

TUGAS AKHIR
ANALISIS PENGARUH *SOIL NAILING* DAN PENGATURAN
MUKA AIR TANAH TERHADAP STABILITAS LERENG
MENGGUNAKAN METODE KESEIMBANGAN BATAS DAN
METODE ELEMEN HINGGA

(ANALYSIS OF THE EFFECTS OF SOIL NAILING AND
GROUNDWATER LEVEL CONTROL ON SLOPE STABILITY
USING THE LIMIT EQUILIBRIUM METHOD AND THE
FINITE ELEMENT METHOD)



NAUFAL ARKAN

21511229

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

2026

TUGAS AKHIR

ANALISIS PENGARUH *SOIL NAILING* DAN PENGATURAN MUKA AIR TANAH TERHADAP STABILITAS LERENG MENGUNAKAN METODE KESEIMBANGAN BATAS DAN METODE ELEMEN HINGGA

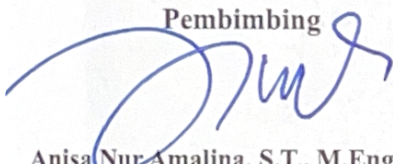
*(ANALYSIS OF THE EFFECTS OF SOIL NAILING AND
GROUNDWATER LEVEL CONTROL ON SLOPE STABILITY
USING THE LIMIT EQUILIBRIUM METHOD AND THE
FINITE ELEMENT METHOD)*



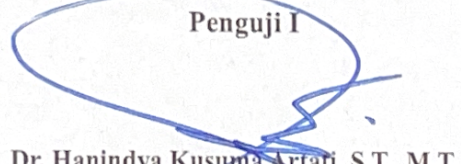
Telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal
Oleh Dewan penguji

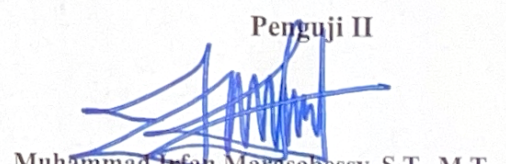
Pembimbing


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

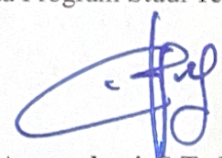
Penguji I


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

Penguji II


Muhammad Irfan Marasabessy, S.T., M.T.
NIK: 245110502

Mengesahkan
Plt. Ketua Program Studi Teknik Sipil


Dinia Anggraheni, S.T., M.Eng.
NIK: 165110105

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan 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 sendiri. Adapun bagian – bagian tertentu dalam penulisan laporan 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 kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan 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, 20 Juni 2026

Yang membuat pernyataan,



Naufal Arkan
(21511229)

KATA PENGANTAR

Asslamualaikum Wr. Wb.

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan penelitian yang berjudul “Analisis Perkuatan Lereng pada Tanah Longsor di Ruas Jalan Gripit – Kalibening, Banjarnegara, Jawa Tengah” dengan baik. Tugas Akhir ini disusun dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan kelulusan sarjana Teknik Sipil strata I Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini banyak hambatan yang dihadapi penulis, namun berkat saran, kritik, serta dorongan semangat dari berbagai pihak, alhamdulillah Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Berkaitan dengan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Ibu Anisa Nur Amalina, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing yang selalu memberikan arahan dan pengajaran selama penyelesaian tugas akhir ini,
2. Ibu Dr. Hanindya Kusuma Artati, S.T., M.T. selaku dosen Penguji I yang telah memberikan masukan, arahan dan motivasi kepada penulis.
3. Bapak Muhammad Irfan Marasabessy, S.T., M.T. selaku dosen Penguji II yang telah memberikan masukan, arahan dan motivasi kepada penulis.
4. Orang tua dan keluarga penulis yang telah menaruh harapan dan memberikan banyak dukungan,
5. Reza Mella Sari yang selalu mengingatkan, memberikan semangat dan dukungan agar penulisan Tugas Akhir cepat terselesaikan,
6. Jamaah Darul AL – Dingo yang telah menemani masa perkuliahan penulis,
7. PB. Jakal Abadi yang selalu mengajak kegiatan positif selama masa perkuliahan.

Terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam pembuatan laporan ini. Penulis menyadari masih terdapat banyaknya kekurangan dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang dapat membangun serta menambah pengetahuan penulis dalam penyusunan Tugas Akhir. Diharapkan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan digunakan sebaik-baiknya bagi penulis dan semua pihak.

Wassalamualaikum Warrahmatullah.

Yogyakarta, 20 Juni 2026

Penulis

Naufal Arkan

(21511229)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xii
ABSTRAK	xiv
<i>ABTRACT</i>	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang masalah	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 Perkuatan Lereng Menggunakan <i>Soil Nailing</i>	4
2.2 Penggunaan Drainase Bawah Permukaan untuk Meningkatkan Stabilitas Tanah	5
2.3 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan	6
BAB III LANDASAN TEORI	9
3.1 Tanah	9
3.2 Stabilitas Lereng	16

3.3	Nilai Faktor Keamanan untuk Lereng	19
3.4	<i>Soil Nailing</i>	19
3.5	Drainase Bawah Permukaan	25
BAB IV METODE PENELITIAN		27
4.1	Tinjauan Umum	27
4.2	Lokasi Penelitian	27
4.3	Data Penelitian	28
4.4	Alur Penelitian	31
4.5	Alur Analisis PLAXIS 2D	33
4.6	Alur Analisis Geostudio (SLOPE / W)	34
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN		35
5.1	Kondisi Tanah Lereng	35
5.2	Analisis Stabilitas Lereng Tanpa Perkuatan Dengan PLAXIS 2D	40
5.3	Analisis Stabilitas Lereng Tanpa Perkuatan Dengan Geostudio (SLOPE/W)	43
5.4	Analisis Stabilitas Lereng dengan Metode <i>Fellenius</i>	45
5.5	Analisis Stabilitas Lereng Perkuatan <i>Soil Nailing</i>	48
5.6	Analisis Stabilitas Lereng Dengan Pengaturan Muka Air Tanah	57
5.7	Analisis Stabilitas Lereng Perkuatan <i>Soil Nailing</i> Disertai Pengaturan Muka Air Tanah	61
5.8	Pembahasan Hasil Analisis	64
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		69
6.1	Kesimpulan	69
6.2	Saran	70
DAFTAR PUSTAKA		72

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian <i>Soil Nailing</i> dan <i>Sub Drainase</i> Terdahulu dengan Penelitian Sekarang	7
Tabel 3.1 Klasifikasi Butiran Tanah	9
Tabel 3.2 Berat Jenis Tanah	11
Tabel 3.3 Nilai Koefisien Permeabilitas	13
Tabel 3.4 Modulus Elastisitas Tanah	14
Tabel 3.5 Nilai Faktor Keamanan Lereng	19
Tabel 4.1 Data Parameter Tanah	30
Tabel 5.1 Faktor Amplifikasi	37
Tabel 5.2 Parameter Tanah Untuk Analisis PLAXIS 2D	40
Tabel 5.3 Rekapitulasi Perhitungan Fellenius	47
Tabel 5.4 Nilai SF Tanpa Perkuatan	64
Tabel 5.5 Dimensi Soil Nailing	65
Tabel 5.6 Angka Aman Pada Soil Nailing	65
Tabel 5.7 Rekapitulasi SF Pada Setiap Kondisi Lereng Statis	66
Tabel 5.8 Rekapitulasi SF Pada Setiap Kondisi Lereng Dinamis	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Diagram Fase Tanah	10
Gambar 3.2 Garis Keruntuhan Mohr - Coulomb	15
Gambar 3.3 Gaya yang Bekerja pada Irisan	17
Gambar 3.4 Detail <i>Soil Nailing</i>	19
Gambar 3.5 Stabilitas Global	22
Gambar 3.6 Perubahan Gaya Tarik Setiap Baris	22
Gambar 3.7 Tahanan Cabut di Belakang Bidang Gelincir	23
Gambar 3.8 Drainase Bawah Permukaan	26
Gambar 4.1 Lokasi Penelitian	27
Gambar 4.2 Gambaran Lokasi Penelitian	28
Gambar 4.3 Potongan Melintang Lereng	29
Gambar 4.4 Lokasi Sampel Tanah	29
Gambar 4.5 Bagan Alir Penelitian	32
Gambar 4.6 Bagan Alir PLAXIS 2D	33
Gambar 4.7 Bagan Alir Geostudio	34
Gambar 5.1 Lapisan Tanah Potongan Lereng Melintang	35
Gambar 5.2 Klasifikasi Tanah USCS untuk Lapisan 1	36
Gambar 5.3 Klasifikasi Tanah USCS untuk Lapisan 2	36
Gambar 5.4 Hasil Penyelidikan Geolistrik pada Lokasi Penelitian	39
Gambar 5.5 Modeling Lereng pada PLAXIS 2D	41
Gambar 5.6 Kondisi Muka Air Tanah pada Lereng	42
Gambar 5.7 Output Analisis PLAXIS 2D Tanpa Perkuatan	42
Gambar 5.8 Output Analisis PLAXIS 2D Tanpa Perkuatan dengan Beban Gempa	43
Gambar 5.9 Pemodelan Lereng pada Geostudio (SLOPE/W)	43
Gambar 5.10 Output Analisis Geostudio (SLOPE/W) Tanpa Perkuatan	44

