nilai a_i merupakan panjang bidang longsor yang didapatkan dari *software* AutoCAD yaitu sebesar 40,86 m, maka dapat dimasukkan kedalam persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \sum c \cdot a_i &= c \times a_i \\ &= 13 \times 38,5 \end{aligned}$$

$$= 500,5 \text{ kN}$$

$$\sum W \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi = 629,23 \times \tan 22^\circ$$

$$= 254,22 \text{ kN}$$

$$\sum W \sin \alpha = 484,13 \text{ kN}$$

$$SF = \frac{\sum (\sum c_{ai} + W \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi)}{\sum W \sin \alpha}$$

$$= \frac{\sum (500,5 + 254,22)}{484,13}$$

$$= 1,558 > 1,5 \text{ (aman)}$$

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode *fellenius*, didapatkan bahwa lereng setelah dilakukan modifikasi memiliki nilai SF sebesar $1,558 > 1,5$ (aman). Berdasarkan SNI 8460:2017, nilai tersebut sudah memenuhi syarat minimum nilai $SF \geq 1,5$. Namun, karena terdapat selisih antara perhitungan pada PLAXIS dan perhitungan manual *fellenius* maka tetap dibutuhkan pemasangan *soil nailing* untuk memastikan nilai SF lereng telah memenuhi syarat.

5.3.1.2 Pemasangan *Soil Nailing*

Diperlukan penentuan spesifikasi *soil nailing* yang akan digunakan dalam pemodelan dan perhitungan. Spesifikasi tersebut merupakan panjang *nail*, sudut kemiringan pemasangan, jarak antar *nail*, diameter lubang bor, serta parameter pendukung lainnya yang disesuaikan dengan kondisi lereng dan kebutuhan kekuatan. Sesuai persyaratan teknis yang terdapat dalam SNI 8460:2017, spesifikasi *soil nailing* yang digunakan dalam penelitian ini dapat ditentukan sebagai berikut.

a.) Menentukan Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas baja ulir yang digunakan sebagai tulangan *soil nailing* digunakan sebesar 200.000 MPa, sesuai dengan nilai yang umum digunakan pada baja tulangan struktural.

b.) Berat Volume

Berat volume besi yang digunakan yaitu sebesar 78,5 kN/m. Nilai tersebut merupakan nilai standar berdasarkan massa jenis baja sekitar 7,850 kg/m³ dan percepatan gravitasi 9,81 m/s² yang dibulatkan menjadi 10 m/s².

c.) Diameter *Nail*

Digunakan dua variasi diameter *nail*, yaitu diameter 25 mm dan diameter 29 mm dengan mutu baja *grade 75* ksi. Baja *Grade 75* ksi memiliki tegangan leleh minimum sekitar 75 ksi (± 520 MPa), sehingga mampu memberikan kapasitas tarik yang tinggi untuk menahan gaya tarik pada *nail* akibat tekanan tanah.

d.) Spasi

Spasi horizontal dan vertikal biasanya sama. Tipikal spasi nail adalah 1 m – 1,5m. Digunakan spasi antar *nail* yaitu sebesar 1 m. Spasi antar *nail* yang tidak terlalu besar, dapat meningkatkan nilai SF lebih tinggi.

e.) *Axial Skin Resistance*

Besarnya *axial skin resistance* pada *soil nail* dihitung berdasarkan nilai tahanan lekat satuan (*bond stress*) dan luas permukaan kontak antara *grout* dan tanah sepanjang panjang efektif *nail*. Perhitungan *axial Skin Resistance* pada *nail* dengan diameter 25 mm dilakukan menggunakan Persamaan berikut.

1.) Menghitung tahanan friksi pada tanah lapisan A₁

$$Q_s = \sum p \times \Delta L \times f$$

$$\sum p = \pi \times \text{diameter nail}$$

$$= \pi \times 0,025$$

$$= 0,078 \text{ m}$$

$$\Delta L = 2,44 \text{ m (panjang nail yang berada pada lapisan A}_1\text{)}$$

$$h = 1,18 \text{ m (tinggi tanah A}_1\text{ yang ditahan oleh nail)}$$

$$f_{A1} = K \times \sigma_v \times \tan \phi$$

$$\begin{aligned}
&= (1 \text{ ko}) \times (\gamma \text{ pasir} \times \frac{1}{2} h) \times (\tan 0,9 \alpha) \\
&= (1 \times (1 - \sin \alpha) \times (13 \times \frac{1}{2} 1,18) \times (\tan 22 \times 0,9) \\
&= (1 \times (1 - \sin 22) \times (13 \times \frac{1}{2} 1,18) \times (\tan 22 \times 0,9) \\
&= 1,992 \text{ kN/m}^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{S \text{ A1}} &= \sum p \times \Delta L \times f \\
&= 0,078 \times 2,44 \times 1,992 \\
&= 0,379 \text{ kN}
\end{aligned}$$

2.) Menghitung tahanan friksi pada tanah lapisan A₂

$$\begin{aligned}
Q_{S \text{ A2}} &= \sum p \times \Delta L \times f \\
\Sigma p &= \pi \times \text{diameter } \textit{nail} \\
&= \pi \times 0,025 \\
&= 0,078 \text{ m} \\
\Delta L &= 3,56 \text{ m (panjang } \textit{nail} \text{ yang berada pada lapisan A}_2\text{)} \\
f_{\text{A2}} &= K \times \sigma_v \times \tan \varphi \\
&= (1 \text{ ko}) \times (\gamma \text{ pasir} \times \frac{1}{2} h) \times (\tan 0,9 \alpha) \\
&= (1 \times (1 - \sin 22) \times (22,24 \times \frac{1}{2} \times 2,52) \times (\tan 22 \times 0,9) \\
&= 6,309 \text{ kN/m}^2 \\
Q_{S \text{ A2}} &= \sum p \times \Delta L \times f \\
&= 0,078 \times 3,56 \times 6,309 \\
&= 1,764 \text{ kN}
\end{aligned}$$

3.) Menghitung tahanan friksi total

$$\begin{aligned}
 Q_{S \text{ total}} &= Q_{S \text{ A1}} + Q_{S \text{ A2}} \\
 &= 0,379 + 1,764 \\
 &= 2,143 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Setelah dilakukan perhitungan *axial skin resistance* pada *nail* diameter 25 mm, dilakukan juga perhitungan dengan cara yang sama pada *nail* diameter 29 mm. Berikut Tabel 5.5 yang menunjukkan rekapitulasi hasil perhitungan *axial skin resistance* pada *nail* diameter 25 mm dan *nail* diameter 29 mm.

Tabel 5. 5 Rekapitulasi Hasil Perhitungan *Axial Skin Resistance*

Parameter	Satuan	Diameter <i>Nail</i>	
		25 mm	29 mm
Σp	m	0,078	0,091
f_{A1}	kN/m ²	1,992	1,992
f_{A2}	kN/m ²	6,309	6,309
$Q_{S \text{ A1}}$	kN	0,379	0,442
$Q_{S \text{ A2}}$	kN	1,764	2,143
$Q_{S \text{ total}}$	kN	2,143	2,585

f.) Panjang *Nail*

Panjang *nail bar* tipikal yaitu sebesar 0,6 – 1,2 H. Namun, pada lereng yang ditinjau, tanah keras didapatkan mulai pada kedalaman 2 m, sehingga *nail bar* yang digunakan sepanjang 6 m sudah cukup untuk menembus bidang longsor dan memberikan panjang penjangkaran yang memadai pada tanah yang stabil.

g.) Kemiringan *Nail*

Sesuai persyaratan teknis yang terdapat dalam SNI 8460:2017 kemiringan *nail bar* tipikal berkisar antara 10° sampai 20° dibawah terhadap bidang horizontal. Maka dalam penelitian ini digunakan kemiringan *nail* sebesar 15°

h.) Kemiringan Dinding

Berdasarkan SNI 8460:2017, kemiringan *nail* tipikal berkisar antara 80°-90° terhadap bidang horizontal, namun pada penelitian ini, digunakan kemiringan dinding 45° terhadap bidang horizontal agar lebih optimal dan tidak membutuhkan banyak pekerjaan galian.

i.) Diameter Lubang Bor

Berdasarkan SNI 8460:2017, diameter lubang bor tipikal yang digunakan pada instalasi “*drilled and grout soil nailing*” yaitu sekitar 0,1 m – 0,2 m. Pada penelitian ini digunakan lubang bor sebesar 0,2 m.

j.) *Shotcrete*

Berdasarkan persyaratan material komponen dinding *soil nailing* pada SNI 8460:2017, Ketebalan dinding *shotcrete* tipikal berkisar antara 75 mm – 100 mm. *Shotcrete* merupakan perkuatan sementara dan melindungi permukaan galian dari erosi, dan juga mengisi rongga-rongga yang terbentuk akibat keretakan tanah.

Berikut Tabel 5.6 yang menunjukkan rekapitulasi spesifikasi *soil nailing* yang telah ditentukan.

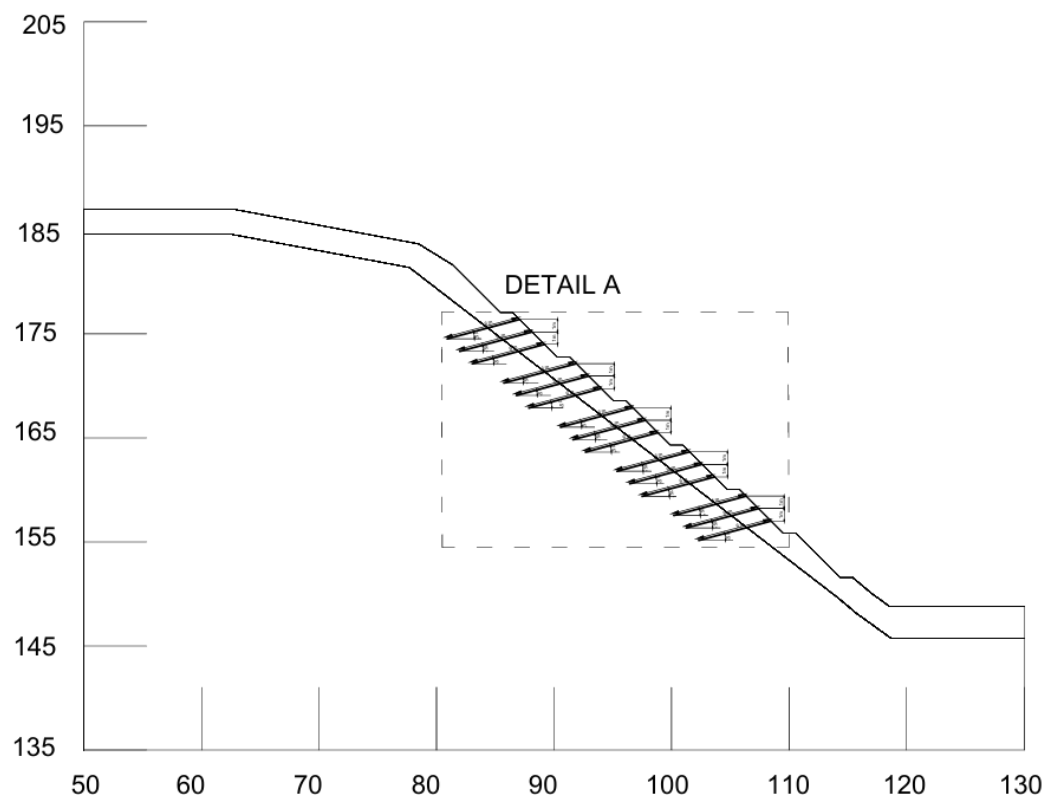
Tabel 5. 6 Rekapitulasi Spesifikasi *Soil Nailing*

No	Spesifikasi	Nilai	Satuan
1.	Modulus elastisitas	20×10^7	kN/m ²
2.	Berat volume	78,5	kN/m ³
3.	Diameter <i>nail</i>	0,02	m
4.	Spasi	1	m
5.	<i>Axial skin resistance</i>		
	Nail D25	2,143	kN/m
	Nail D29	2,585	kN/m
6.	Panjang nail	6	m

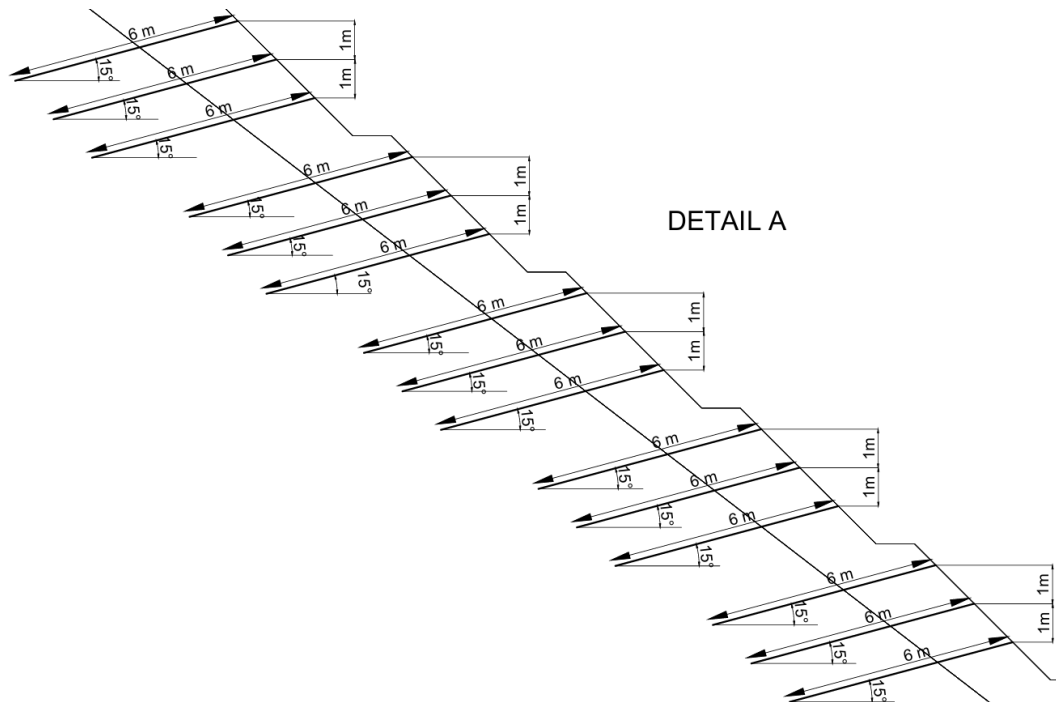
Lanjutan Tabel 5.6 Rekapitulasi Spesifikasi *Soil Nailing*

No	Spesifikasi	Nilai	Satuan
7.	Kemiringan <i>nail</i>	15	°
8.	Kemiringan dinding	45	°
9.	Diameter lubang bor	0,2	m
10.	<i>Shotcrete</i>	75	mm

Setelah menentukan spesifikasi *soil nailing*, berikut Gambar 5.17 yang menunjukkan profil lereng setelah diberi *soil nailing* dengan potongan detail A yang ditunjukkan pada Gambar 5.18 sebagai berikut.



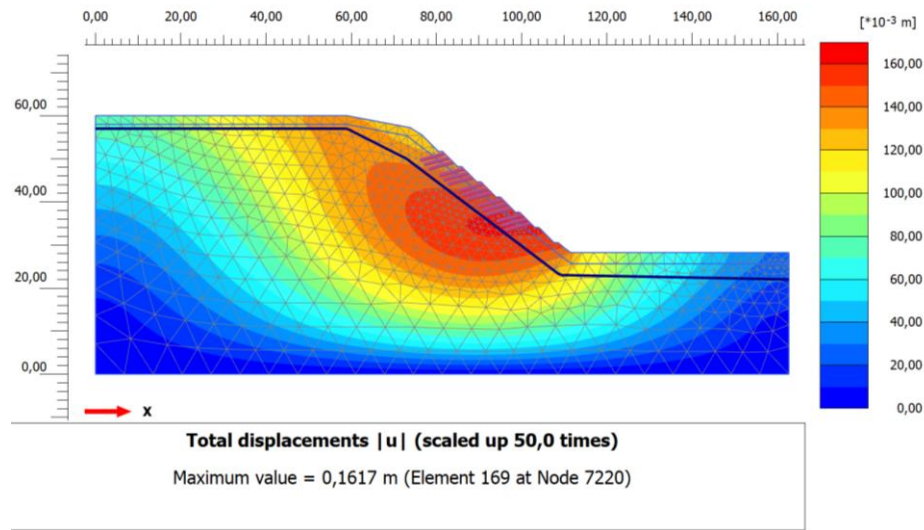
Gambar 5. 17 Profil Lereng Setelah *Soil Nailing*



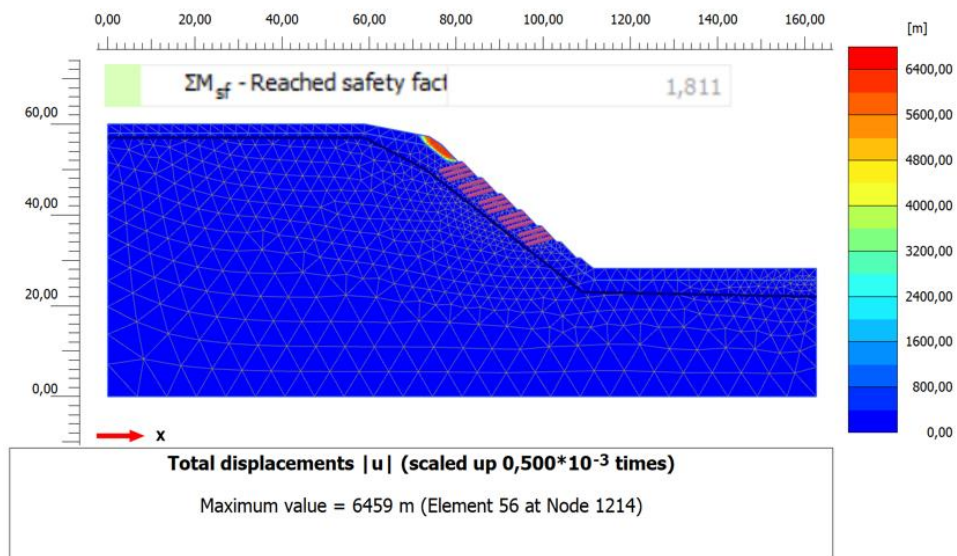
Gambar 5. 18 Detail A Profil Lereng Setelah *Soil Nailing*

5.3.1.3 Hasil *Output* Pemodelan Lereng dengan Perkuatan dengan PLAXIS

Setelah melakukan modifikasi terhadap kemiringan lereng dan pemasangan *soil nailing*. Muka air tanah diasumsikan berada pada elevasi yang lebih rendah karena pemasangan *soil nailing* umumnya disertai dengan sistem drainase, seperti *weep hole* atau *subdrain* sehingga muka air tanah dapat menurun. Berikut hasil *output* dari pemodelan lereng setelah diberi perkuatan tanpa pengaruh beban gempa ditunjukkan oleh Gambar 5.19 dan Gambar 5.20.



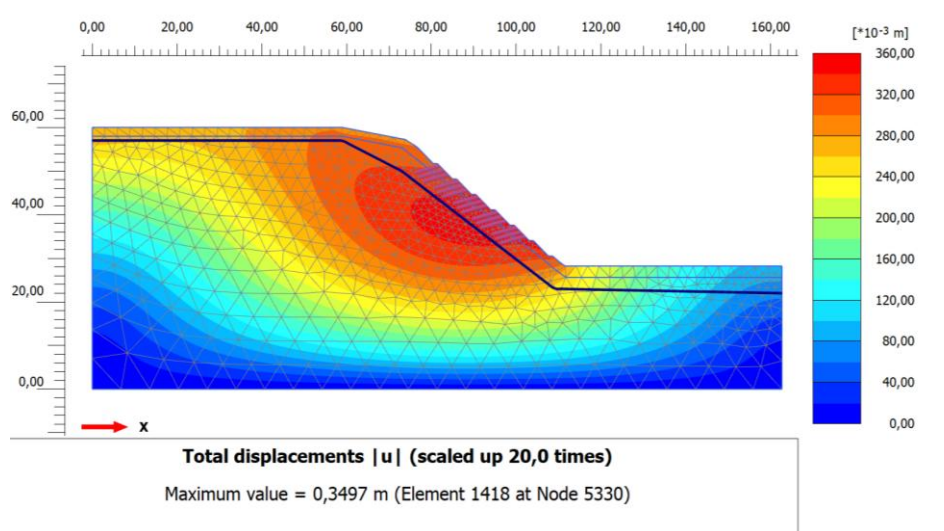
Gambar 5. 19 Hasil Analisis Distribusi *Total Displacement* Lereng *Soil Nailing* Tanpa Gempa



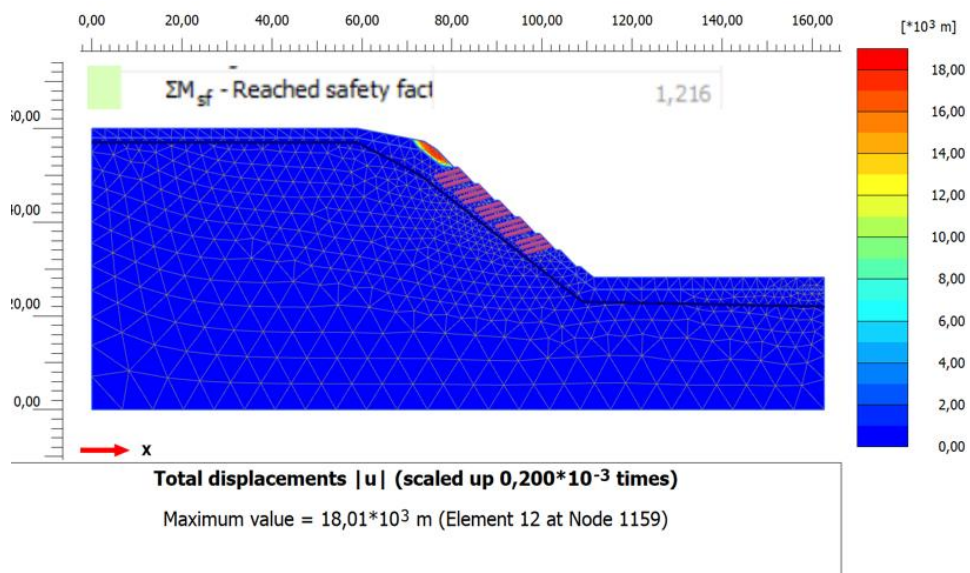
Gambar 5. 20 Hasil Analisis *Safety Factor* Lereng *Soil Nailing* Tanpa Gempa

Berdasarkan hasil analisis stabilitas lereng setelah diberi perkuatan menggunakan *software* PLAXIS, diperoleh nilai SF sebesar 1,811 dengan *total displacement* sebesar 0,161 m. Nilai ini menunjukkan bahwa perkuatan yang direncanakan mampu meningkatkan stabilitas lereng dan sudah memenuhi kriteria minimum $SF > 1,5$ untuk kondisi statik.

Selanjutnya dilakukan analisis stabilitas lereng setelah perkuatan dengan pengaruh beban gempa. Berikut Gambar 5.21 dan Gambar 5.22 yang menunjukkan hasil *output* dari pemodelan lereng setelah diberi beban gempa.



Gambar 5. 21 Hasil Analisis Distribusi *Total Displacement* Lereng *Soil Nailing* pada Kondisi Gempa



Gambar 5. 22 Hasil Analisis *Safety Factor* Lereng *Soil Nailing* pada Kondisi Gempa

Berdasarkan hasil analisis stabilitas lereng setelah diberi perkuatan menggunakan *software* PLAXIS, diperoleh nilai SF sebesar 1,216 dengan *total*

displacement sebesar 0,349 m. Nilai ini menunjukkan bahwa perkuatan yang telah direncanakan sudah memenuhi kriteria minimum $SF > 1,1$ untuk kondisi gempa.

5.3.2 Perhitungan Manual dengan Perkuatan dengan Metode Baji (*Wedge*)

Perhitungan manual dengan metode baji (*wedge*) dilakukan dengan menghitung keseimbangan antara gaya penggerak dan gaya penahan pada massa tanah. Kontribusi gaya tarik dari *nail* diperhitungkan sebagai gaya penahan tambahan yang meningkatkan nilai SF pada lereng. Digunakan dua variasi diameter *nail*, yaitu diameter 25 mm dan diameter 29 mm.

5.3.2.1 Analisis Stabilitas Lereng Terhadap Keruntuhan Global Lereng (*Global Stability Failure*)

1. Menghitung Gaya Geser dan Gaya Tarik Ijin Global

Perhitungan gaya geser dan gaya tarik izin global dilakukan untuk mengetahui kapasitas izin pada *soil nailing* dalam menahan gaya-gaya yang bekerja pada lereng. Perhitungan gaya geser dan gaya tarik izin global dengan menggunakan *nail* diameter 25 mm dilakukan menggunakan persamaan berikut.

A. Daya dukung tarik *nail bar* (R_n)

$$\begin{aligned} R_n &= F_y \times A_s \text{ tulangan} \\ &= 520 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2 \\ &= 255254,4 \text{ N} \\ &= 255,524 \text{ kN} \end{aligned}$$

B. Daya dukung geser *nail bar* (R_c)

$$\begin{aligned} R_c &= 0,5 \times R_n \\ &= 0,5 \times 255254,4 \\ &= 127627,2 \text{ N} \\ &= 127,627 \text{ kN} \end{aligned}$$

C. Gaya geser izin tulangan (V_n)

$$\begin{aligned}
 V_n &= \frac{R_n}{2\sqrt{1+4\tan^2(90-(\alpha+i))}} \\
 &= \frac{255254,4}{2\sqrt{1+4\tan^2(90-(34,2+15))}} \\
 &= 63971,34 \text{ N} \\
 &= 639,71 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

D. Gaya tarik izin *nail bar* (T)

$$\begin{aligned}
 T &= 4 \times V \times \tan(90-(\alpha+i)) \\
 &= 4 \times 63971,34 \times \tan(90-(34,2+15)) \\
 &= 220874,34 \text{ N} \\
 &= 220,874 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

E. Gaya geser izin tanah

Perhitungan gaya geser izin tanah memerlukan nilai koefisien c_1 , c_2 , dan c_3 sebagai parameter utama. Ketiga koefisien tersebut ditentukan melalui grafik korelasi yang tertera pada Gambar 3.10, grafik tersebut menghubungkan nilai sudut geser dalam tanah (ϕ) dengan masing-masing koefisien. Hasil pembacaan grafik ditunjukkan pada Tabel 5.7 berikut.

Tabel 5. 7 Hasil Pembacaan Grafik C1, C2, dan C3 Tiap Lapis Tanah

Lapis	C_1	C_2	C_3	ϕ
A1	0,9	1,9	12	22
A2	1,8	2,7	25	30

1.) Menentukan gaya tarik ultimit pada *nail* (P_u)

$$\begin{aligned}
 \text{a.) } P_{u1} &= (C_1 \times Z) + (C_2 \times D) \times \gamma \times Z \\
 &= (0,9 \times 31,8) + (1,9 \times 0,025) \times 15 \times 31,8
 \end{aligned}$$

$$= 13674,3975 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \text{b.) } P_{u2} &= C_3 \times D \times \gamma \times Z \\ &= 12 \times 0,025 \times 15 \times 31,8 \\ &= 143,1 \text{ kN} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan nilai P_{u1} dan P_{u2} , nilai yang digunakan adalah nilai terkecil di antara keduanya. Sehingga diperoleh nilai $P = 143,1 \text{ kN}$.

$$\begin{aligned} P_p &= \frac{P}{2} \\ &= \frac{143,1}{2} \\ &= 71,55 \text{ kN} \end{aligned}$$

Berdasarkan Tabel 5.7, diketahui bahwa nilai modulus elastisitas baja yaitu sebesar $20 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$. Maka, berikut perhitungan untuk menghitung momen inersia *nail bar*.

$$\begin{aligned} I &= \frac{\pi r^4}{64} \\ &= \frac{\pi \times 0,025^4}{64} \\ &= 1,917 \times 10^{-8} \text{ m}^4 \end{aligned}$$

Berdasarkan Tabel 3.5 didapatkan nilai modulus reaksi lateral tanah (K_s) yaitu sebesar 36000 kN/m^3 . Selanjutnya, dapat dihitung nilai panjang penyaluran (L_o) sebagai berikut.

$$\begin{aligned} L_o &= \sqrt[4]{\frac{4EI}{K_s D}} \\ &= \sqrt[4]{\frac{2000000000 \times 1,917 \times 10^{-8}}{36000 \times 0,025}} \\ &= 0,361 \text{ m} \end{aligned}$$

Selanjutnya, perhitungan gaya geser izin pada tanah dapat dilakukan menggunakan Persamaan 3.8 berikut.