Gambar 5.11 <i>Output</i> Analisis Geostudio (SLOPE/W) Tanpa Perkuatan Kondisi Dinamis	44
Gambar 5. 12 Potongan Metode Fellenius	45
Gambar 5.13 Modeling <i>Soil Nailing</i>	48
Gambar 5.14 Koreksi Pengaruh Diameter Lubang Bor	49
Gambar 5.15 Grafik Desain	50
Gambar 5.16 Input Parameter <i>Soil Nailing</i>	53
Gambar 5.17 Pemodelan Lereng Dengan Perkuatan <i>Soil Nailing</i> Pada Aplikasi Geostudio (SLOPE/W)	54
Gambar 5.18 Output Analisis Perkuatan Lereng Dengan <i>Soil Nailing</i>	54
Gambar 5.19 Output Analisis Perkuatan Lereng Dengan <i>Soil Nailing</i> Kondisi Dinamis	55
Gambar 5. 20 Modeling Soil Nailing PLAXIS 2D	55
Gambar 5.21 Output Analisis Perkuatan Lereng dengan <i>Soil Nailing</i> (PLAXIS 2D) Tanpa Beban Gempa	56
Gambar 5.22 Output Analisis Perkuatan Lereng dengan <i>Soil Nailing</i> (PLAXIS 2D) Tanpa Beban Gempa	56
Gambar 5.23 Lereng Dengan Modifikasi Muka Air Tanah	58
Gambar 5.24 <i>Output</i> PLAXIS 2D Modifikasi Muka Air Tanah	58
Gambar 5.25 <i>Output</i> PLAXIS 2D Modifikasi Muka Air Tanah Dengan Beban Gempa	59
Gambar 5.26 Lereng Dengan Modifikasi Muka Air Tanah (Geostudio)	59
Gambar 5.27 <i>Output</i> Geostudio Modifikasi Muka Air Tanah	60
Gambar 5.28 <i>Output</i> Geostudio Modifikasi Muka Air Tanah Dengan Beban Gempa	60
Gambar 5.29 <i>Output</i> Analisis Perkuatan Soil Nailing Dengan Pengaturan Muka Air Tanah	62
Gambar 5.30 <i>Output</i> Analisis Perkuatan Soil Nailing Dengan Pengaturan Muka Air Tanah Menggunakan Beban Gempa	62
Gambar 5.31 <i>Output</i> Analisis Perkuatan Soil Nailing dengan Pengaturan Muka Air Tanah Tanpa Beban Gempa (PLAXIS 2D)	63

Gambar 5.32 <i>Output</i> Analisis Perkuatan <i>Soil Nailing</i> dengan Pengaturan Muka Air Tanah dengan Beban Gempa (PLAXIS 2D)	63
Gambar 5.33 Grafik Perbandingan Nilai SF Kondisi Statis	68
Gambar 5.34 Grafik Perbandingan Nilai SF Kondisi Dinamis	68

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

USCS	= <i>Unified Soil Classification System</i>
AASHTO	= <i>American Association of State Highway and Transportation Official</i>
LL	= Batas cair
PI	= Indeks plastisitas
PL	= Batas plastis
w	= Kadar air (%)
W	= Berat total tanah
G _s	= Berat jenis
γ _s	= Berat volume air
e	= Angka pori
γ _d	= Berat volume kering
E	= Modulus elastisitas (MPa)
μ	= Poisson's Ratio
τ	= Kuat geser dalam (kN/m ²)
c	= Kohesi (kN/m ²)
φ	= Sudut geser dalam (derajat)
W _i	= Berat irisan tanah ke-i (kN)
U _i	= Tekanan air pori pada irisan ke-i (kN/m ²)
Q	= Beban mati di atas lereng (kN/m)

L_e	= Panjang nail bar di belakang bidang longsor (m)
β	= Kemiringan lereng ($^{\circ}$)
i	= Kemiringan pemasangan sudut nail ($^{\circ}$)
T	= Gaya tarik ijin nail bar, dan
R_{po}	= Daya dukung tarik nail bar
K_s	= Modulus reaksi lateral tanah
H	= Tinggi tanah (m)
Σh	= Tekanan horizontal pada kedalaman tanah yang ditinjau (kN/m^2)
S_v	= Jarak tulangan arah vertikal (m)
S_h	= Jarak tulangan arah horizontal (m)
F_y	= Daya dukung tulangan (MPa)
K_a	= Koefisien tekanan aktif lateral
L_p	= Panjang tulangan <i>nail</i> (m)
D_{dh}	= Diameter lubang bor (m)

ABSTRAK

Kabupaten Banjarnegara merupakan wilayah dengan kondisi topografi didominasi perbukitan dan lereng terjal sehingga memiliki tingkat kerawanan longsor yang tinggi. Berdasarkan data Baperlitbang Banjarnegara (2023), sekitar 37,04% wilayah Kabupaten Banjarnegara berada pada ketinggian 100–1000 mdpl dan termasuk jalur pegunungan di bagian tengah Provinsi Jawa Tengah sisi barat. Tingginya kejadian longsor dipengaruhi oleh kondisi morfologi berupa perbukitan dengan kemiringan landai hingga terjal, litologi yang memiliki daya resap air tinggi, serta curah hujan tinggi yang mempercepat proses pelapukan tanah. Penelitian ini membahas fenomena longsor yang terjadi pada ruas jalan Gripit– Kalibening, Dusun Bendawuluh, Desa Beji, Kecamatan Banjarmangu, Kabupaten Banjarnegara. Pergerakan tanah pada lokasi tersebut menyebabkan badan jalan mengalami penurunan hingga ± 1 meter. Kondisi lereng tersusun oleh batuan yang telah mengalami pelapukan cukup parah dan terdapat mata air yang mengalir terus-menerus tanpa sistem drainase yang memadai sehingga meningkatkan gaya geser pada lereng. Hingga saat ini, penanganan longsor pada lokasi tersebut belum dilakukan secara optimal sehingga pergerakan tanah masih terus terjadi. Oleh karena itu, diperlukan analisis terhadap metode perkuatan lereng yang tepat guna meningkatkan stabilitas lereng dan meminimalkan risiko longsor pada lokasi penelitian.

Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis stabilitas lereng eksisting pada ruas jalan Gripit–Kalibening menggunakan aplikasi PLAXIS 2D dan GeoStudio (SLOPE/W). Analisis dilakukan untuk mengetahui kondisi tanah serta kestabilan lereng berdasarkan nilai faktor keamanan (safety factor/SF) serta perilaku deformasi tanah pada lereng eksisting. Upaya penanganan longsor yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi perkuatan *soil nailing* dan penggunaan drainase bawah permukaan. Desain *perkuatan soil nailing* mengacu pada standar SNI 8460:2017. Hasil analisis dari kedua metode tersebut kemudian dibandingkan untuk mengetahui metode penanganan yang paling efektif dalam meningkatkan nilai SF lereng pada lokasi penelitian.

Hasil analisis perkuatan lereng pada ruas jalan Gripit – Kalibening, Dusun Bendawuluh, Kecamatan Banjarmangu, Kabupaten Banjarnegara, menunjukkan bahwa pergerakan tanah terjadi akibat kondisi lereng jenuh air dan batuan yang telah mengalami pelapukan. Berdasarkan parameter tanah dan klasifikasi USCS, lapisan tanah pada lokasi penelitian termasuk jenis CH. Hasil penyelidikan geolistrik menunjukkan adanya kondisi tanah jenuh air di bawah permukaan lereng serta lapisan batuan breksi keras yang berpotensi menjadi bidang gelincir. Analisis stabilitas lereng eksisting dilakukan menggunakan PLAXIS 2D dan GeoStudio (SLOPE/W) dengan hasil nilai safety factor (SF) masing-masing sebesar 1,046 dan 1,029, sehingga belum memenuhi kriteria keamanan lereng ($SF > 1,5$). Oleh karena itu, dilakukan analisis penanganan menggunakan metode perkuatan *soil nailing* dan rekayasa muka air tanah. Desain *soil nailing* mengacu pada SNI 8460:2017 dengan panjang *nail* 6 m pada lereng atas dan 12 m pada lereng bawah, sudut pemasangan 20° , serta diameter bor 150 mm. Hasil analisis menunjukkan bahwa perkuatan *soil nailing* menghasilkan nilai SF sebesar 1,578 sehingga memenuhi kriteria keamanan lereng, namun penerapannya dinilai kurang efektif karena panjang *nail* yang dibutuhkan melebihi 1,2H. Sementara itu, analisis rekayasa muka air tanah menggunakan PLAXIS 2D menunjukkan bahwa penurunan muka air tanah sebesar 7 meter meningkatkan nilai SF menjadi 1,47, meskipun belum memenuhi syarat keamanan. Berdasarkan hasil penelitian, metode *soil nailing* memberikan peningkatan stabilitas lereng yang lebih baik dibandingkan rekayasa muka air tanah.

Kata kunci : Stabilitas Lereng, *Soil Nailing*, Drainase Bawah Permukaan, PLAXIS 2D

ABSTRACT

Banjarnegara Regency is characterized by hilly topography and steep slopes, resulting in high landslide susceptibility. Approximately 37.04% of the regency lies at elevations between 100 and 1,000 m above sea level along the central mountain corridor of western Central Java (Baperlitbang Banjarnegara, 2023). High landslide incidence is attributed to morphology (hills with gentle to steep slopes), permeable lithology, and high rainfall that accelerates weathering. This study investigates a landslide affecting the Gripit–Kalibening road section in Bendawuluh Hamlet, Beji Village, Banjarmangu District, where ground movement caused roadway settlement of approximately 1 m. The slope comprises severely weathered rock and hosts a continuous spring without adequate drainage, increasing driving shear forces. Remediation has been incomplete, allowing continued movement; thus, effective reinforcement measures are required.

Slope stability of the existing condition was analyzed using PLAXIS 2D and GeoStudio (SLOPE/W) to determine soil behavior, safety factor (SF), and deformation characteristics. Investigated remediation measures included soil nailing (designed per SNI 8460:2017) and subsurface drainage (groundwater table control). Field and laboratory data indicate the soil layers are classified as CH under the USCS. Geoelectrical survey results reveal saturated subsurface conditions beneath the slope and a hard breccia layer that may form a potential sliding plane.