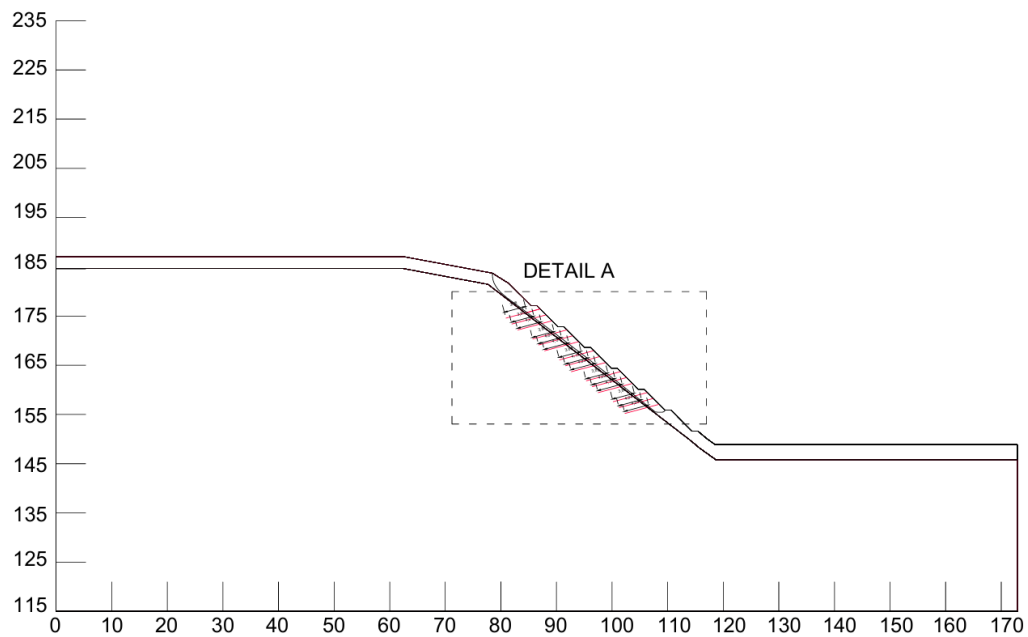
$$\begin{aligned} V_s &= P_p \times \frac{D}{2} L_o \\ &= 71,55 \times \frac{0,025}{2} \times 0,361 \\ &= 0,323 \text{ kN} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai $V_s < V_n$, sehingga gaya geser izin global (V_{max}) ditentukan sebesar 0,323 kN. Selanjutnya, nilai gaya tarik izin pada *nail* dikoreksi berdasarkan persamaan berikut.

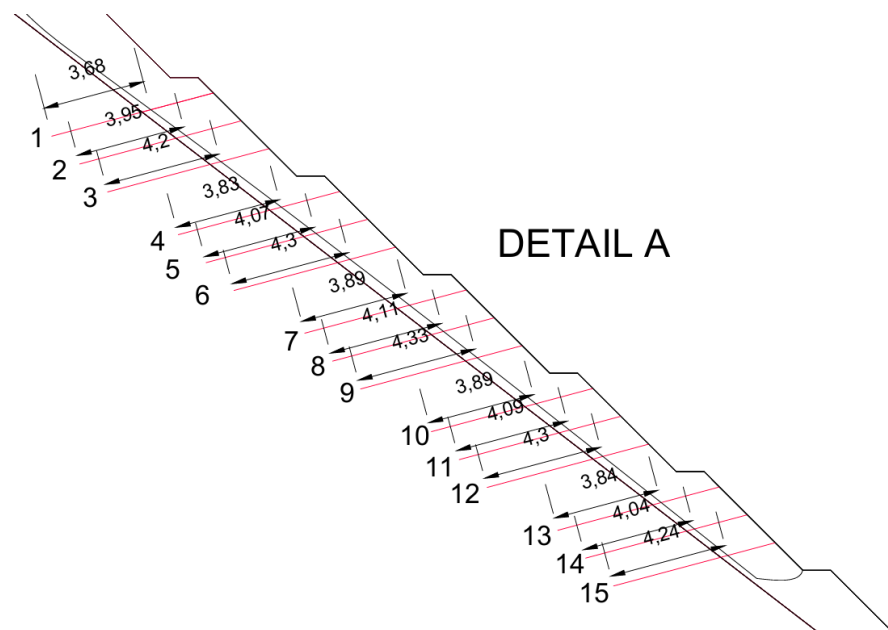
$$\begin{aligned} \frac{V_{max}^2}{R_c^2} + \frac{T_{max}^2}{R_n^2} &= 1 \\ \frac{0,323^2}{127627,2^2} + \frac{T_{max}^2}{255254,4^2} &= 1 \\ T_{max}^2 &= 1 - \left(\frac{0,323^2}{127627,2^2} \right) \times 255254,4^2 \\ T_{max} &= \sqrt{1 - \left(\frac{0,323^2}{127627,2^2} \right) \times 255254,4^2} \\ &= 255254,4 \text{ N} \\ &= 255,254 \text{ kN} > 220,874 \text{ kN (memenuhi)} \end{aligned}$$

2.) Menentukan panjang *nail bar* di belakang bidang longsor (L_e)

Penentuan nilai L_e dapat dilakukan dengan bantuan *software* AutoCAD. Hasil pemodelan untuk menghitung panjang *nail* di belakang bidang longsor ditunjukkan pada Gambar 5.23 Dengan potongan detail A ditunjukkan pada Gambar 5.24. Dimensi dari gambar yang terlampir dinyatakan dalam satuan meter.



Gambar 5. 23 Penentuan Panjang Le



Gambar 5. 24 Detail A Penentuan Panjang Le

Perhitungan pada *nail* pertama dilakukan menggunakan panjang efektif (L_e) sebesar 3,68 m. Analisis diawali dengan asumsi faktor keamanan (SF) sebesar 2,63 dan dilakukan secara *trial and error* hingga diperoleh nilai faktor keamanan asumsi

dan nilai faktor keamanan akhir memiliki nilai yang sama. Nilai tersebut harus telah memenuhi persyaratan $SF < 1,5$.

Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk gaya tarik ijin *nail* pada masing-masing *nail* (T_i). Perhitungan nilai T_i ditunjukkan pada Persamaan berikut.

$$F_{\max} = 140 \text{ (didapatkan dari Tabel 3.6)}$$

$$\begin{aligned} T_i &= \frac{\pi \times D \times L_e \times f_{\max}}{SF} \\ &= \frac{\pi \times 0,025 \times 3,68 \times 140}{2,34} \\ &= 15,38 \text{ kN} \end{aligned}$$

Setelah dilakukan perhitungan pada *nail* ke-1, perhitungan yang sama diterapkan pada setiap *nail*. Rekapitulasi hasil perhitungan untuk setiap *nail* dengan diameter 25 mm ditunjukkan pada Tabel 5.8 Berikut

Tabel 5. 8 Rekapitulasi Hasil Perhitungan L_e , T_i dan V_s pada *Nail* Diameter 25 mm

No. <i>Nail</i>	L_e (m)	T_i (kN)	V_s
1	3,68	15,38	0,323
2	3,95	16,51	0,323
3	4,2	17,56	0,323
4	3,83	16,01	0,323
5	4,07	17,01	0,323
6	4,3	17,97	0,323
7	3,89	16,26	0,323
8	4,11	17,18	0,323
9	4,33	18,10	0,323
10	3,89	16,26	0,323
11	4,09	17,10	0,323
12	4,3	17,97	0,323
13	3,84	16,05	0,323

Lanjutan Tabel 5. 8 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Le, Ti dan Vs pada *Nail* Diameter 25 mm

No. <i>Nail</i>	Le (m)	Ti (kN)	Vs
14	4,04	16,89	0,323
15	4,24	17,72	0,323
Total		253,98	4,847

Selanjutnya dilakukan perhitungan yang sama pada *nail* dengan diameter 29 mm. Rekapitulasi hasil perhitungan untuk setiap *nail* dengan diameter 29 mm ditunjukkan pada Tabel 5.9 berikut.

Tabel 5. 9 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Le, Ti, dan Vs pada *Nail* Diameter 29 mm

No. <i>Nail</i>	Le (m)	Ti (kN)	Vs
1	3,68	16,90	0,486
2	3,95	18,14	0,486
3	4,2	19,28	0,486
4	3,83	17,59	0,486
5	4,07	18,69	0,486
6	4,3	19,74	0,486
7	3,89	17,86	0,486
8	4,11	18,87	0,486
9	4,33	19,88	0,486
10	3,89	17,86	0,486
11	4,09	18,78	0,486
12	4,3	19,74	0,486
13	3,84	17,63	0,486
14	4,04	18,55	0,486
15	4,24	19,47	0,486
Total		278.97	7,29

a.) Menghitung gaya tarik total *nail*

$$\begin{aligned}\Sigma T_i &= \frac{T_1+T_2+\dots+T_n}{Sh} \\ &= \frac{203,94}{1} \\ &= 203.98 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

Nilai Sh merupakan nilai jarak horizontal tiap *nail* yaitu sebesar 1 m.

b.) Menghitung gaya geser izin total *nail*

$$\begin{aligned}\Sigma V_i &= \frac{V_1+V_2+\dots+V_n}{Sh} \\ &= \frac{4,847}{1} \\ &= 4,847 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

c.) Menghitung nilai faktor keamanan terhadap keruntuhan global

Untuk nilai a ditentukan berdasarkan sudut irisan keruntuhan lereng pada area yang diperkuat dengan *soil nailing*. Oleh karena itu, komponen-komponen dalam perhitungan faktor keamanan (SF), perlu disesuaikan dengan nilai a yang digunakan, berikut rekapitulasi komponen perhitungan stabilitas global pada *nail* diameter 25 mm dan *nail* diameter 29 mm ditunjukkan pada Tabel 5.10 Dan Tabel 5.11 berikut.

Tabel 5. 10 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Stabilitas Global pada *Nail* Diameter 25 mm

No. <i>Nail</i>	Le (m)	Ti (kN)	α	Ti sin $\alpha+i$	-vi cos α + I	sudut geser ($^{\circ}$)	$((Ti \sin \alpha + i) + (vi \cos \alpha + i)) \tan \phi$	Ti cos $\alpha + i$
1	3,68	15,38	65	15,15	-0,06	22	6,10	-2,67
2	3,95	16,51	51	15,08	-0,13	22	6,04	-6,72
3	4,2	17,56	51	16,04	-0,13	22	6,43	-7,14
4	3,83	16,01	51	14,63	-0,13	22	5,86	-6,51
5	4,07	17,01	51	15,54	-0,13	22	6,23	-6,92
6	4,3	17,97	35	13,77	-0,21	22	5,48	-11,55
7	3,89	16,26	35	12,46	-0,21	22	4,95	-10,45
8	4,11	17,18	35	13,16	-0,21	22	5,23	-11,04
9	4,33	18,10	35	13,87	-0,21	22	5,52	-11,63
10	3,89	16,26	19	9,09	-0,27	22	3,57	-13,48
11	4,09	17,10	19	9,56	-0,27	22	3,75	-14,17
12	4,3	17,97	19	10,05	-0,27	22	3,95	-14,90
13	3,84	16,05	19	8,98	-0,27	22	3,52	-13,31
14	4,04	16,89	6	6,05	-0,30	22	2,32	-15,77
15	4,24	17,72	6	6,35	-0,30	22	2,44	-16,55
Total				179,77	3,09		71,38	-162,82

Tabel 5. 11 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Stabilitas Global pada *Nail* Diameter 29 mm

No. <i>Nail</i>	Le (m)	Ti (kN)	α	Ti sin $\alpha+i$	-vi cos α + I	sudut geser (°)	$((Ti \sin \alpha + i) + (vi \cos \alpha + i)) \tan \phi$	Ti cos $\alpha + i$
1	3,68	12,35	65	16,64	-0,08	22	6,69	-2,93
2	3,95	13,26	51	16,57	-0,20	22	6,61	-7,38
3	4,2	14,10	51	17,62	-0,20	22	7,04	-7,84
4	3,83	12,86	51	16,06	-0,20	22	6,41	-7,15
5	4,07	13,66	51	17,07	-0,20	22	6,82	-7,60
6	4,3	14,43	35	15,12	-0,31	22	5,98	-12,69
7	3,89	13,06	35	13,68	-0,31	22	5,40	-11,48
8	4,11	13,79	35	14,46	-0,31	22	5,71	-12,13
9	4,33	14,53	35	15,23	-0,31	22	6,03	-12,78
10	3,89	13,06	19	9,99	-0,40	22	3,87	-14,81
11	4,09	13,73	19	10,50	-0,40	22	4,08	-15,57
12	4,3	14,43	19	11,04	-0,40	22	4,30	-16,37
13	3,84	12,89	19	9,86	-0,40	22	3,82	-14,62
14	4,04	13,56	6	6,65	-0,45	22	2,50	-17,32
15	4,24	14,23	6	6,98	-0,45	22	2,64	-18,17
Total				197,46	4,64		77,90	-178,84

Berdasarkan hasil rekapitulasi perhitungan pada Tabel 5.10 dan Tabel 5.11, Kemudian dilakukan perhitungan komponen-komponen lain untuk menghitung nilai SF terhadap keruntuhan global. Berikut perhitungan nilai SF untuk *nail* diameter 25 mm

$$\begin{aligned}
 c &= 13 \text{ (nilai kohesi untuk tanah A1)} \\
 lf &= 38,5 \text{ m (panjang bidang longsor dari AutoCAD)} \\
 W.\cos \alpha.\tan \alpha &= 260,43 \text{ kN} \\
 W.\sin \alpha. &= 476,14 \text{ kN} \\
 SF &= \frac{c.Lf+W\cos\alpha.\tan\alpha+(\Sigma T\sin(\alpha+i)-\Sigma V\cos(\alpha+i))\tan\phi}{w.\sin\alpha-\Sigma T\cos(\alpha+i)-\Sigma V\cos(\alpha+i)} \\
 &= \frac{500,5+260,43+(179,77-3,08)\times \tan 22^\circ}{476,145-162,81-3,08} \\
 &= 2,34 > 1,5 \text{ (Aman)}
 \end{aligned}$$

Perhitungan yang sama dilakukan untuk menghitung nilai SF pada *nail* diameter 29 mm. Berikut perhitungan nilai SF untuk *nail* diameter 29 mm.