Stability analysis of the existing slope yielded SF values of 1.046 (PLAXIS 2D) and 1.029 (SLOPE/W), below the acceptable criterion ($SF > 1.5$). Soil nailing was designed with nail lengths of 6 m in the upper slope and 12 m in the lower slope, 20° installation angle, and 150 mm bore diameter. This measure increased the SF to 1.578, meeting the safety criterion; however, required nail lengths exceed 1.2H, reducing practicality. Groundwater table lowering of 7 m (PLAXIS 2D analysis) raised the SF to 1.47, which still does not satisfy the safety requirement. Comparison of mitigation methods indicates that soil nailing provides a greater improvement in slope stability than groundwater control, although implementation constraints must be considered.

Keywords : *slope stability, soil nailing, groundwater control, PLAXIS 2D*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang masalah

Indonesia merupakan negara dengan potensi longsor yang tinggi, hal ini bisa terjadi dikarenakan kondisi tektonik yang membentuk morfologi tinggi, patahan, batuan vulkanik yang mudah rapuh dan didorong dengan kondisi iklim di Indonesia yang merupakan tropis basah (Naryanto, 2017).

Tanah longsor adalah suatu gerakan berpindahnya material berupa batuan, puing – puing, tanah atau campuran dari semuanya, yang bergerak ke arah yang lebih rendah atau keluar dari lereng tersebut. Prosesnya dimulai ketika air meresap ke dalam tanah lalu tanah akan bertambah bobotnya. Jika air tersebut menembus hingga lapisan tanah yang kedap air dimana lapisan itu menjadi bidang gelincir tanah, maka tanah menjadi licin dan tanah pelapukan di atasnya akan bergerak mengikuti lereng dan keluar lereng (BPSDMD JATENG, 2025).

Kabupaten Banjarnegara terkenal dengan banyak memiliki kawasan perbukitan, sehingga banyak infrastruktur yang dibangun di atas lereng yang cukup terjal. Menurut Baperlitbang Banjarnegara (2023), Kabupaten Banjarnegara berada di jalur pegunungan di bagian tengah Provinsi Jawa Tengah sisi barat yang terbentang dari arah barat ke timur dan wilayah Kabupaten Banjarnegara sekitar (37,04%) berada pada ketinggian antara 100 – 1000 mdpl. Hal tersebut juga menjadi salah satu alasan mengapa banyak terjadi kasus longsor di Kabupaten Banjarnegara. Menurut Kementerian ESDM (2014), ada 3 faktor yang menyebabkan seringnya terjadi longsor di Kabupaten Banjarnegara yaitu, morfologi daerah yang secara umum merupakan perbukitan dengan kemiringan landai hingga terjal, litologi yang diperkirakan yang bersifat tinggi peresapan air, curah hujan yang tinggi yang menyebabkan terjadinya pelapukan terhadap tanah.

Penelitian ini membahas salah satu fenomena longsor yang terjadi di Kabupaten Banjarnegara tepatnya pada ruas jalan Gripit – Kalibening, Bendawuluh, Beji, Kecamatan Banjarmangu. Pada ruas jalan Gripit – Kalibening dusun Bendawuluh terjadi pergerakan tanah yang menyebabkan ambles ± 1 meter. Kondisi batuan pada lereng yang sudah pelapukan yang cukup parah dan juga adanya mata air di lokasi longsor yang mengalir tanpa henti tanpa adanya drainase yang memadai sehingga gaya geser pada lereng tersebut tentu akan meningkat (Rifa'i dkk.,2019). Penanganan terhadap longsor pada lokasi tersebut belum ada penanganan yang tepat sehingga gerakan tanah terus terjadi hingga sekarang, tidak waktu pasti kapan dimulainya pergerakan tanah pada lokasi tersebut. Maka dari itu diperlukan analisis terhadap perkuatan lereng yang tepat untuk menangani pergerakan tanah yang terus terjadi.

1.2 Rumusan Masalah

Berikut adalah rumusan masalah berdasarkan latar belakang di atas.

1. Bagaimana jenis tanah di jalan Gripit – Kalibening berdasarkan data parameter tanah dan hasil pengujian Geolistrik?
2. Berapa faktor keamanan stabilitas lereng eksisting di ruas jalan Gripit – Kalibening yang mengalami tanah longsor?
3. Berapa dimensi perkuatan lereng yang digunakan ?
4. Berapa faktor keamanan lereng yang sudah diperkuat dengan *soil nailing* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Berikut adalah tujuan penelitian berdasarkan rumusan masalah yang ada.

1. Untuk mengetahui jenis tanah di jalan Gripit – Kalibening.
2. Untuk mengetahui faktor aman stabilitas lereng eksisting di ruas jalan Gripit – Kalibening yang mengalami tanah longsor.
3. Untuk mengetahui dimensi perkuatan lereng yang digunakan.

4. Untuk mengetahui faktor keamanan lereng yang sudah diperkuat dengan *soil nailing*.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan salah satu opsi untuk penanganan longsor.
2. Memberikan informasi mengenai kondisi eksisting lereng yang terjadi longsor.
3. Penelitian ini dapat dijadikan bahan pembelajaran mengenai penanganan kasus tanah longsor bagi penulis maupun pembaca.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan penelitian yang ditetapkan agar pembahasan masalah pada penelitian ini tetap terfokus dalam batasan tertentu. Berikut adalah batasan - batasan yang ditetapkan pada penelitian ini.

1. Lokasi penelitian pada ruas jalan Gripit – Kalibening, Bendawuluh, Beji, Barjarmangu, Banjarnegara, Jawa tengah, dengan koordinat garis lintang : 109.676866, garis bujur : -7.313283.
2. Area yang ditetapkan untuk penelitian ada pada Gambar 4.1.
3. Data yang digunakan pada penelitian ini berasal dari BAPERLITBANG Kab. Banjarnegara serta menggunakan korelasi untuk melengkapi data yang dibutuhkan.
4. Analisis yang dilakukan pada penelitian hanya meliputi kondisi awal stabilitas lereng serta analisis perkuatan lereng.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perkuatan Lereng Menggunakan *Soil Nailing*

Tarakashima dkk. (2023) telah melakukan penelitian mengenai penggunaan *soil nailing* pada lereng yang mengalami longsor, kondisi stabilitas lereng sebelum dilakukan perkuatan didapatkan nilai faktor aman menggunakan metode Bishop $0,273 < 1,5$ dan metode elemen hingga $0,201 < 1,5$. Dilakukan percobaan perhitungan *soil nailing* dengan tiga variasi sudut kemiringan pemasangan paku yaitu 10° ; 15° ; 20° ; didapatkan nilai faktor aman sebesar 1,286; 2,195; 1,540. Dapat disimpulkan pemasangan *soil nailing* dapat meningkatkan nilai faktor aman yang sangat jauh dari kondisi awal serta sudut kemiringan pemasangan sangat mempengaruhi efektifitas dari *soil nailing*.

Balu dkk. (2025) melakukan penelitian penanganan erosi lereng dengan *soil nailing*, adanya erosi lereng pada jalan Gorontalo *Outer Ring Road* mengakibatkan tanah menjadi tidak stabil dan kehilangan kesuburan, faktor hujan juga membantu percepatan erosi. Rata – rata erosi pada lereng utara sebesar 70,55 ton/tahun dan lereng selatan sebesar 22,35 ton/tahun, untuk menangani hal tersebut dilakukan analisis perkuatan menggunakan *soil nailing* dengan kondisi awal lereng selatan dengan beban gempa adalah $FK = 0,74$ dan lereng utara dengan beban gempa adalah $FK = 0,66$. Menggunakan syarat $FK = 1,1$ sesuai dengan SNI 8460:2017, setelah dilakukan perkuatan lereng didapatkan $FK = 1,79$ untuk lereng selatan dengan beban gempa minimum dan $FK = 1,69$ untuk lereng utara dengan beban gempa minimum. Didapatkan kesimpulan dengan perkuatan lereng *soil nailing* analisis stabilitas lereng dengan perkuatan sudah syarat.

Iftikhar (2024) melakukan penelitian pada salah satu lereng di Cibereum, Kabupaten Cianjur yang mengalami kelongsoran yang diakibatkan oleh gempa magnitudo senilai 5,6. Penelitian ini memilih analisis perkuatan lereng

menggunakan *soil nailing*, menggunakan metode *Fellenius* yang dibandingkan dengan perhitungan program *PLAXIS 2D V20* untuk menganalisis stabilitas lereng tanpa perkuatan. Nilai keamanan didapatkan pada analisis stabilitas lereng tanpa perkuatan adalah 1,56 untuk metode *Fellenius* dan 1,606 untuk perhitungan program *PLAXIS 2D V20*, hasil perhitungan keduanya merupakan nilai keamanan lereng tanpa beban gempa, apabila menggunakan beban gempa lereng mengalami keruntuhan sehingga memerlukan perkuatan. Menggunakan analisis *soil nailing* dengan sudut kemiringan 10°, 15°, 20°, setelah dilakukan analisis nilai keamanan tanpa gempa menggunakan program *PLAXIS 2D V20* didapatkan hasil dengan angka keamanan terbesar yaitu 2,55 menggunakan *soil nailing* dengan kemiringan 20° dan panjang *nail* 50 m.

2.2 Penggunaan Drainase Bawah Permukaan untuk Meningkatkan Stabilitas Tanah

Fitriani (2023) memilih menggunakan sub drainase untuk melakukan penanganan dalam kasus tanah ambles pada ruas jalan Bumiayu – Sirampong Kabupaten Brebes, penyebab terjadinya longsor adalah meningkatnya kandungan air dalam lapisan tanah karena resapan air hujan yang masuk melalui pori – pori tanah yang berada di permukaan. Pada kasus ini penulis melakukan menambahkan penggunaan Geotekstil yang berperan sebagai stabilisator dan menahan material agar tidak larut masuk ke sub drainase. Analisis menggunakan pemodelan *PLAXIS 2D* didapatkan kondisi stabilitas tanah sebelum dan sesudah penggunaan Geotekstil dan sub drainase, nilai SF yang didapatkan sebelum perkuatan $SF\ 0,99 < 1,5$ (Tidak aman) lalu setelah dilakukan perkuatan didapatkan $SF\ 3,45 > 1,5$ (Aman).