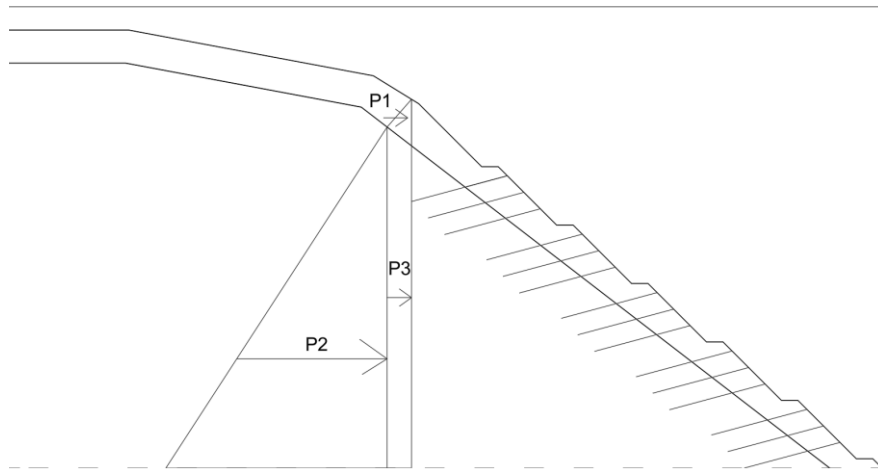
$$\begin{aligned}
 c &= 13 \text{ (nilai kohesi untuk tanah A1)} \\
 lf &= 38,5 \text{ m (panjang bidang longsor dari AutoCAD)} \\
 W.\cos \alpha.\tan \alpha &= 260,43 \text{ kN} \\
 W.\sin \alpha. &= 476,14 \text{ kN} \\
 SF &= \frac{c.Lf+W\cos\alpha.\tan\alpha+(\Sigma T\sin(\alpha+i)-\Sigma V\cos(\alpha+i))\tan\phi}{w.\sin\alpha-\Sigma T\cos(\alpha+i)-\Sigma V\cos(\alpha+i)} \\
 &= \frac{500,5+260,43+(197,463-4,64)\times \tan 22^\circ}{476,145-162,81-4,64} \\
 &= 2,77 > 1,5 \text{ (Aman)}
 \end{aligned}$$

Hasil analisis stabilitas terhadap keruntuhan global menunjukkan nilai faktor keamanan (SF) pada *nail* diameter 25 mm sebesar $2,34 > 1,5$ (aman) sedangkan nilai SF pada *nail* diameter 29 mm sebesar $2,77 > 1,5$ (aman). Nilai tersebut telah

memenuhi kriteria keamanan karena lebih besar dari nilai minimum yang disyaratkan $SF > 1,5$. Sehingga, dengan menggunakan kedua variasi diameter *nail* 25 mm dan 29 mm lereng dinyatakan stabil dan aman terhadap keruntuhan global.

5.3.2.2 Analisis Stabilitas Lereng Terhadap Gaya Geser

Pada analisis ini, stabilitas lereng dinilai berdasarkan perbandingan antara gaya penahan dan gaya penggerak yang bekerja pada bidang longsor potensial. Berikut merupakan Gambar 5.25 Yang menunjukkan diagram tekanan tanah lateral pada lereng.



Gambar 5. 25 Diagram Tekanan Tanah Lateral

Selanjutnya, perhitungan stabilitas lereng terhadap gaya geser yang dilakukan untuk mendapatkan nilai SF lereng terhadap gaya geser.

1.) Koefisien Tekanan Tanah Lateral

$$\begin{aligned} \text{a.) } K_{a \ A1} &= \tan^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \\ &= \tan^2\left(45 - \frac{22}{2}\right) \\ &= 0,454 \end{aligned}$$

$$\text{b.) } K_{a \ A2} = \tan^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)$$

$$= \tan^2(45 - \frac{30}{2})$$

$$= 0,333$$

2.) Pengaruh Kohesi

$$\begin{aligned} \text{a.) } C_{A1} &= -2 \times c \sqrt{Ka_1} \times h \\ &= -2 \times 13 \times \sqrt{0,454} \times 3,07 \\ &= -53,83 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b.) } C_{A2} &= -2 \times c \sqrt{Ka_2} \times h \\ &= -2 \times 200 \times \sqrt{0,333} \times 22,51 \\ &= -779,76 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

3.) Tekanan Aktif di Belakang *Soil Nailing*

a.) Lapisan A1

$$\begin{aligned} \text{1) Tegangan tanah} &= 0,5 \times \gamma \times H_{A1}^2 \times Ka_{A1} \\ &= 0,5 \times 15 \times 3,07^2 \times 0,454 \\ &= 32,159 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

b.) Lapisan A2

$$\begin{aligned} \text{1) Tegangan tanah} &= 0,5 \times \gamma \times H_{A2}^2 \times Ka_{A2} \\ &= 0,5 \times 22,24 \times 22,51^2 \times 0,333 \\ &= 1878,16 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{2) Tegangan akibat tanah atas} &= H_{A1} \times \gamma_{A1} \times Ka_{A2} \times H_{A2} \\ &= 3,07 \times 15 \times 0,333 \times 22,51 \\ &= 345,52 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Setelah memperhitungkan tekanan tanah aktif (P_a) dan pengaruh adanya kohesi tanah, diperoleh nilai P_a total sebagai berikut.

$$\begin{aligned} P_a \text{ total} &= C_{A1} + C_{A2} + P_{aA1} + P_{aA2} \\ &= (-53,83) + (-779,76) + 32,159 + (1878,16 + 345,52) \\ &= 1422,24 \end{aligned}$$

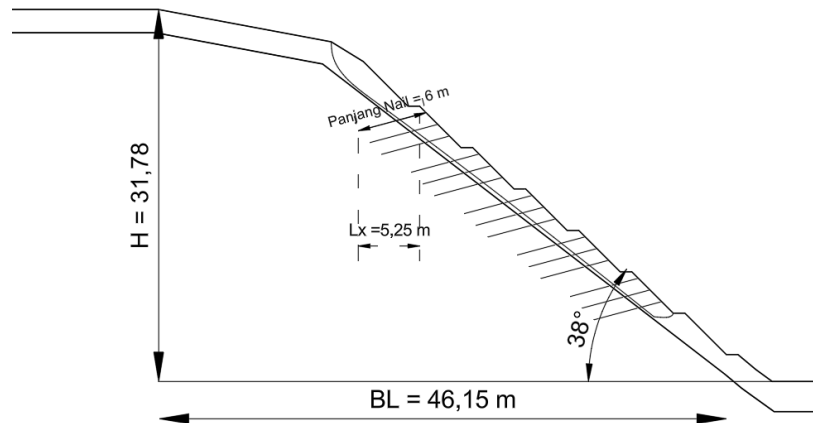
4.) Menghitung Nilai Faktor Keamanan Terhadap Gaya Geser

$$\begin{aligned} L_x &= \text{panjang } nail \times \cos i - \tan \alpha \\ &= 6 \times \cos 15^\circ - \tan 34,2^\circ \\ &= 5,45 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} BL &= X_i + L_x \\ &= \left(\cos \beta \times \frac{H \text{ lereng}}{\sin \beta} \right) + L_x \\ &= \left(\cos 38^\circ \times \frac{31,8}{\sin 38^\circ} \right) + 5,45 \\ &= 46,15 \text{ m} \end{aligned}$$

$$W = 850 \text{ kN (jumlah berat tanah seluruh pias pada Tabel 5.4)}$$

Berikut Gambar 5.26 yang menunjukkan dimensi lereng pada stabilitas lereng terhadap gaya geser.



Gambar 5. 26 Dimensi Lereng pada Stabilitas Terhadap Gaya Geset

Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk memperoleh besarnya pengaruh gaya kohesi terhadap tahanan geser pada bidang longsor. Diperoleh nilai tersebut sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 CB.BL &= (C_{A1} \times BL) + (C_{A2} \times BL) \\
 &= (13 \times 46,15) + (200 \times 46,15) \\
 &= 1984,79
 \end{aligned}$$

Setelah dilakukan perhitungan diatas maka, selanjutnya menghitung nilai faktor keamanan (SF) dengan digunakan nilai $Q = 0$ karena pada lereng ini tidak memiliki beban merata. Berikut perhitungan faktor keamanan terhadap gaya geser.

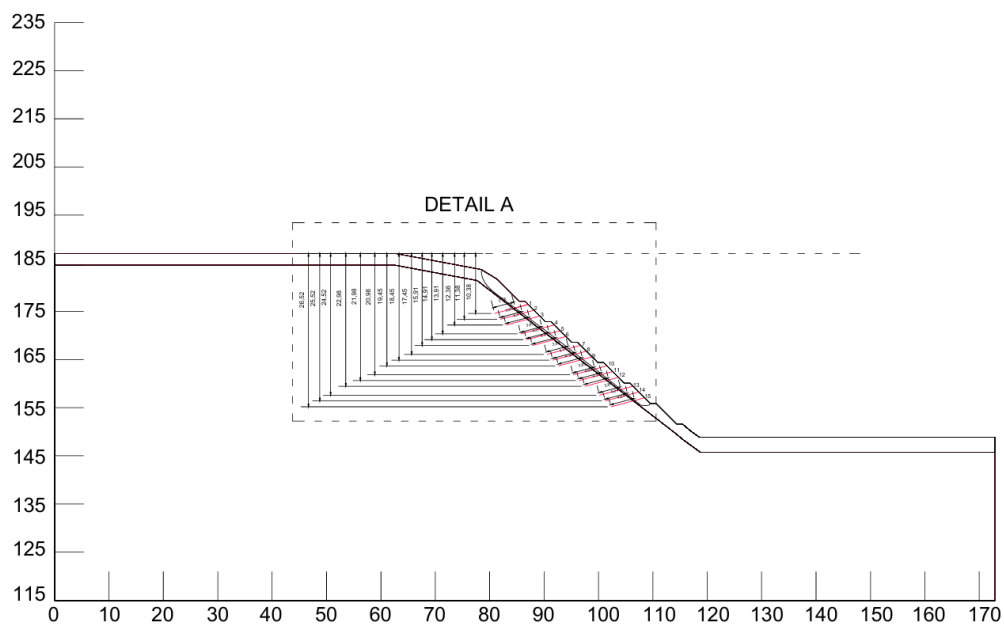
$$\begin{aligned}
 SF &= \frac{Cb.BL + (W + Pa \sin \phi) \tan \phi}{P A \cos \phi} \\
 SF &= \frac{1984,79 + (850 + 1422,24 \sin 26^\circ) \tan 26^\circ}{1422,24 \cos 26^\circ} \\
 &= 2,050 > 1,3 \text{ (Aman)}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil analisis, diperoleh nilai faktor keamanan (SF) terhadap gaya geser sebesar 2,050. Berdasarkan FHWA-NHI-14-007, nilai SF minimum yaitu

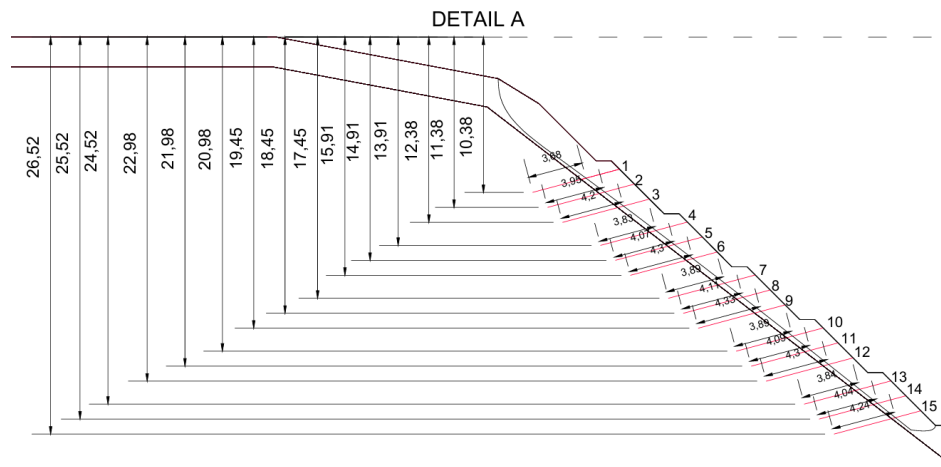
sebesar $> 1,3$ sehingga lereng dinyatakan aman terhadap gaya geser. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kapasitas tahanan geser yang dimiliki lereng lebih besar dibandingkan gaya geser yang bekerja. Sehingga, lereng dinyatakan aman terhadap potensi keruntuhan akibat gaya geser.

5.3.2.3 Analisis Stabilitas Internal Terhadap Putus Tulangan

Analisis stabilitas internal terhadap putus tulangan dilakukan untuk memastikan bahwa gaya tarik yang bekerja pada setiap *nail* tidak melebihi kapasitas tarik izin tulangan yang digunakan. Digunakan *software* AutoCAD untuk mengetahui panjang *nail* yang berada di belakang bidang longsor serta menghitung kedalaman ujung *nail* terhadap lapisan tanah di atasnya. Hasil pemodelan untuk menghitung tinggi Li ditunjukkan pada Gambar 5.27, Dengan potongan detail A ditunjukkan pada Gambar 5.28. Dimensi dari gambar yang terlampir dinyatakan dalam satuan meter.



Gambar 5. 27 Penentuan Tinggi Li



Gambar 5. 28 Detail A Penentuan Tinggi Li

Selanjutnya dilakukan rekapitulasi tinggi Li pada setiap *nail*. Berikut Tabel 5.12 yang menunjukkan rekapitulasi nilai Li pada setiap *nail*.

Tabel 5. 12 Rekapitulasi Nilai Li pada Tiap Nail

No. Nail	Li (m)	Le (m)
1	10,38	3,68
2	11,38	3,95
3	12,38	4,2
4	13,91	3,83
5	14,91	4,07
6	15,91	4,3
7	17,45	3,89
8	18,45	4,11
9	19,45	4,33
10	20,98	3,89
11	21,98	4,09
12	22,98	4,3
13	24,52	3,84
14	25,52	4,04
15	26,52	4,24

Pada analisis ini, stabilitas terhadap putus tulangan dilakukan untuk memastikan bahwa gaya tarik yang bekerja pada *nail* tidak melebihi kapasitas tarik izin tulangan. Analisis ini diperlukan agar dapat diketahui kemungkinan terjadinya kegagalan akibat putusnya tulangan ketika menerima beban dari massa tanah yang longsor. Perhitungan stabilitas terhadap putus tulangan pada *nail* diameter 25 mm dapat dilakukan sebagai berikut.

1.) Koefisien Tekanan Tanah Lateral

$$\begin{aligned} \text{a.) } K_{aA1} &= \tan^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \\ &= \tan^2\left(45 - \frac{22}{2}\right) \\ &= 0,454 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b.) } K_{aA2} &= \tan^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \\ &= \tan^2\left(45 - \frac{30}{2}\right) \\ &= 0,333 \end{aligned}$$

2.) Tegangan Horizontal pada *Nail* ke-1

$$\begin{aligned} \sigma_{h1} &= (-2 \times c \times \sqrt{K_{aA2}}) + (\gamma \times L_i \times K_{aA2}) \\ &= (-2 \times 200 \times \sqrt{0,333}) + (22,24 \times 10,38 \times 0,333) \\ &= 42,31 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

3.) Faktor Keamanan Terhadap Putus Tulangan pada *Nail* ke-1

$$\begin{aligned} SF &= \frac{\left(\frac{0,25 \times \pi \times d^2 \times f_y}{1000}\right)}{\sigma_h \cdot S_v \cdot S_h} \\ &= \frac{\left(\frac{0,25 \times \pi \times 25^2 \times 520}{1000}\right)}{42,31 \times 1 \times 1} \\ &= 6,03 > 1,8 \text{ (Aman)} \end{aligned}$$

Berikut rekapitulasi nilai faktor keamanan (SF) terhadap putus tulangan *nail* 25 mm ditunjukkan pada Tabel 5.13 berikut.

Tabel 5. 13 Rekapitulasi Nilai Faktor Keamanan Terhadap Putus Tulangan pada *Nail* Diameter 25 mm

No. <i>Nail</i>	Li (m)	Le (m)	σ_h (kN/m ²)	SF	Cek
1	10,38	3,68	42,31	6,03	Aman
2	11,38	3,95	49,72	5,13	Aman
3	12,38	4,2	57,14	4,47	Aman
4	13,91	3,83	68,48	3,73	Aman
5	14,91	4,07	75,89	3,36	Aman
6	15,91	4,3	83,31	3,06	Aman
7	17,45	3,89	94,72	2,69	Aman
8	18,45	4,11	102,13	2,50	Aman
9	19,45	4,33	109,55	2,33	Aman
10	20,98	3,89	120,89	2,11	Aman
11	21,98	4,09	128,30	1,99	Aman
12	22,98	4,3	135,72	1,88	Aman
13	24,52	3,84	147,13	1,73	Tidak Aman
14	25,52	4,04	154,55	1,65	Tidak Aman
15	26,52	4,24	161,96	1,58	Tidak Aman

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 5.13, *nail* diameter 25 mm menunjukkan bahwa terdapat beberapa *nail* yang memiliki nilai $SF < 1,8$. Sehingga dinyatakan bahwa *nail* dengan diameter 25 mm belum seluruhnya memenuhi kriteria keamanan terhadap putus tulangan.

Selanjutnya, dilakukan perhitungan yang sama untuk stabilitas terhadap putus tulangan pada *nail* diameter 29 mm. Berikut Tabel 5.14 yang menunjukkan rekapitulasi hasil perhitungan nilai SF terhadap putus tulangan *nail* diameter 29 mm.

Tabel 5. 14 Rekapitulasi Nilai Faktor Keamanan Terhadap Putus Tulangan pada *Nail* Diameter 29 mm

No. <i>Nail</i>	Li (m)	Le (m)	σ_h (kN/m ²)	SF	Cek
1	10,38	3,68	42,31	8,12	Aman
2	11,38	3,95	49,72	6,91	Aman
3	12,38	4,2	57,14	6,01	Aman
4	13,91	3,83	68,48	5,02	Aman
5	14,91	4,07	75,89	4,53	Aman
6	15,91	4,3	83,31	4,12	Aman
7	17,45	3,89	94,72	3,63	Aman
8	18,45	4,11	102,13	3,36	Aman
9	19,45	4,33	109,55	3,14	Aman
10	20,98	3,89	120,89	2,84	Aman
11	21,98	4,09	128,30	2,68	Aman
12	22,98	4,3	135,72	2,53	Aman
13	24,52	3,84	147,13	2,33	Aman
14	25,52	4,04	154,55	2,22	Aman
15	26,52	4,24	161,96	2,12	Aman

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 5.14, *nail* berdiameter 29 mm menghasilkan nilai SF yang berada pada rentang 2,12–8,12 > 1,8 (aman). Sehingga penggunaan *nail* dengan diameter 29 mm dinyatakan aman terhadap kegagalan akibat putus tulangan.

5.3.2.3 Analisis Stabilitas Internal Terhadap Cabut Tulangan

Setelah dilakukan analisis terhadap putus tulangan, selanjutnya dilakukan analisis stabilitas terhadap cabut tulangan (*pullout failure*). Berikut perhitungan analisis stabilitas terhadap cabut tulangan dengan *nail* 25 mm pada *nail* ke-1.

$$SF = \frac{\pi \times q_u \times D_{dhx} \times L_{e1}}{\sigma_h \times S_v \times S_h}$$

$$= \frac{\pi \times 140 \times 0,2 \times 3,68}{42,3 \times 1 \times 1}$$

$$= 7,65 > 2 \text{ (Aman)}$$

Dengan :

$q_u = 140$ (didapatkan dari tabel 3.6)

$D_{dh} = 0,2$ m (berdasarkan SNI 8460:2017)

Perhitungan yang sama dilakukan pada setiap *nail*. Berikut Tabel 5.15 yang menunjukkan rekapitulasi hasil perhitungan stabilitas terhadap cabut tulangan pada *nail* diameter 25 mm.

Tabel 5. 15 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Stabilitas terhadap Cabut Tulangan pada *Nail* Diameter 25 mm

No. <i>Nail</i>	Le (m)	σ_h (kN/m ²)	SF	Cek
1	3,68	42,31	7,65	Aman
2	3,95	49,72	6,99	Aman
3	4,2	57,14	6,47	Aman
4	3,83	68,48	4,92	Aman
5	4,07	75,89	4,72	Aman
6	4,3	83,31	4,54	Aman
7	3,89	94,72	3,61	Aman
8	4,11	102,13	3,54	Aman
9	4,33	109,55	3,48	Aman
10	3,89	120,89	2,83	Aman
11	4,09	128,30	2,80	Aman
12	4,3	135,72	2,79	Aman
13	3,84	147,13	2,30	Aman
14	4,04	154,55	2,30	Aman
15	4,24	161,96	2,30	Aman

Selanjutnya, dilakukan perhitungan yang sama untuk stabilitas terhadap cabut tulangan pada *nail* diameter 29 mm. Berikut Tabel 5.16 yang menunjukkan hasil rekapitulasi hasil perhitungan nilai SF terhadap putus tulangan *nail* diameter 29 mm

Tabel 5. 16 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Stabilitas terhadap Cabut Tulangan pada *Nail* Diameter 29 mm

No. <i>Nail</i>	Le (m)	σ_h (kN/m ²)	SF	Cek
1	3,68	42,31	7,65	Aman
2	3,95	49,72	6,99	Aman
3	4,2	57,14	6,47	Aman
4	3,83	68,48	4,92	Aman
5	4,07	75,89	4,72	Aman
6	4,3	83,31	4,54	Aman
7	3,89	94,72	3,61	Aman
8	4,11	102,13	3,54	Aman
9	4,33	109,55	3,48	Aman
10	3,89	120,89	2,83	Aman
11	4,09	128,30	2,80	Aman
12	4,3	135,72	2,79	Aman
13	3,84	147,13	2,30	Aman
14	4,04	154,55	2,30	Aman
15	4,24	161,96	2,30	Aman

Berdasarkan Tabel 5.15 dan Tabel 5.16 hasil perhitungan stabilitas terhadap cabut tulangan pada kedua variasi diameter *nail*, diperoleh seluruh *nail* memiliki nilai SF > 2 (aman). Nilai tersebut sudah memenuhi nilai SF minimum terhadap cabut tulangan.

5.4 Pembahasan

Parameter tanah yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari hasil pengujian laboratorium dan data SPT (*standard penetration test*) yang telah melalui proses *back analysis* sehingga setiap nilai komponen-komponen tanah dapat menggambarkan kondisi aktual lereng eksisting di DAM Balambano, PT Vale. Berdasarkan hasil analisis, lapisan tanah dibedakan menjadi dua lapisan utama, yaitu lapisan A1 sebagai tanah yang mengalami pelapukan dengan nilai kohesi dan sudut geser dalam yang relatif rendah serta lapisan A2 yang memiliki kuat geser lebih tinggi. Perbedaan karakteristik tersebut disebabkan lapisan A1 menjadi bagian yang mengalami kelongsoran karena mempunyai kemampuan menahan gaya geser yang lebih kecil dibandingkan lapisan A2.

Setelah dilakukan analisis stabilitas lereng eksisting pada DAM Balambano didapatkan bahwa nilai SF masih berada pada kondisi yang tidak aman. Analisis menggunakan metode *Fellenius* menghasilkan nilai SF sebesar $1,078 < 1,5$ (tidak aman). Pada analisis dengan program SLOPE/W menghasilkan nilai SF pada kondisi statik sebesar $1,030 < 1,5$ (tidak aman) dan pada kondisi gempa dihasilkan nilai SF sebesar $0,751 < 1,1$ (tidak aman). Kemudian dilakukan analisis menggunakan *software* PLAXIS menghasilkan nilai SF sebesar $0,956 < 1,5$ (tidak aman) pada kondisi statik dan mengalami *collapse* pada kondisi gempa dengan nilai SF sebesar $0,717 < 1,1$ (tidak aman). Terdapat selisih nilai SF yang relatif kecil diantara ketiga metode tersebut. Perbedaan nilai tersebut dipengaruhi oleh metode analisis yang digunakan, pada metode *Fellenius* hanya memperhitungkan keseimbangan gaya pada bidang longsor, SLOPE/W melakukan pencarian bidang longsor kritis secara otomatis melalui proses iterasi, sedangkan pada PLAXIS mempertimbangkan perilaku tegangan dan deformasi tanah menggunakan metode elemen hingga. Meskipun demikian, ketiga metode memberikan kesimpulan yang sama bahwa lereng eksisting masih berada pada kondisi yang tidak aman sehingga diperlukan perkuatan lereng.

Perencanaan perkuatan lereng dilakukan menggunakan *soil nailing* dan *shotcrete* setelah dilakukan perubahan geometri lereng dari kemiringan 50° menjadi

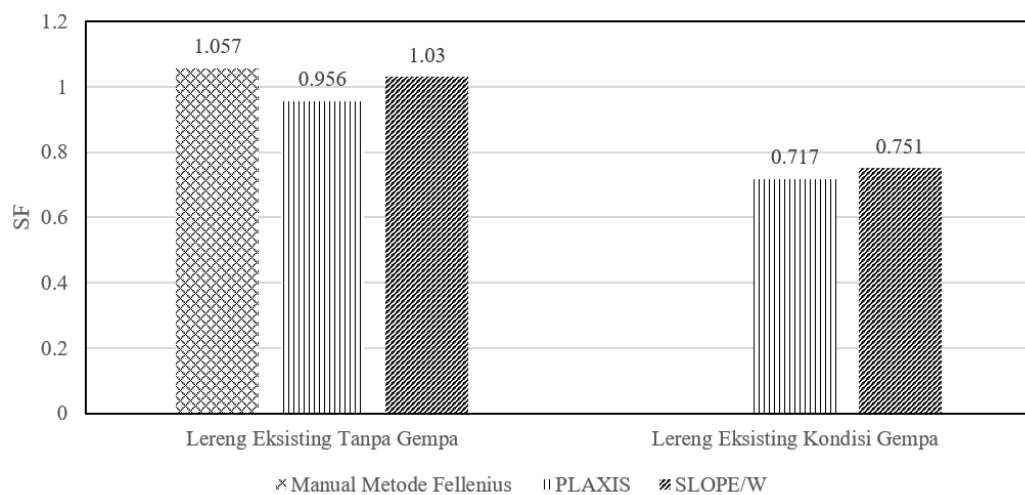
45° dan pembuatan terasering. Didapatkan nilai SF pada PLAXIS lereng setelah modifikasi sebesar $1,438 < 1,5$ (tidak aman) pada kondisi statik dan sebesar $0,947 < 1,1$ (tidak aman) pada kondisi gempa. Selain itu didapatkan juga nilai SF lereng setelah modifikasi dengan perhitungan manual *Fellenius* yaitu sebesar $1,598 > 1,5$ (aman). Karena terdapat selisih antara perhitungan pada PLAXIS dan perhitungan manual *fellenius* maka tetap dibutuhkan pemasangan *soil nailing* untuk memastikan nilai SF lereng telah memenuhi syarat.. Desain *soil nailing* menggunakan tulangan dengan panjang *nail* 6 m, spasi horizontal dan vertikal 1 m, kemiringan pemasangan 15°. Untuk mencari nilai SF yang optimal, diberikan variasi diameter *nail* yaitu diameter 25 mm dan 29 mm. Pemilihan spesifikasi tersebut didasarkan pada rekomendasi SNI 8460. Sementara itu, shotcrete berfungsi melindungi permukaan lereng dari erosi dan pelapukan.