Penggunaan drainase bawah tanah cocok untuk tanah dengan jenuh air. Qolby dkk. (2025) melakukan penelitian analisis kestabilan lereng pada tanah berlempung di Desa X, pada saat lereng dalam kondisi kering memiliki kekuatan geser yang cukup namun akan menurun secara signifikan pada saat hujan, perhitungan yang dilakukan menggunakan metode *Bishop* mendapatkan nilai $FK = 1,68$ pada kondisi kering dan $FK = 1,24$ pada kondisi jenuh. Dapat disimpulkan nilai faktor keamanan

pada kondisi jenuh berada di bawah nilai aman yang direkomendasikan, menandakan bahwa lereng tidak stabil pada saat hujan, penulis memberikan rekomendasi mitigasi berupa penggunaan sistem drainase bawah permukaan yang dapat berperan sebagai pengendali muka air tanah untuk mempertahankan kestabilan lereng dalam kondisi jenuh.

2.3 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Akan Dilakukan

Perbandingan antara penelitian ini dengan beberapa penelitian terdahulu ditampilkan pada Tabel 2.1 dan 2.2 berikut.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian *Soil Nailing* dan *Sub Drainase* Terdahulu dengan Penelitian Sekarang

Penelitian Terdahulu						Penelitian yang dilakukan
Peneliti	Tarakashima dkk. (2023)	Balu dkk. (2025)	Iftikhar (2024)	Fitriani (2023)	Qolby dkk. (2025)	Arkan (2025)
Judul Penelitian	Perkuatan <i>Soil Nailing</i> pada Lereng Singajaya Garut	Analisis Besaran Erosi dan Stabilitas Lereng dengan Perkuatan <i>Soil Nailing</i> .	Analisis Stabilitas Lereng Dengan Perkuatan <i>Soil Nailing</i> Menggunakan Program PLAXIS 2D V20 (Studi Kasus : Tebing Cibeureum, Kabupaten Cianjur)	Analisis Penggunaan Geotekstil dan Sub Drainase Dalam Penanganan Amblesan pada Ruas Jalan BUMIAYU-SIRAMPOG KAB. Brebes	Analisis Kestabilan Lereng Pada Tanah Berlempung Menggunakan Metode Bishop Studi Kasus di Desa X	Analisis Pengaruh Soil Nailing dan Pengaturan Muka Air Tanah terhadap Stabilitas Lereng Menggunakan Metode Keseimbangan Batas dan Metode Elemen Hingga
Tujuan Penelitian	Untuk mengetahui nilai keamanan lereng dan merencanakan perkuatan untuk menaikkan nilai keamanan lereng pada lereng Singajaya Garut	Untuk mengetahui besaran erosi dan stabilitas lereng pada jalan Gorontalo <i>Outer Ring Road</i>	Untuk mengetahui kondisi stabilitas lereng sebelum dan sesudah dilakukan perkuatan <i>soil nailing</i> pada lereng Cibeureum, Kabupaten Cianju	Untuk mengetahui penyebab terjadinya amblesan serta menganalisis metode perkuatan yang tepat untuk mengani amblesan dan mengetahui stabilitas tanah sebelum dan sesudah perkuatan	Menganalisis stabilitas lereng si Desa X dan mengetahui faktor – faktor yang mempengaruhinya	Untuk mengetahui faktor keamanan lereng eksisting serta mengetahui faktor keamanan lereng setelah diperkuat

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian *Soil Nailing* dan *Sub Drainase* Terdahulu dengan Penelitian Sekarang

Penelitian Terdahulu						Penelitian yang dilakukan
Peneliti	Tarakashima dkk. (2023)	Balu dkk. (2025)	Iftikhar (2024)	Fitriani (2023)	Qolby dkk. (2025)	Arkan (2025)
Metode Penelitian	Metode Bishop dan metode elemen hingga dengan aplikasi Geostudio Slope/W	Metode Bishop dan USLE	Metode <i>Fellenius</i> dengan bantuan program PLAXIS 2D V20	Metode <i>Back analysis</i> dan program PLAXIS 2D V20 untuk perancangan perkuatan	Metode Bishop	Menggunakan PLAXIS 2D dan Geostudio (SLOPE/W)
Hasil Penelitian	Mendapatkan nilai faktor keamanan yang berbeda dari pemasangan <i>soil nailing</i> dengan variasi sudut kemiringan, yaitu 1,286 untuk sudut 10°; 2,195 untuk sudut 15° dan 1,540 untuk sudut 20°	Mendapatkan desain perkuatan <i>soil nailing</i> yang meningkatkan faktor keamanan lereng dari FK = 0,78 ke FK = 1,87 dan dari FK = 0,66 ke FK = 1,73	Mendapatkan kondisi terbaik lereng dengan nilai angka keamanan 2,55 tanpa beban gempa dan 1,102 dengan beban gempa karena metode perbaikan sudut lereng dan penggunaan <i>soil nailing</i> sudut 20° dan panjang 50m	Mendapatkan metode pelaksanaan yang tepat untuk perkuatan serta mengetahui faktor keamanan sebelum dan setelah dilakukan perkuatan, yaitu SF = 0,99 menjadi SF = 3,45 > 1,5	Mendapati bahwa faktor keamanan lereng pada kondisi kering 1,68 > 1,5 dan menurun pada saat kondisi jenuh menjadi 1,24 < 1,5 hal ini menunjukkan bahwa tekanan air pori menjadi faktor dominan dalam penurunan stabilitas lereng	

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Tanah

Tanah adalah kumpulan mineral, bahan organik dan endapan yang lepas dan terletak di atas batuan dasar (Hardiyatmo, 2017). Menurut Das (1995) Tanah adalah material yang terdiri dari butiran mineral – mineral padat yang berasal dari pelapukan bahan organik dan terdapat ruang kosong di antara partikel – partikel yang diisi oleh zat cair dan gas.

3.1.1 Klasifikasi Tanah

Menurut DAS (1995) Variasi dari ukuran partikel tanah cukup banyak. Berdasarkan ukuran partikel tanah dapat disebut sebagai kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*), atau lempung (*clay*). Untuk menjelaskan batasan klasifikasi tanah terdapat beberapa sistem seperti *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), *U.S. Department of Agriculture* (USDA), *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) dan oleh *U.S. Army Corps of Engineering* dan *U.S. Bureau of Reclamation* yang kemudian menghasilkan apa yang disebut sebagai *Unified Soil Classification System* (USCS).

Tabel 3.1 Klasifikasi Butiran Tanah

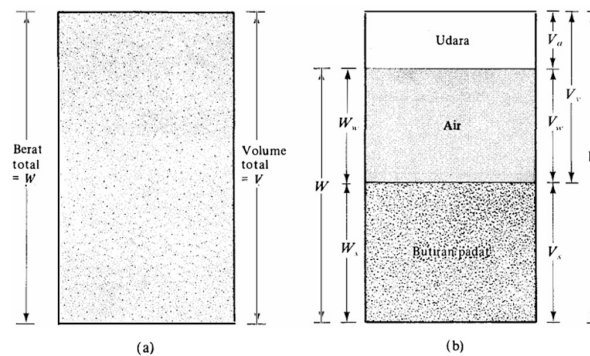
Nama Golongan	Ukuran butiran (mm)			
	Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung
MIT	>2	2 – 0,06	0,06 – 0,002	< 0,002
USDA	>2	2 – 0,05	0,05 – 0,002	< 0,002
AASHTO	76,2 - 2	2 – 0,075	0,075 – 0,002	< 0,002
USCS	76,2 – 4,75	4,75 – 0,075	Halus (yaitu lanau dan lempung < 0,0075.)	

(Sumber : Das, 1995)

3.1.2 Parameter Tanah

1. Berat Volume Tanah

Berat volume tanah adalah perbandingan antara berat tanah dengan berat keseluruhan volume tanah. Volume tanah terdapat dalam tiga kondisi, yaitu kondisi tanah kering, kondisi tanah basah, kondisi tanah jenuh.



Gambar 3.1 Diagram Fase Tanah

(Sumber : Das, 1995)

Berat volume tanah basah (γ_b) adalah perbandingan antara berat butiran tanah, air dan udara (W) dengan volume total tanah. Persamaan berat volume tanah basah dapat dilihat pada Persamaan 3.1

$$\gamma_b = \frac{W}{V} \quad (3.1)$$

Berat volume tanah kering adalah perbandingan berat tanah kering (W_s) dengan volume total tanah (V). Persamaan berat volume tanah kering dapat dilihat pada Persamaan 3.2

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (3.2)$$

Berat volume tanah jenuh adalah perbandingan antara berat tanah yang seluruh pori – porinya terisi oleh air dengan volume total tanah (V). Persamaan berat volume tanah jenuh dapat dilihat pada persamaan 3.3

$$\gamma_{sat} = \frac{W(\text{tanah} + \text{air})}{V} \quad (3.3)$$

Dimana :

W = Berat total tanah meliputi komponen padat, air, dan udara (kN)

W_s = Berat tanah padat (m^3)

V = Volume total tanah (m^3)

γ_b = Berat volume tanah basah (kN/m^3)

γ_d = Berat volume tanah kering (kN/m^3)

γ_{sat} = Berat volume tanah jenuh (kN/m^3)

2. Berat Jenis Tanah (G_s)

Berat jenis adalah perbandingan antara berat volume tanah padat dan volume air. Persamaan berat jenis tanah dapat dilihat pada persamaan 3.4

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (3.4)$$

Dimana :+

γ_s = Berat volume tanah padat

γ_w = Berat volume air

Berat jenis tanah dapat digunakan untuk mengetahui jenis tanah sesuai angka yang didapat, dapat dilihat pada tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Berat Jenis Tanah

No	Jenis Tanah	Berat Jenis (G_s)
1	Kerikil	2,65 – 2,68
2	Pasir	2,65 – 2,68
3	Lanau anorganik	2,62 – 2,68
4	Lempung organik	2,58 – 2,65
5	Lempung anorganik	2,68 – 2,75
6	Humus	1,37
7	Gambut	1,25 – 1,80