Setelah dilakukan pemasangan *soil nailing* dan *shotcrete*, stabilitas lereng mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Hasil analisis menggunakan PLAXIS didapatkan bahwa nilai faktor keamanan meningkat menjadi $1,798 > 1,5$ (aman) pada kondisi tanpa beban gempa dan $1,229 > 1,1$ (aman) pada kondisi gempa. Selanjutnya, berdasarkan hasil analisis menggunakan metode baji, diperoleh nilai SF terhadap keruntuhan global pada nail 25 mm sebesar $2,34 > 1,5$ (aman) dan pada nail 29 mm sebesar $2,77 > 1,5$ (aman). Berdasarkan hasil perhitungan stabilitas terhadap gaya geser didapatkan nilai SF sebesar $2,050 > 1,3$ (aman). Pada analisis nilai SF terhadap putus tulangan, *nail* diameter 25 mm menunjukkan bahwa terdapat beberapa *nail* yang memiliki nilai SF $< 1,8$ (tidak aman). Sehingga dinyatakan bahwa *nail* dengan diameter 25 mm belum seluruhnya memenuhi kriteria keamanan terhadap putus tulangan. Sedangkan *nail* berdiameter 29 mm menghasilkan nilai SF yang berada pada rentang $2,12-8,12 > 1,8$ (aman). Sehingga penggunaan *nail* dengan diameter 29 mm dinyatakan aman terhadap kegagalan akibat putus tulangan. Hasil perhitungan stabilitas terhadap cabut tulangan pada kedua variasi diameter *nail*, diperoleh seluruh *nail* memiliki nilai SF > 2 (aman). Pada penelitian ini *nail* dengan diameter 29 mm dianggap paling optimal dalam meningkatkan stabilitas lereng.

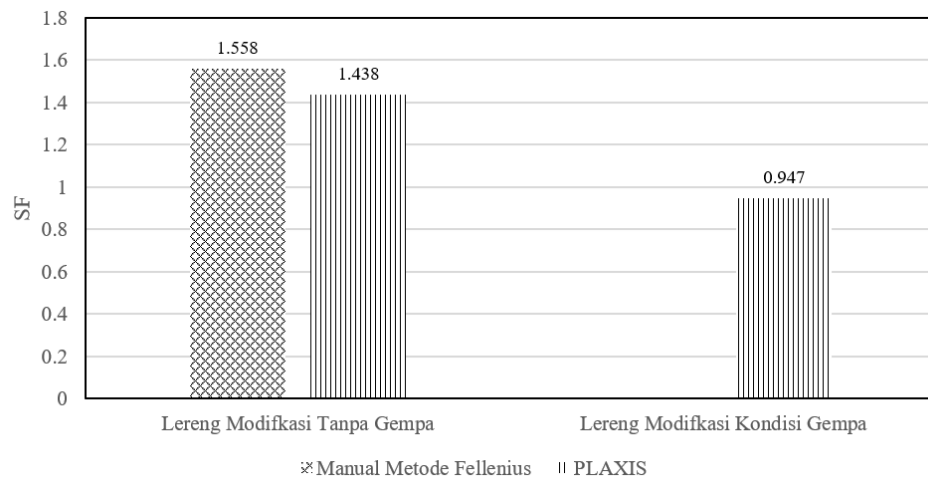
Berikut rekapitulasi nilai SF pada lereng eksisting, lereng setelah dimodifikasi, dan lereng setelah dilakukan perkuatan *soil nailing* dapat dilihat pada Tabel 5.17 berikut.

Tabel 5. 17 Rekapitulasi Nilai SF

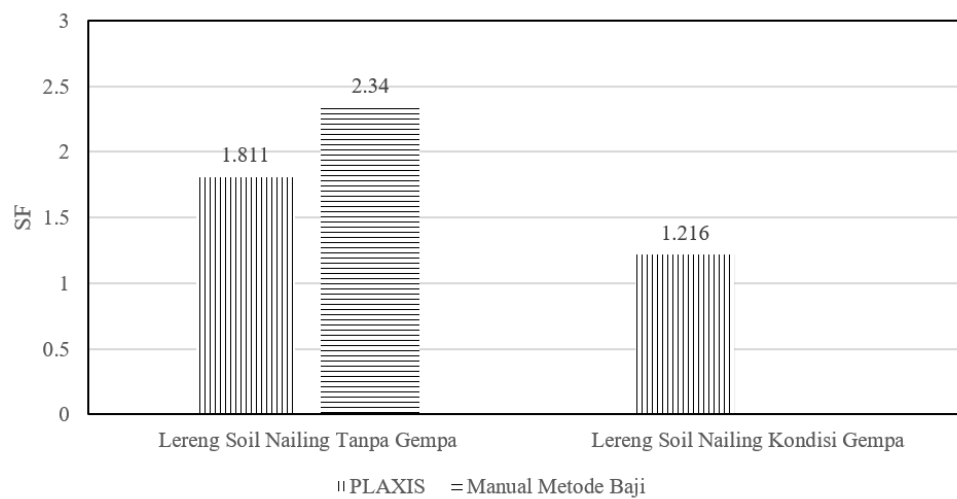
Rincian	Kondisi	Metode	Nilai SF
Lereng Eksisting	Tanpa Gempa	SLOPE/W	1,030
	Gempa	SLOPE/W	0,751
	Tanpa Gempa	PLAXIS	0,956
	Gempa	PLAXIS	0,717
	Tanpa Gempa	<i>Fellenius</i>	1,078
Lereng Modifikasi	Tanpa Gempa	PLAXIS	1,438
	Gempa	PLAXIS	0,947
	Tanpa Gempa	<i>Fellenius</i>	1,558
Lereng Setelah <i>Soil Nailing</i>	Tanpa Gempa	PLAXIS	1,811
	Gempa	PLAXIS	1,216
	Tanpa Gempa	Baji	2,34



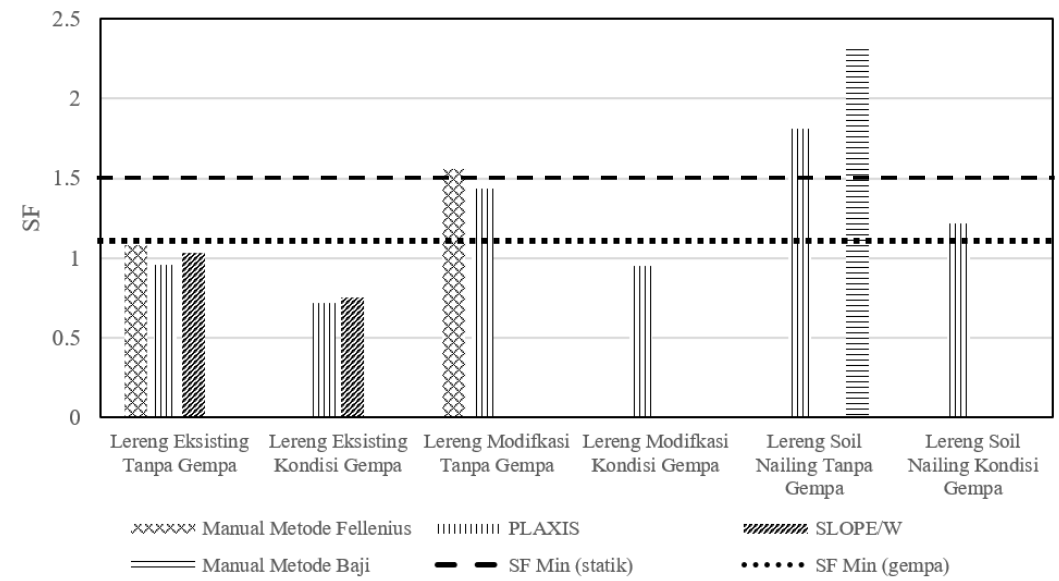
Gambar 5. 29 Rekapitulasi Nilai SF Lereng Eksisting



Gambar 5. 30 Rekapitulasi Nilai SF Lereng Modifikasi



Gambar 5. 31 Rekapitulasi Nilai SF Lereng *Soil Nailing*



Gambar 5. 32 Rekapitulasi Nilai SF

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kestabilan lereng dengan *soil nailing* dan *shotcrete* pada area PT Vale dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Berdasarkan data SPT (*standard penetration test*) dan uji laboratorium didapatkan kondisi tanah eksisting di lokasi penelitian didominasi oleh tanah pasir berbutir halus (*fine sand*). Berdasarkan hasil analisis, tanah dibedakan menjadi dua lapisan, yaitu A1 sebagai lapisan tanah lapuk dengan nilai kohesi dan sudut geser dalam yang lebih rendah, serta A2 yang memiliki kuat geser lebih tinggi.
2. Analisis stabilitas lereng eksisting menunjukkan bahwa seluruh metode menghasilkan nilai SF di bawah batas aman. Metode *Fellenius* memperoleh $SF = 1,078 < 1,5$ (tidak aman), SLOPE/W menghasilkan SF pada kondisi statik sebesar $1,030 < 1,5$ (tidak aman) dan $0,751 < 1,1$ (tidak aman), sedangkan PLAXIS menghasilkan SF pada kondisi statik sebesar $0,956 < 1,5$ (tidak aman) dan pada kondisi gempa sebesar $0,717 < 1,1$ (tidak aman). Meskipun terdapat sedikit perbedaan akibat perbedaan pendekatan analisis, seluruh hasil menunjukkan bahwa lereng eksisting berada dalam kondisi tidak stabil sehingga diperlukan perkuatan lereng.
3. Perencanaan perkuatan lereng dilakukan menggunakan *soil nailing* dan *shotcrete* setelah dilakukan modifikasi geometri lereng dengan mengubah kemiringan dari 50° menjadi 45° serta pembuatan terasering. Hasil analisis menunjukkan bahwa lereng hasil modifikasi masih belum memenuhi kriteria keamanan, dengan nilai SF pada PLAXIS sebesar 1,438 (statik) dan 0,947 (gempa), sedangkan perhitungan *Fellenius* menghasilkan SF sebesar 1,598. Adanya perbedaan hasil tersebut menunjukkan bahwa perkuatan

lereng tetap diperlukan. Oleh karena itu, direncanakan pemasangan *soil nailing* dengan panjang *nail* 6 m, spasi horizontal dan vertikal 1 m, serta sudut pemasangan 15° , menggunakan variasi diameter tulangan 25 mm dan 29 mm sesuai rekomendasi SNI 8460. Selain *shotcrete* diterapkan sebagai pelindung permukaan lereng terhadap erosi dan pelapukan..

4. Pemasangan *soil nailing* dan *shotcrete* meningkatkan stabilitas lereng secara signifikan. Hasil analisis PLAXIS menunjukkan faktor keamanan sebesar $1,798 > 1,5$ (aman) pada kondisi tanpa gempa dan $1,229 > 1,1$ (aman) pada kondisi gempa, sehingga memenuhi kriteria keamanan. Analisis metode baji menghasilkan SF terhadap keruntuhan global sebesar 2,34 untuk *nail* berdiameter 25 mm dan 2,77 untuk diameter 29 mm, sedangkan analisis gaya geser menunjukkan SF sebesar $2,050 > 1,3$ (aman). Pada analisis stabilitas internal, *nail* diameter 25 mm belum memenuhi kriteria terhadap putus tulangan, sedangkan *nail* berdiameter 29 mm memenuhi persyaratan terhadap putus dan cabut tulangan. Oleh karena itu, *nail* diameter 29 mm dinyatakan sebagai desain perkuatan yang paling optimal untuk meningkatkan stabilitas lereng.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil analisis kestabilan lereng dengan *soil nailing* dan *shotcrete* pada area PT Vale terdapat beberapa saran sebagai berikut

1. Penelitian selanjutnya dapat melakukan variasi perkuatan lereng dengan jenis perkuatan lainnya.
2. Penelitian selanjutnya dapat melakukan perbandingan variasi desain *soil nailing*, seperti panjang *nail*, jarak antar *nail*, dan sudut kemiringan *nail* agar perencanaan dapat lebih efisien dan ekonomis.
3. Penelitian selanjutnya dapat melakukan analisis menggunakan aplikasi geoteknik yang lain seperti GGU-STABILITY ataupun PLAXIS 3D.

DAFTAR PUSTAKA

- Analiser, R., & Nurhakiki. (2019). Analisis stabilitas lereng. Penerbit Teknik Sipil.
- API. 1987. *Recommended Practice for Field Testing Water-based Drilling Fluids*. Publication API RP 13B-1. American Petroleum Institute. Washington D.C.
- Aydogan, M., dkk. (2011). *Performance of soil nailing and shotcrete on slope stabilization*. *Journal of Geotechnical Engineering*.
- Bishop, A. W. (1995). *The use of the slip circle in the stability analysis of slopes*. *Geotechnique Journal*.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation analysis and design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., & Swolfs, W. M. (2014). *PLAXIS 2D reference manual*. PLAXIS BV.
- Byrne, R. J., Cotton, D., Porterfield, J., & Wolschlag, C. (1998). *Manual for design and construction monitoring of soil nail walls*. Federal Highway Administration.
- Das, B. M. (1985). *Principles of geotechnical engineering*. PWS Publishing Company.
- Elias, V., & Juran, I. (1991). *Soil nailing for stabilization of highway slopes and excavations*. Federal Highway Administration.
- Federal Highway Administration. (2014). *Soil nail walls reference manual* (FHWA-NHI-14-007). Federal Highway Administration.
- Hardiyatmo, H. C. (2008). Teknik fondasi 2. Gadjah Mada University Press.

- Hardiyatmo, H. C. (2012). *Mekanika tanah 1* (6th ed.). Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. (2017). *Mekanika tanah 1* (7th ed.). Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. (2018). *Mekanika tanah 2* (6th ed.). Gadjah Mada University Press.
- Kurniawan, dkk. (2022). Perkuatan lereng jalan menggunakan shotcrete pembangunan ruas jalan segmen 01 Tawang–Ngalang. *Jurnal Teknik Sipil*.
- Lazarte, C. A., Elias, V., Espinoza, D., & Sabatini, P. J. (2003). *Soil nail walls* (FHWA0-IF-03-017). Federal Highway Administration.
- Lomi, dkk. (2025). Analisis kestabilan lereng pada inlet dan outlet dengan perkuatan shotcrete dan *soil nailing*. *Jurnal Teknik Sipil*.
- Pragustus, dkk. (2019). Analisis faktor penyebab kelongsoran lereng pada area tambang. *Jurnal Rekayasa Geoteknik*.
- Prashant, A. dan Mukherjee, M. (2010). *Soil Nailing for Stabilization of Steep Slopes Near Railway Tracks*. Research Designs and Standards Organization. Indian Institute of Technology Kanpur. Lucknow
- Putro, dkk. (2023). Analisis kestabilan lereng dengan perkuatan *shotcrete* menggunakan PLAXIS (Studi kasus: Ruas Jalan Tarempa–Rintis STA 07+800 Kabupaten Anambas). *Jurnal Teknik Sipil*.
- Sarsito, D. A. (2010). Analisis aktivitas Sesar Matano dan potensi gempa di Sulawesi Selatan. *Jurnal Geologi Indonesia*.
- Standar Nasional Indonesia. (1995). *Tata cara perencanaan lereng* (SNI 03-1997-1995). Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (2017). *Persyaratan perancangan geoteknik* (SNI 8460:2017). Badan Standardisasi Nasional.

- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice* (2th ed.). John Wiley & Sons.
- Utomo, B. P. (2019). Analisis stabilitas lereng dengan perkuatan soil nailing dengan menggunakan program Geoslope. Universitas Islam Indonesia.
- Wibowo, dkk. (2023). Pengaruh sudut pemasangan nail terhadap stabilisasi lereng metode *soil nailing* di ruas Jalan Giriwoyo–Glonggong. Jurnal Teknik Sipil.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Uji Boring Log BH-01

BORING LOG										
PROJECT NAME : SLOPE STABILITY					LOCATION : BALAMBANO					
BORE HOLE NO : BH-01					COORDINATE : S02°38.594' E121°13.215'					
DRILLER : SYAMSUL					DATE STARTED : 23/09/2022					
GROUND WATER LEVEL : -					DATE FINISHED : 30/09/2022					
Date	Depth	Sampling Unit	Boring Log	G.W.L	Thickness (m)	Soil Description	STANDARD PENETRATION TEST			
							N1 (0-15)	N2 (15-30)	N3 (30-45)	N VALUE
	1					Lempung - lanau berbatu, abu-abu kehitaman, konsistensi keras dan padat - sangat padat.				
	2	1					18 15	60 4	>60	
	4	2					60 5	>60	>60	
	6	3					21 15	>60	>60	
	8	4			15		60 4	>60	>60	
	10	5					60 3	>60	>60	
	12	6					60 4	>60	>60	
	14	7					60 3	>60	>60	
	16	8				End of Boring				
	18	9								
	20	10								



m
m
m

LEGEND

 Ground Water Level

 Undisturbed Sample

 Standard Penetration Test

M'd
D'r
C'h

Sheet 1 of 1

Lampiran 2 Pengujian Sampel Pengeboran

LABORATORY TEST RESUME					
Project : SLOPE STABILITY		Check by : Muh.Ali			
Location : BALAMBANO		Date : 9-12 Oktober 2022			
Bor location : BH - 01		Weather : Sunny			
		No. Bor : 4.00-4.50 & 9-9.5 meter			
PENGUJIAN SAMPEL PENGEBORAN					
No. Sample			A1	A2	
Depth			4 - 4.5	9 - 9.5	
Indek Properties		symbol	unit		
1.	Wet Density	γ_{wet}	gram/cm ³	2,224	2,102
2.	Dry Density	γ_{Dry}	gram/cm ³	1,740	1,532
3.	Water content	ω	%	26,77	27,38
4.	Specific of gravity	Gs	-	2,55	2,54
5.	Void ratio	e	-	0,47	0,66
6.	Porosity	n	%	31,81	39,84
7.	Degree of saturation	Sr	%	65,72	69,96
8.	Size Analysis				
	Percentage Of Retained				
	Gravel		%	0,26	0,07
	Sand		%	92,17	90,62
	Silt		%	7,57	9,31
	Clay		%	0,00	0,00
9.	Plastic limit	PL	%	Non Plastis	Non Plastis
10.	Liquid limit	LL	%		
11.	Plasticity index	PI	%		
12.	Shirinkage limit	SL	%		
Engineering properties					
13.	Triaxial - UU Test	ϕ	$^{\circ}$	22,15	30,05
		c	kg/cm ²	0,018	0,023
15.	Consolidation Test	Cc	-	0,0292	0,0318
		Cv	cm ² /detik	0,008219	0,00818

Makassar, 13 Oktober 2022



 Muhammad Ali
 Koordinator Lab. Sipil

Lampiran 3 Pengujian Berat Volume Lapisan Tanah A1

DENSITY				
Project	: SLOPE STABILITY	Test by	: Abdul Rahman	
Location	: BALAMBANO	Check by	: Muh.Ali	
Bor location	: BH - 01	Date	: 9-12 Oktober 2022	
Core Box	:	No. Bor / Depth	: 4.0-4.5 m	

No. Bor				Average
Depth	meter	I	II	
Weight of Ring	gr	32.80	32.80	
Weight of Ring + Wet Soil	gr	93.90	93.90	
Weight of Wet Soil	gr	61.10	61.10	
Wet Soil Volume	cm ³	27.48	27.48	
Weight of Wet Soil Volume	gr/cm ³	2.22	2.22	2.224
Weight of Ring + Dry Soil	gr	80.60	80.60	80.600
Weight of Dry Soil	gr	47.80	47.80	47.800
Weight of Water	gr	13.30	13.30	13.300
Moisture Content	%	27.82	27.82	27.824
Dry Soil Volume	cm ³	18.73	18.73	18.734
Weight of Dry Soil Volume	gr/cm ³	1.74	1.74	1.740
Specific Gravity		2.55	2.55	2.551
Volume of Water	cm ³	13.30	13.30	13.300
Pore Volume	cm ³	8.74	8.74	8.741
Value of Pore		0.47	0.47	0.467
Saturation Degree	%	65.72	65.72	65.721
Porositas	%	31.81	31.81	31.814

Lampiran 4 Pengujian Berat Volume Lapisan Tanah A2

DENSITY				
				
Project	: SLOPE STABILITY	Test by	: Abdul Rahman	
Location	: BALAMBANO	Check by	: Muh.Ali	
Bor location	: BH-01	Date	: 9-12 Oktober 2022	
Core Box	: A2	No. Bor / Depth	: 9.0-9.5	

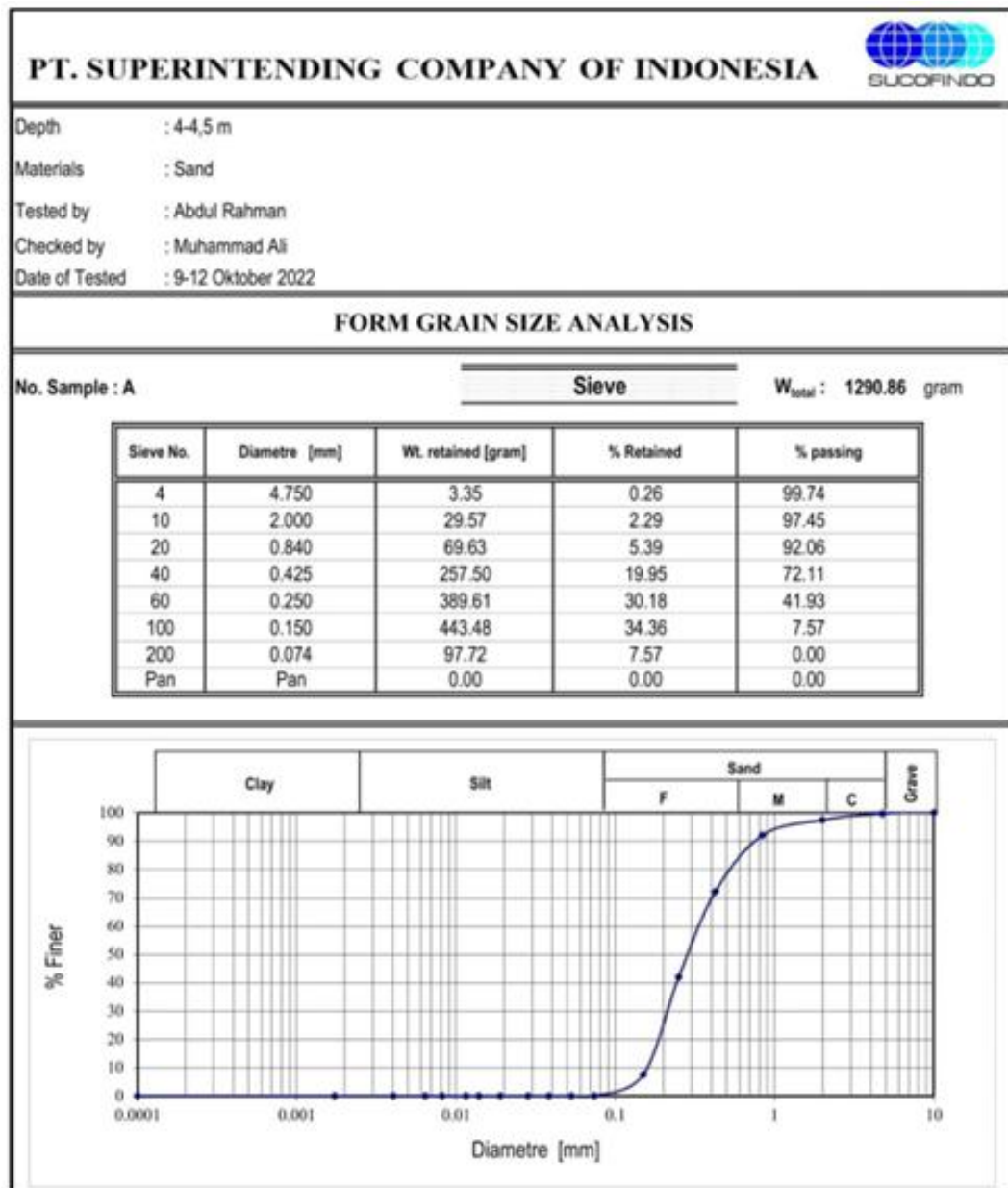
No. Bor				Average
Depth	meter	I	II	
Weight of Ring	gr	32.80	32.80	
Weight of Ring + Wet Soil	gr	90.20	90.90	
Weight of Wet Soil	gr	57.40	58.10	
Wet Soil Volume	cm3	27.48	27.48	
Weight of Wet Soil Volume	gr/cm3	2.09	2.11	2.102
Weight of Ring + Dry Soil	gr	73.90	81.42	77.660
Weight of Dry Soil	gr	41.10	43.10	42.100
Weight of Water	gr	16.30	15.00	15.650
Moisture Content	%	39.66	34.80	37.231
Dry Soil Volume	cm3	16.14	16.92	16.529
Weight of Dry Soil Volume	gr/cm3	1.50	1.57	1.532
Specific Gravity		2.55	2.55	2.547
Volume of Water	cm3	16.30	15.00	15.650
Pore Volume	cm3	11.34	10.55	10.946
Value of Pore		0.70	0.62	0.663
Saturation Degree	%	69.56	70.35	69.957
Porositas	%	41.27	38.41	39.838

Lampiran 5 Pengujian Kadar Air dan Berat Jenis Lapisan Tanah A1 dan A2

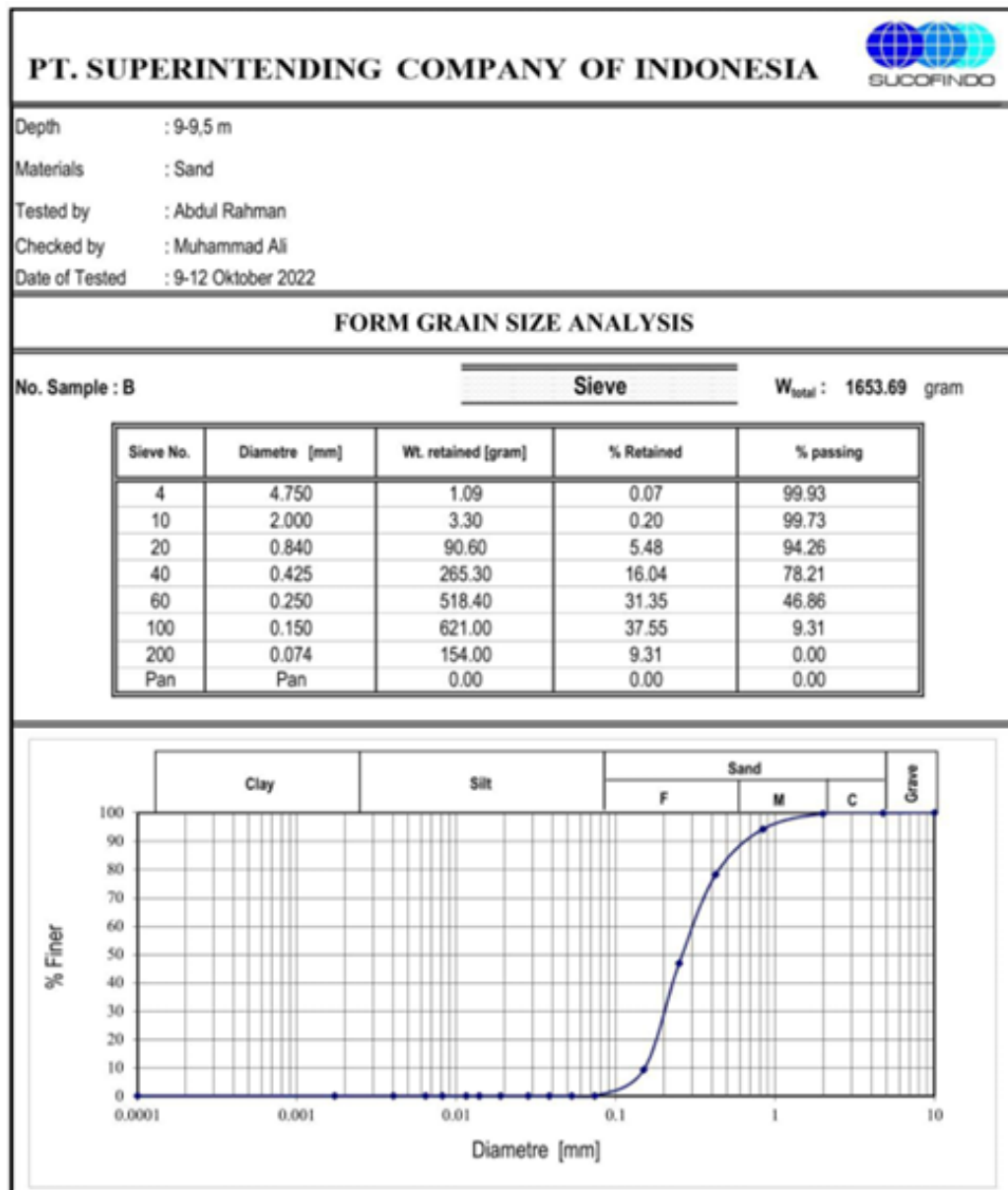
FORM WATER CONTENT				
Project : SLOPE STABILITY			Test by : Abdul Rahman	
Location : BALAMBANO			Check by : Muh.Ali	
Bor location :			Date : 09 Oktober 2022	
Core Box : A1 & A2			No. Bor / Depth : 4.00-4.50 & 9-9.5 meter	
Water content (ω)				
No. Sample	A1		A2	
Depth :	3.0-3.5		7.0-7.5	
No.	1	2	1	2
Wt of can (gr)	22.00	22.00	4.40	4.40
Wt of wet soil + can (gr)	148.90	148.90	99.30	99.30
Wt of dry soil + can (gr)	122.10	122.10	78.90	78.90
Wt of moisture (gr)	26.80	26.80	20.40	20.40
Wt of dry soil (gr)	100.10	100.10	74.50	74.50
Water content (%)	26.77	26.77	27.38	27.38
Average (%)	26.77		27.38	