(Sumber : Hardiyatmo, 2017)

3. Batas – batas konsistensi

Batas – batas konsistensi tanah adalah kadar air dalam butiran tanah yang menyebabkan perubahan sifat fisik tanah. Pada awal tahun 1900 seorang ilmuwan bernama Atterberg membuat penelitian mengenai sifat konsistensi tanah berbutir halus pada kadar air yang bervariasi. Berdasarkan kandungan air yang ada di dalam tanah, tanah dapat terbagi dalam empat keadaan, yaitu : padat, semi padat, plastis dan cair.

a. Batas Cair (LL)

Keadaan tanah yang di mana kandungan air di dalamnya mencapai keadaan batas antara plastis dan cair. Untuk mengetahui batas cair tanah perlu dilakukan pengujian menggunakan alat *Cassagrande* yang digerakkan dengan alat untuk menggerakkan cawan kuningan hingga tanah menutupi garis yang telah digoreskan sepanjang 12,7 mm dan pada pukulan ke 25 didefinisikan sebagai batas cair.

b. Batas Plastis (PL)

Keadaan tanah di mana mencapai batas terendah keplastisannya, apabila tanah digulung sampai dengan diameter (3,2 mm) menjadi retak – retak.

c. Batas Susut (SL)

Keadaan di mana tanah mencapai keadaan keseimbangan apabila dilakukan penambahan tidak akan menyebabkan perubahan volume. Berhentinya perubahan volume massa tanah itulah yang disebut sebagai batas susut.

4. Permeabilitas (k)

Permeabilitas tanah adalah kemampuan tanah untuk mengalirkan air. Tanah adalah butiran padat yang terdapat pori – pori di dalamnya yang saling terhubung satu sama lain sehingga air dapat mengalir dari titik yang memiliki energi yang tinggi menuju titik yang memiliki energi yang lebih rendah (Das, 1995). Pentingnya mengetahui permeabilitas tanah sangat penting sebelum dilakukan pekerjaan di tanah tersebut, karena dengan mengetahui permeabilitas tanah kita dapat mengetahui penganan yang tepat untuk tanah tersebut. Nilai koefisien permeabilitas

berbeda pada setiap jenis tanahnya, berikut adalah nilai koefisien tanah berdasarkan jenis tanahnya yang di tunjukan pada Tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.3 Nilai Koefisien Permeabilitas

No	Jenis Tanah	k (mm/detik)
1	Butiran kasar	10 - 1000
2	Kerikil halus, butiran kasar bercampur pasir sedang	0,001 - 10
3	Pasir halus, lanau longgar	0,00001 – 0,001
4	Lanau padar, lanau berlempung	0,000001 – 0,00001
5	Lempung berlanau, lempung	0,000000001 – 0,000001

(Sumber: Hardiyatmo, 2017)

5. Sudut Geser dalam

Sudut geser dalam adalah sudut yang terbentuk dari adanya hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser pada tanah atau batuan. Apabila nilai sudut geser dalam semakin besar pada suatu material maka material tersebut akan lebih tahan terhadap tegangan dari luar (Aripin dkk., 2022). Nilai sudut geser dalam dapat diperoleh melalui pengujian triaxial dan pengujian geser langsung.

6. Kohesi

Kohesi adalah nilai yang didapatkan uji triaxial dan uji geser langsung, di mana nilai kohesi merupakan gaya tarik menarik antara partikel tanah dengan sudut geser tanah, fungsi nilai kohesi juga untuk menentukan ketahanan tanah terhadap deformasi akibat adanya tegangan yang bekerja pada tanah, penyebab terjadinya deformasi adalah adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser (Aripin dkk., 2022). Nilai kohesi juga penting digunakan pada perhitungan untuk mencari kuat geser tanah.

7. Modulus Elastisitas Tanah

Modulus elastisitas adalah hubungan antara tegangan dan regangan dalam batas elastis tanah. Berikut adalah nilai modulus elastisitas tanah berdasarkan jenisnya, dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Modulus Elastisitas Tanah

Jenis Tanah	E (kN/m²)
<i>Soft clay</i>	1800 - 3500
<i>Hard clay</i>	6000 - 14000
<i>Loose sand</i>	10000 - 28000
<i>Dense sand</i>	3500 - 70000

(Sumber: Das & Sobhan, 2018)

3.1.3 Kuat Geser Tanah

Saat tanah mengalami perubahan bentuk akibat beban dari tanah itu sendiri ataupun dari gaya eksternal, tegangan geser muncul di dalam tanah. Ketika gaya eksternal ini bertambah, tegangan geser tersebut dapat menyebabkan terjadinya pergeseran di sepanjang bidang dalam tertentu sehingga tanah menjadi runtuh. Pada titik ini, gaya yang menahan perubahan bentuk tersebut disebut sebagai ketahanan geser, dengan ketahanan geser maksimum yang mampu ditunjukkan tanah disebut sebagai kekuatan geser. Kekuatan geser ini sangat berperan dalam aspek seperti kestabilan lereng tanggul, kapasitas dukung fondasi, tekanan tanah dan merupakan salah satu sifat utama dalam mekanika tanah (Aripin dkk., 2022). Kekuatan geser tanah tersebut terdiri dari dua elemen, yaitu kohesi dan sudut geser internal yang

bekerja antar partikel tanah, yang dihitung dengan menggunakan persamaan *Mohr – Coulomb* pada persamaan 3.5 berikut.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (3.5)$$

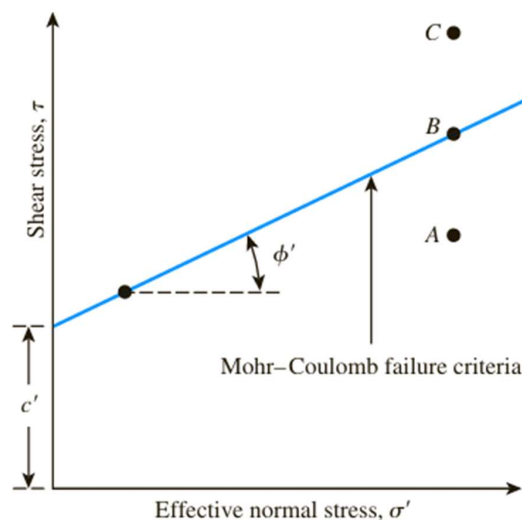
Di mana :

τ adalah kekuatan geser tanah (kN/m^2)

c adalah kohesi tanah (kN/m^2)

σ adalah tegangan normal efektif pada bidang geser (kN/m^2)

ϕ adalah sudut geser dalam tanah ($^\circ$)



Gambar 3.2 Garis Keruntuhan *Mohr - Coulomb*
(Sumber: Das & Sobhan, 2018)

Persamaan (3.5) menjelaskan bahwa keruntuhan geser pada tanah bergantung pada hubungan antara tegangan normal efektif (σ') dan tegangan geser (τ). Jika kondisi tegangan berada di bawah titik keruntuhan (titik A), tanah masih stabil dan tidak mengalami keruntuhan. Jika berada tepat pada titik keruntuhan (titik B), tanah

mulai mengalami keruntuhan geser. Sementara itu, kondisi tegangan di atas titik keruntuhan (titik C) tidak mungkin terjadi karena tanah telah mengalami keruntuhan sebelum mencapai kondisi tersebut.

3.1.4 Pengujian Geolistrik

Menurut SNI 2528:2012 pengujian geolistrik adalah eksplorasi air tanah yang bertujuan sebagai penentu atau sebagai acuan untuk menentukan jenis batuan atau tanah, batas lapisan batuan atau tanah dan batas lapisan air tanah. Pengujian ini bekerja dengan cara menyalurkan arus listrik ke dalam tanah, arus listrik disalurkan melalui elektroda arus dan beda potensial diukur dengan elektroda potensial.

3.2 Stabilitas Lereng

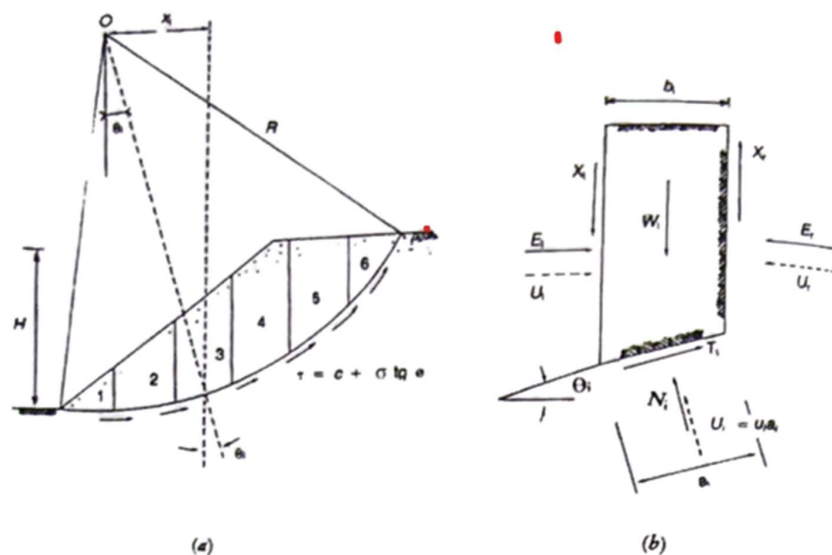
Pada permukaan tanah tidak datar, gaya gravitasi cenderung untuk mengarahkan pergerakan tanah ke bawah. Jika gaya gravitasi yang bekerja lebih besar dari perlawanan terhadap geser daripada yang dapat dikerahkan oleh tanah, maka akan terjadi longsor (Hardiyatmo, 2018). Analisis stabilitas lereng diperlukan untuk mendapat angka aman lereng agar tidak terjadi longsor serta mengetahui kekuatan yang tepat untuk lereng yang rawan longsor. Menurut (Terzaghi, 1950) Kelongsoran lereng dapat terjadi karena adanya pengaruh dari luar maupun pengaruh dari dalam, pengaruh luar yaitu karena adanya gaya geser yang bertambah tanpa adanya penambahan kuat geser tanah, terdapat juga beberapa penyebab lain kelongsoran lereng sebagai berikut :

1. Beban yang meningkat pada tanah baik dari bangunan yang ada di atasnya maupun air yang masuk ke dalam pori tanah dan air yang menggenang di atas lereng
2. Berkurangnya volume tanah pada kaki lereng akibat adanya pengurangan dengan sengaja di kaki lereng
3. Pekerjaan yang merubah kemiringan lereng hingga melebihi batas kemiringannya
4. Berubahnya posisi muka air secara cepat (*rapid drydown*)

5. Masuknya air ke dalam retakan yang mengakibatkan tekanan lateral pada tanah bertambah
6. Gempa bumi
7. Meningkatnya kadar pada tanah , bertambahnya tekanan pada air pori tanah ataupun bertambahnya tekanan karena adanya genangan air di atas tanah sehingga menyebabkan tahanan geser pada tanah

3.2.1 Analisis Stabilitas Lereng dengan Metode Fellenius

Analisis stabilitas tanah bertujuan untuk mencari faktor aman lereng pada bidang longsor yang kritis (Hardiyatmo, 2018). Metode Fellenius adalah salah satu metode analisis stabilitas lereng yang menggunakan cara membagi masa tanah pada bidang longsor menjadi irisan vertikal untuk mengetahui keseimbangan pada setiap irisannya. Berikut adalah gambaran pembagian massa tanah pada bidang longsor pada Gambar 3.2.



Gambar 3.3 Gaya yang Bekerja pada Irisan

(Sumber : Hardiyatmo, 2018)

Dimana :

X_r, X_l = Gaya geser sepanjang irisan

E_r, E_l = Gaya normal efektif sepanjang sisi irisan

T_i = Gaya geser efektif pada dasar irisan

N_i = Gaya normal efektif pada dasar irisan

U_l, U_r = Tekanan air pori pada sisi irisan

U_i = Tekanan air pori pada dasar irisan

Analisis menggunakan metode Fellinius (1927) menganggap gaya yang bekerja pada kedua sisi irisan dianggap resultan nol pada arah yang lurus bidang longsoran. Untuk menentukan nilai faktor aman dengan metode ini dapat menggunakan Persamaan 3.6 berikut.

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

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} cl + (W_i \cos \theta_i - u_i a_i) \tan \phi}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (3.6)$$

Dimana :

F = Faktor aman

c = Kohesi tanah (kN/m²)

ϕ = Sudut geser dalam tanah (°)

W_i = Berat irisan tanah ke-i (kN)

U_i = Tekanan air pori pada irisan ke-i (kN/m²)

θ_i = Sudut yang didefinisikan dalam Gambar 3.2 (°)

3.3 Nilai Faktor Keamanan untuk Lereng

Menurut SNI 8460:2017 mensyaratkan untuk lereng tanah berdasarkan pada pertimbangan biaya dan risiko kegagalan lereng akibat tingkat ketidakpastian kondisi analisis stabilitas lereng, Berikut adalah standar nilai faktor keamanan untuk lereng yang ditunjukkan pada Tabel 3.4.

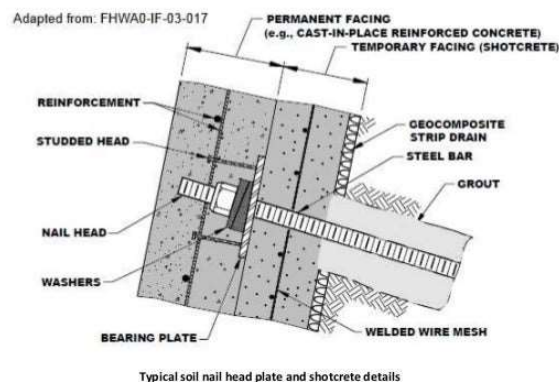
Tabel 3.5 Nilai Faktor Keamanan Lereng

Kondisi lereng	Nilai Faktor Keamanan minimal
Lereng tanpa beban gempa	1,1
Lereng dengan beban gempa	1,5

(Sumber : SNI 8460:2017)

3.4 Soil Nailing

Soil nailing merupakan perkuatan lereng yang bekerja secara pasif tanpa menggunakan tegangan awal, perkuatan ini menggunakan *nail bar* (batang paku) yang ditancapkan ke dalam tanah dengan cara melakukan pengeboran ataupun melakukan pemancangan. Detail *soil nailing* dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.4 Detail Soil Nailing

(Sumber : FHWA – NHI – 14 – 007, 2015)

3.4.1 Persyaratan Teknis

Berikut adalah beberapa persyaratan untuk melakukan perkuatan tipe *soil nailing* yang di atur dalam SNI 8460: 2017.

1. Kemiringan Dinding

Kemiringan dinding berfungsi untuk mengurangi sedikit kebutuhan panjang *nail bar*, dinding yang memiliki kemiringan $\sim 80^\circ$ dari horizontal atau 10% dari vertikal dapat mengurangi 10% - 15% kebutuhan panjang *nail bar* dibandingkan dengan dinding tegak vertikal.

2. Kemiringan *Nail*

Tipikal Kemiringan *nail bar* berkisar antara 10° - 20° di bawah bidang horizontal, untuk kemiringan $< 10^\circ$ sebaiknya dihindari karena akan menyebabkan terbentuknya pori di dalam *grout*, sehingga kapasitas tarik *nail* akan berkurang dan akan menyebabkan lebih mudah terkena korosi, apabila kemiringan *nail* terlalu besar akan menyebabkan berkurangnya keefektifan *nail* dalam menahan gaya lateral.

3. Panjang *Nail Bar*

Tipikal panjang *nail bar* berkisar antara $0,6H$ hingga $1,2H$, di mana H merupakan kedalaman galian atau tinggi timbunan. Panjang *nail bar* $< 0,6H$ jarang digunakan karena jarang ditemukan yang memenuhi stabilitas terhadap geser. Untuk panjang *nail bar* yang sudah melebihi $1,2H$ maka di definisikan tanah tersebut tidak cocok menggunakan perkuatan *soil nailing*.

4. Spasi antar *nail*.

Pemasangan *Nail bar* diperlukan jarak agar setiap *nail* bekerja secara maksimal dan efektif, untuk pemasangan baris pertama tidak boleh kurang 1,1 m untuk menghindari longsor pada bagian awal tahapan, untuk baris selanjutnya menggunakan 1,5m untuk “*drilled and grouted soil nailing*” dan 1 m – 1,2 m untuk “*driven soil nailing*”, jarak horizontal dan vertikal di samakan.

5. Diameter Lubang Bor

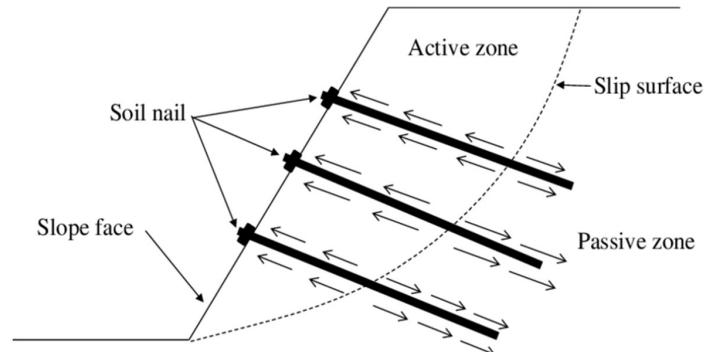
Tipikal lubang bor berkisar antara 100 mm sampai dengan 200 mm, ketentuan ini di khususkan untuk “*drilled and grouted soil nailing*”

3.4.2 Analisis Stabilitas

Analisis *soil nailing* terdapat beberapa tinjauan yang perlu dilakukan, hal ini bertujuan untuk mencari angka aman lereng setelah dilakukan perkuatan *soil nailing*. Berikut adalah analisis stabilitas yang perlu dilakukan berdasarkan SNI 8460:2017.

1. Analisis Stabilitas Global

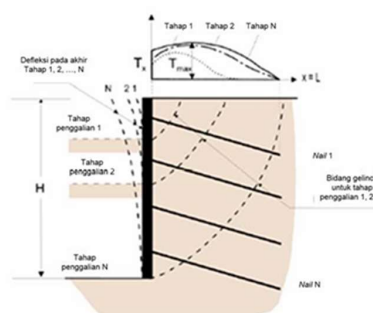
Analisis stabilitas global adalah analisis terhadap stabilitas lereng yang mencakup beberapa bidang gelincir terhadap keseluruhan *nail bar* tanpa memotongnya menjadi satu – persatu. Analisis stabilitas global berguna untuk memastikan seluruh bagian lereng yang diperkuat *soil nailing* sudah aman terhadap longsor. Lereng yang telah diperkuat *soil nailing* apabila telah memenuhi faktor keamanan minimum, $FK_{gs} \text{ min}$, apabila dilakukan analisis untuk jangka panjang maka harus memenuhi $FK_{gs} > 1,5$ dan apabila melakukan analisis untuk jangka pendek maka harus memenuhi $FK_{gs} > 1,3$ Apabila dilakukan analisis dengan beban gempa maka harus memenuhi $FK_{gs} > 1,1$. Untuk gambaran stabilitas global dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut.



Gambar 3.5 Stabilitas Global
(Sumber : FHWA – NHI – 14 – 007, 2015)

2. Analisis Stabilitas Internal

Analisis stabilitas internal adalah tinjauan stabilitas terhadap beberapa atau seluruh *nail bar*. Setiap *nail bar* pasti memiliki gaya tarik maksimum sehingga perlu dilakukan analisis stabilitas internal guna mencari angkanya, setiap *nail bar* memiliki gaya tarik maksimum yang berbeda sehingga terlalu banyak apabila setiap *nail* dianalisis, maka disarankan untuk analisis stabilitas internal menggunakan aplikasi atau program, untuk setiap bertambahnya baris gaya tarik maksimum semakin besar, untuk gambaran perubahan gaya tarik dapat dilihat pada Gambar 3.5 berikut.