FORM SPESIFIC OF GRAVITY				
Project : SLOPE STABILITY			Test by : Abdul Rahman	
Location : BALAMBANO			Check by : Muh.Ali	
Bor location : BH-01			Date : 9-12 Oktober 2022	
Core Box :			No. Bor / Depth : 4-4.5 & 9-9.5	
Specific of gravity (Gs)				
No. Sample	UDS1		UDS2	
Depth :	4-4.5		9-9.5	
No.	1	2	1	2
Wt of piconometer	18.10	18.10	18.30	18.30
Wt of piconometer + dry soil	45.20	45.20	42.80	42.80
Wt of piconometer + soil + water	81.50	81.50	79.20	79.20
Wt of piconometer + water	65.00	65.00	64.30	64.30
Wt of dry soil	10.60	10.60	9.60	9.60
Spesific of gravity	2.551	2.551	2.547	2.547
Average	2.551		2.547	
Temperature	26		26	
Corection	0.9986		0.9986	
Average of Gs	2.55		2.54	

Lampiran 6 Pengujian Analisis Ukuran Butir pada Lapisan Tanah A1



Lampiran 7 Pengujian Analisis Ukuran Butir pada Lapisan Tanah A2



Lampiran 8 Triaxial Test pada Lapisan Tanah A1

	FORM (FORMULIR)	Form no. (No. formir)	
	RESULT OF (HASIL PENGUJIAN)	Issue/Revision (Tetapan/Revisi)	
	TRIAxIAL TEST	Revision (Revisi)	
	Page 1 of 1 (Halaman 1 dari 1)		

Project Initial

Project (proyek)	: SLOPE STABILITY
Location (lokasi)	: -
No of Sample (no. contoh)	: A1
Depth (kedalaman)	: 4-4,5 m
Soil Type (jenis tanah)	: sandy
Colour (warna)	: Dark Grey

Sample Parameter

Water Content (Kadar Air)	
Before test (Sebelum Test)	: 25,30
After test (Setelah Test)	: -
Specific gravity (Berat Jenis (G_s))	: 2,5479
Unit Weight (Berat Isi) (γ)	: 2,224
Dry density (Berat Isi kering) (γ_d)	: 1,470
Degree of saturation (Derajat Kejenuhan) (Sr)	: 87,91
Weight of Sample (berat sampel) (W)	: 412,10

Sample Measurement

Diameter (diameter)	: 5,00 cm
Height (tinggi)	: 10,00 cm
Area (Luas)	: 19,63 cm ²
Volume (volume)	: 196,3 cm ³

Test Type

UU	☒
CU-P	☐
CU-BP	☐
CD	☐

Sample Type

UDS	☒
DS	☐
BLOCK	☐
COMPACTED	☐

Sample Accepted (tanggal diterima) : -

Sample Tested (tanggal uji) : 9/10/2022

Test Finished (tanggal selesai) : 10/10/2022

Tested by (penguji) : -

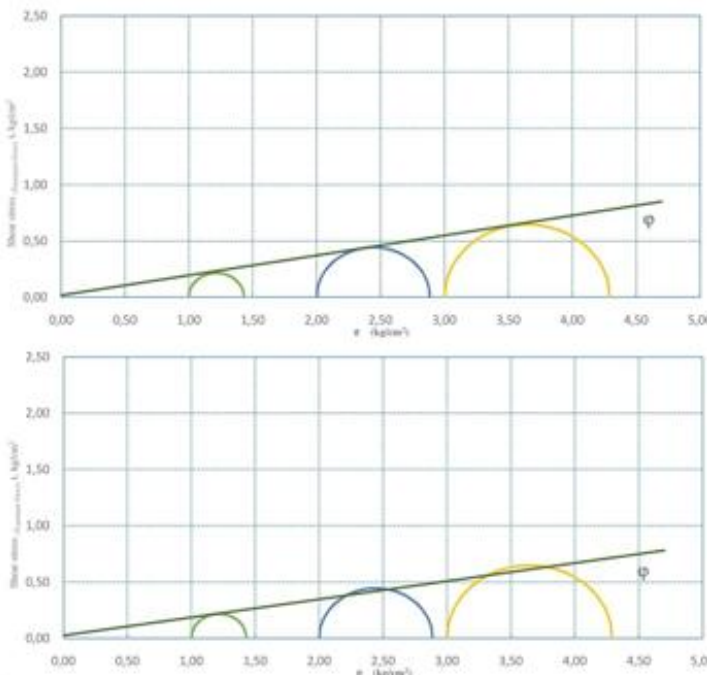
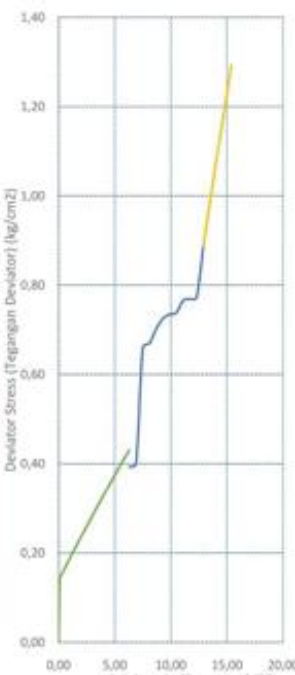
Signature (tanda tangan)

Checked by (pemeriksa) : -

Signature (tanda tangan)

Result

	Total	Effective	Unit
ϕ	22,150	22,150	(°)
C	0,018	0,023	(kg/cm ²)

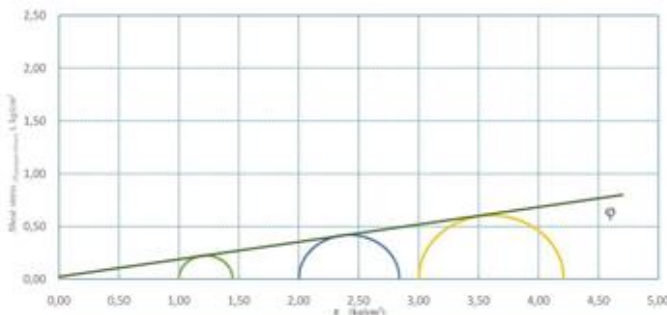



Lampiran 9 Triaxial Test pada Lapisan Tanah A2

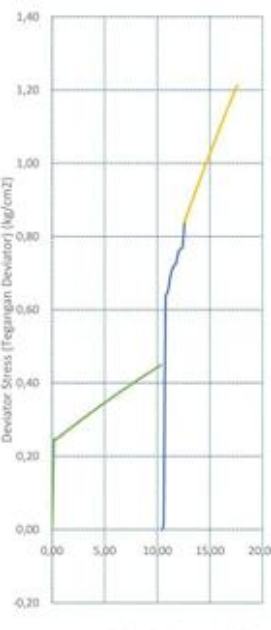
	FORM (FORMULIR) RESULT OF (HASIL PENGUJIAN) TRIAXIAL TEST	Form no. (No. formulir) : _____ Issue/Revision (Tanggal/Revisi) : _____ Revision (Revisi) : _____ Page 1 of 1 (Halaman 1 dari 1)
	Project Initial Project (proyek) : SLOPE STABILITY Location (lokasi) : - No of Sample (no. contoh) : A2 Depth (kedalaman) : 9-9,5 m Soil Type (jenis tanah) : sandy Colour (warna) : Dark Grey	
	Test Type UU ☐ CU-P ☐ CU-BP ☐ CD ☐	Sample Type UDS ☐ DS ☐ BLOCK ☐ COMPACTED ☐

Sample Parameter Water Content (Kadar Air) Before test (Sebelum Test) : 24,10 After test (Setelah Test) : - Specific gravity (Berat Jenis) (G_s) : 2,5434 Unit Weight (Berat isi) (γ) : 2,102 Dry density (Berat isi kering) (γ_d) : 1,532 Degree of saturation (Derajat Kejenuhan) (S_r) : 92,90 Weight of Sample (berat sampel) (W) : 398,90		Sample Accepted (tanggal diterima) : - Sample Tested (tanggal uji) : 9/10/2022 Test Finished (tanggal selesai) : 10/10/2022 Tested by (penguji) : - Signature (tanda tangan) : _____ Checked by (pemeriksa) : - Signature (tanda tangan) : _____
---	--	---

Sample Measurement Diameter (diameter) : 5,00 cm Height (tinggi) : 10,00 cm Area (luas) : 19,63 cm ² Volume (volume) : 196,3 cm ³	Result <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Total</th> <th>Effective</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ϕ</td> <td>30,050</td> <td>30,050</td> <td>(°)</td> </tr> <tr> <td>c</td> <td>0,023</td> <td>0,030</td> <td>(kg/cm²)</td> </tr> </tbody> </table>		Total	Effective	Unit	ϕ	30,050	30,050	(°)	c	0,023	0,030	(kg/cm ²)
	Total	Effective	Unit										
ϕ	30,050	30,050	(°)										
c	0,023	0,030	(kg/cm ²)										



Plot of shear stress (tegangan geser) in kg/cm² versus normal stress (tegangan normal) in kg/cm². The plot shows three Mohr circles (blue, green, yellow) and a linear failure envelope (black line) with an angle of internal friction ϕ .

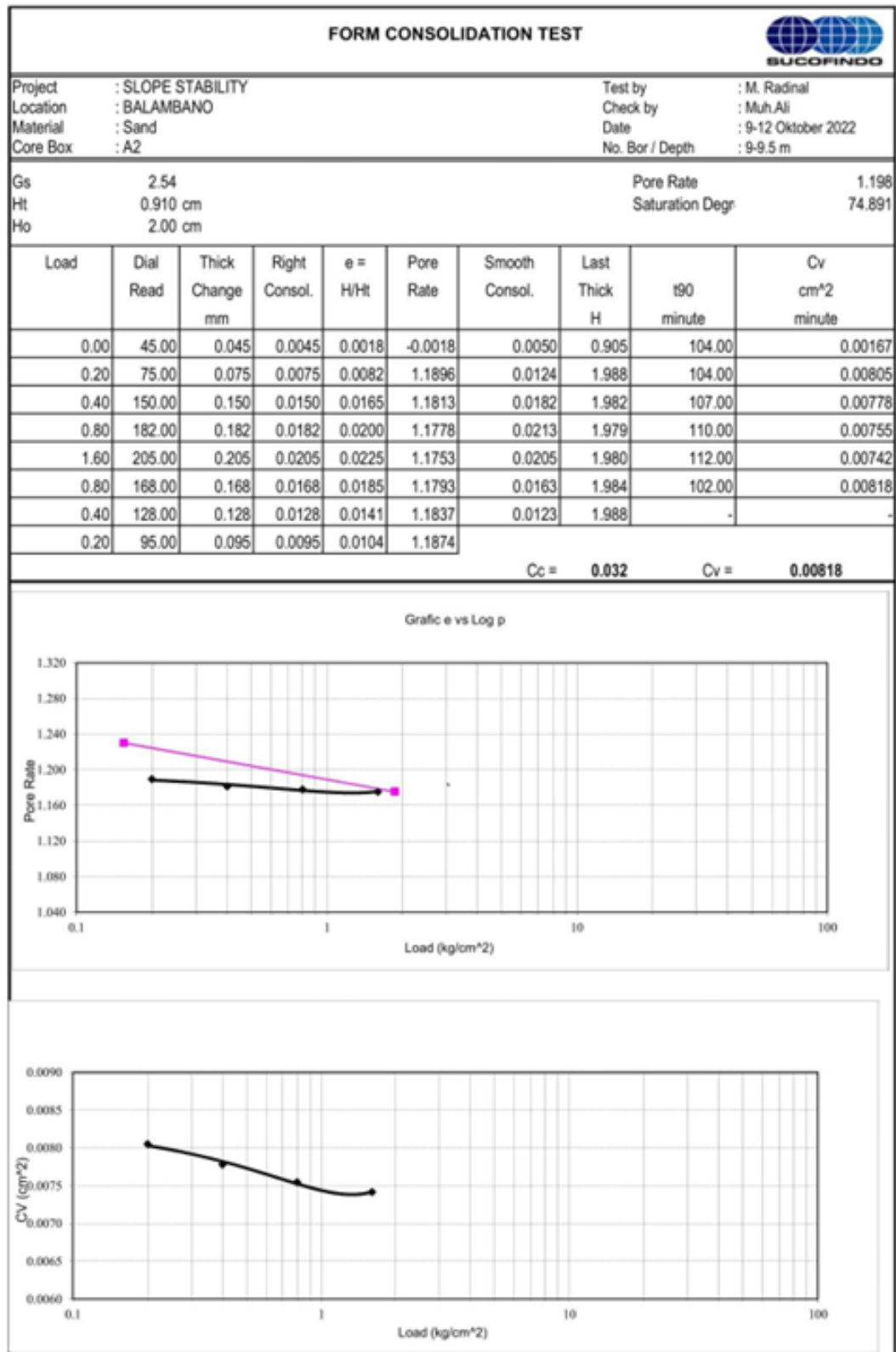


Plot of Deviator Stress (Tegangan Deviator) in kg/cm² versus Axial strain (Regangan) in (%). The plot shows a linear elastic region (green line) followed by a peak and then a post-peak region (yellow line). The peak deviator stress is approximately 1,20 kg/cm² at an axial strain of about 18%.

Lampiran 10 Consolidation Test pada Lapisan Tanah A1



Lampiran 11 Consolidation Test pada Lapisan Tanah A2



Lampiran 12 Dokumentasi Boring Log BH 01

BORING LOG DOCUMENTATION	
PROJECT NAME : SLOPE STABILITY	
LOCATION : BALAMBANO	
	
EQUIPMENT SETTING BH-01	
	

Lampiran 13 Dokumentasi Boring Log BH 01