Gambar 3.6 Perubahan Gaya Tarik Setiap Baris
(Sumber : FHWA – NHI – 14 – 007, 2015)

3. Analisis stabilitas terhadap *basal heave*

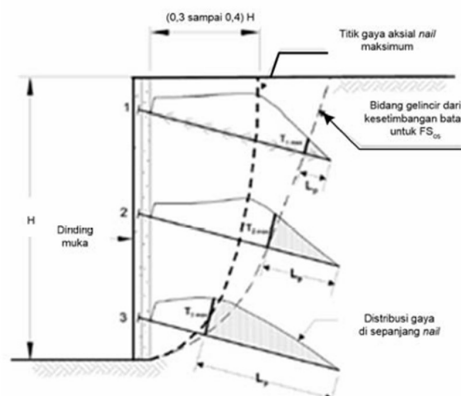
Perkuatan *soil nailing* umumnya tidak cocok dilakukan pada tanah yang ada tanah lunak, tetapi untuk kasus galian biasanya terdapat tanah kohesif di dasar galian maka perlu dilakukan evaluasi terhadap potensi *basal heave*, mensyaratkan faktor keamanan untuk jangka pendek $FK_{heave} \geq 2$ dan untuk jangka panjang harus memenuhi $FK_{heave} \geq 2,5$.

4. Analisis stabilitas terhadap gelincir arah lateral

Analisis ini dilakukan untuk membandingkan tahanan terhadap gelincir disertai gaya dorong lateral dan adanya tambahan beban, perkuatan dengan *soil nailing* dinyatakan aman terhadap gelincir arah lateral jika memenuhi $FK_{sliding} \geq 1,5$ jika tidak menggunakan beban gempa dan $FK_{sliding} \geq 1,1$ jika menggunakan beban gempa

5. Tinjauan *nail* terhadap cabut

Pada bagian bidang gelincir *nail* terdapat tahanan cabut, tahanan cabut (L_p) yang terbentuk dapat dilihat pada Gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.7 Tahanan Cabut di Belakang Bidang Gelincir

(Sumber : FHWA – NHI – 14 – 007, 2015)

Untuk menghitung tahanan cabut dapat menggunakan persamaan 3.7 berikut.

$$R_{po} = \pi C_a D L_p \quad (3.7)$$

Dimana :

R_{po} = Tahanan cabut

C_a = Tahanan friksi (bond) pada antarmuka *grout* – tanah ; Untuk tanah kohesif $0,5 C_u$; Untuk tanah pasir atau non kohesif menggunakan $\sigma'_v K_s \tan \phi$

C_u = Kohesi tak terdrainase

σ'_v = Tekanan *overburden* efektif pada level *nail*

K_s = Koefisien tekanan tanah 0,7

ϕ_a = Sudut geser tanah-grout $0,8 \phi'$

ϕ = Sudut geser dalam efektif tanah

D = Diameter lubang bor

L_p = panjang nail di belakang bidang gelincir yang memberikan tahanan cabut.

Perhitungan dilakukan untuk setiap baris *nail*, langkah selanjutnya adalah menentukan faktor keamanan terhadap cabut (FK_{po}) menggunakan persamaan 3.8 berikut.

$$FK_{po} = R_{po} / T_{max} \quad (3.8)$$

Dimana :

FK_{po} = Faktor keamanan terhadap cabut

R_{po} = Tahanan cabut

T_{max} = Gaya tarik *nail* maksimum

Perkuatan dianggap aman terhadap cabut apabila memenuhi $FK_{po} > 2,0$ tanpa beban gempa, apabila menggunakan beban gempa maka harus memenuhi $FK_{po} > 1,5$.

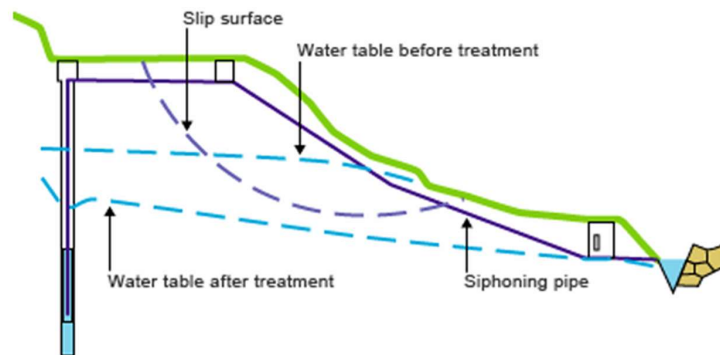
3.5 Drainase Bawah Permukaan

Muka air tanah merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi kestabilan lereng. Keberadaan muka air tanah perlu diperhatikan karena dapat menjadi penyebab terjadinya ketidakstabilan lereng. Karakteristik tanah dipengaruhi secara signifikan oleh kadar air yang terdapat di dalam pori-porinya. Variasi kadar air dapat mengubah berbagai sifat geoteknik tanah, seperti perubahan volume, kuat geser, kemampatan, plastisitas, serta konduktivitas hidrolik. Perubahan sifat-sifat tersebut akan semakin nyata seiring dengan meningkatnya perubahan kadar air, sehingga kondisi ini berpengaruh terhadap perilaku mekanis dan stabilitas tanah (Wardana, 2011).

Salah satu penanganan yang dilakukan guna mengantisipasi pengaruh muka air tanah adalah menggunakan drainase bawah permukaan, teknologi ini mengandalkan rekayasa hidrolika menggunakan drainase bertujuan untuk mengurangi gerakan tanah aktif, salah satu yang digunakan metode drainase bawah permukaan model shipon (Syahbana dkk.,2014). Sistem drainase shipon sendiri bertujuan untuk memindahkan air dari satu elevasi yang tinggi ke yang lebih rendah, agar sistem ini bekerja secara maksimal dalam menstabilkan lereng ada beberapa persyaratan yang harus dipenuhi, yaitu :

1. Perbedaan elevasi antara hulu pipa dan titik tertinggi shipon tidak boleh melebihi 9 m.
2. Saluran shipon harus selalu ditempatkan pada lokasi yang selalu jenuh air agar sistem drainase berfungsi dengan baik.
3. Drainase ini cocok untuk menjaga kestabilan lereng dengan cara menahan pemicu dari ketidakstabilan lereng yaitu kenaikan muka air tanah.

Untuk contoh penerapan dari drainase bawah permukaan dapat dilihat pada Gambar 3.8 berikut.



Gambar 3.8 Drainase Bawah Permukaan

(Sumber : Syahbana dkk.,2014)

BAB IV

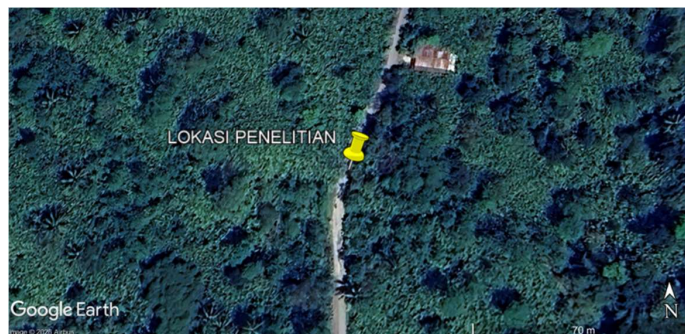
METODE PENELITIAN

4.1 Tinjauan Umum

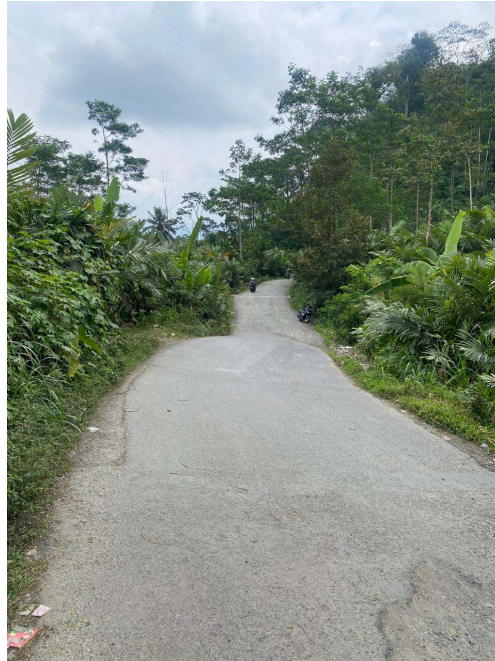
Penelitian ini dilakukan di Dusun Bendawuluh, Desa Beji, Kecamatan Banjarmangu, Kabupaten Banjarnegara tepatnya pada ruas jalan Beji – Kalibening. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi tanah pada lokasi longsor selanjutnya mencari angka aman terhadap stabilitas lereng eksisting di sekitar lokasi longsor lalu melakukan analisis faktor keamanan lereng ketika sudah dilakukan perkuatan. Analisis yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan program PLAXIS 2D dan Geostudio (SLOPE/W) guna mengetahui nilai faktor keamanan lereng setelah dilakukan perkuatan, hasil akhir yang diperoleh dari penelitian ini adalah perbandingan nilai faktor keamanan lereng setelah dilakukan perkuatan dengan *soil nailing* dan drainase bawah permukaan.

4.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlokasi di Dusun Bendawuluh, Desa Beji, Kecamatan Banjarmangu, Kabupaten Banjarnegara, Provinsi Jawa Tengah, pada ruas jalan Beji – Kalibening. Gambar 4.1 adalah lokasi penelitian



Gambar 4.1 Lokasi Penelitian
(Sumber : Google Earth)



Gambar 4.2 Gambaran Lokasi Penelitian

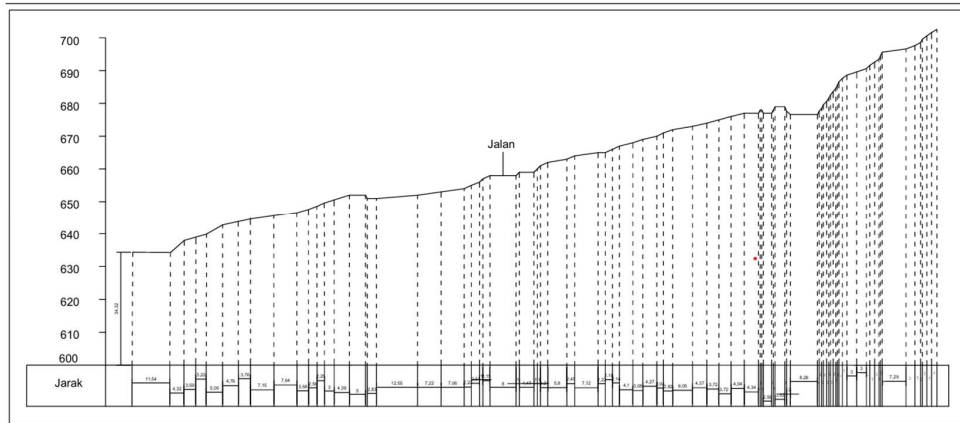
Gambar 4.2 merupakan lokasi terjadinya pergerakan tanah, sehingga menyebabkan jalan yang menghubungkan daerah beji dengan kalibening mengalami kerusakan sepanjang ± 100 meter.

4.3 Data Penelitian

Lereng yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi dua bagian yaitu lereng di atas jalan dan di bawah jalan, untuk lereng atas memiliki tinggi 45 m dengan kemiringan lereng 25° dan lereng bawah memiliki tinggi 24 m dengan kemiringan lereng 25° . Berikut adalah data yang akan digunakan pada penelitian ini.

1. Gambar potongan melintang lereng.

Berikut adalah bagian potongan melintang lereng pada titik penelitian yang digunakan untuk melakukan analisis stabilitas lereng.



Gambar 4.3 Potongan Melintang Lereng

2. Data parameter tanah

Pengambilan data parameter tanah dilakukan pengambilan pada 2 titik yang akan ditulis selengkapnya pada Tabel 4.1 dan lokasi pengambilan sampel titik S1 dan S2 terdapat pada gambar 4.4 berikut.



Gambar 4.4 Lokasi Sampel Tanah

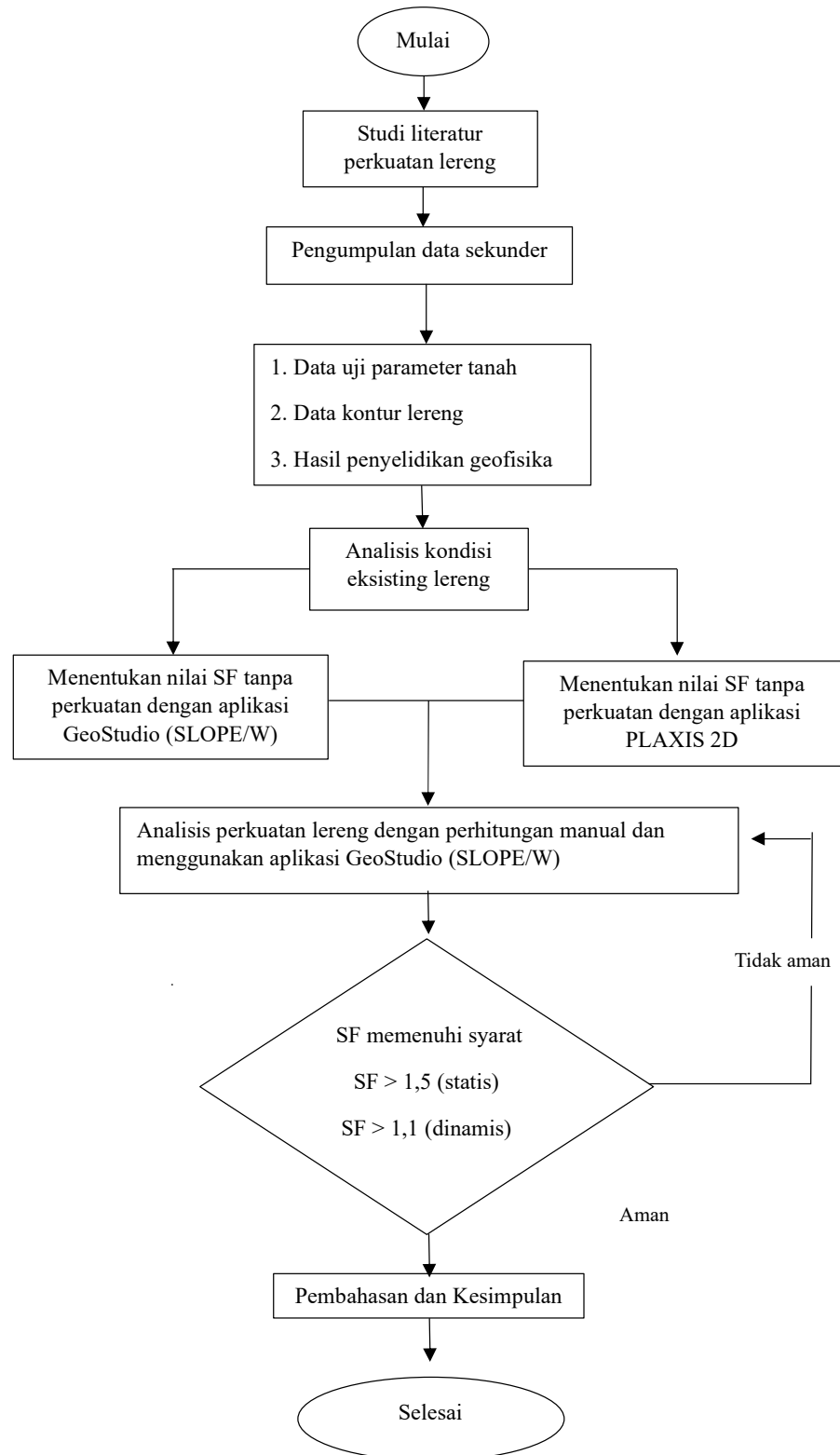
Data parameter tanah yang digunakan merupakan data hasil dari pengujian lab menggunakan sampel tanah yang diambil sesuai dengan lokasi pada Gambar 4.4

Tabel 4.1 Data Parameter Tanah

No	Parameter Uji	Titik S1	Titik S2	Satuan
1	Berat jenis	2,34	2,47	-
2	Kadar air	44,35	39,63	%
3	Batas cair (LL _{oven})	50	59	%
4	Batas plastis	15	27	%
5	Batas susut	1,37	1,41	%
6	Kepadatan lapangan	1,551	1,586	gr/cm ³
7	Permeabilitas	7,59e - 07	1,18e - 08	m/s
8	Kuat geser tanah UU kohesi	9	30	kPa
	Sudut Geser	29	26	°
9	Triaksil UU			
10	Kohesi	11	4	kPa
	Sudut Gesek	3	9	°
	Ukuran Butiran tanah			
10	Lempung	0,77	0,0	%
	Lanau	69,71	44,07	%
	Pasir	29,52	55,93	%
	Kerikil	0,0	0,0	%

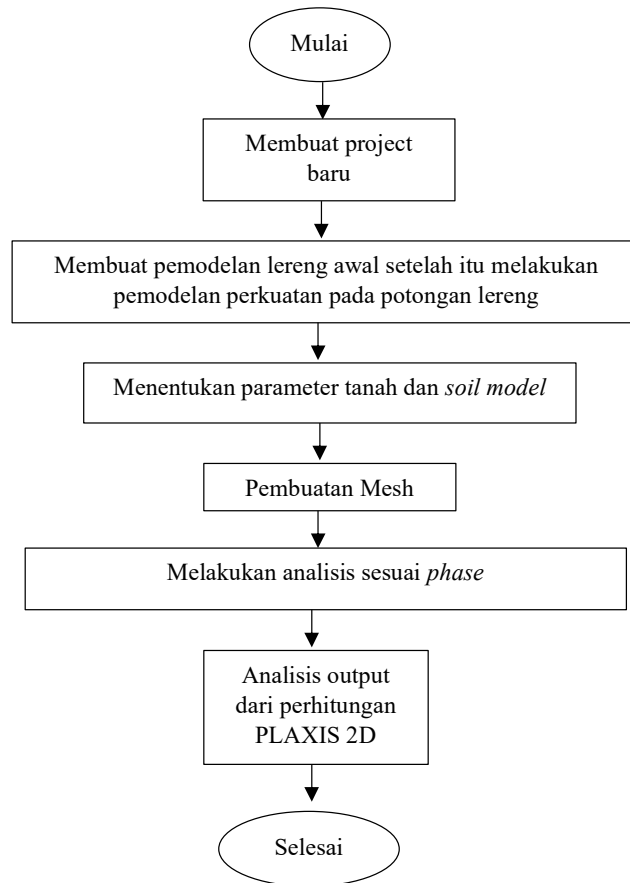
4.4 Alur Penelitian

Awal penelitian melakukan studi literatur mengenai analisis perkuatan lereng dan program PLAXIS 2D, setelah itu melakukan pengambilan data sekunder, yang didapatkan yaitu data pengujian lapangan, peta kontur eksisting, formasi tanah lapangan, data kandungan air pada tanah, serta kajian yang telah dilakukan oleh pemerintah yang berkaitan. Setelah didapatkan data tanah dilanjutkan untuk mencari angka aman menggunakan aplikasi PLAXIS 2D, setelah didapatkan angka aman dari aplikasi PLAXIS 2D dilanjutkan menghitung angka aman dengan menggunakan aplikasi GeoStudio (SLOPE/W)) sebagai perbandingan nilai angka aman, langkah selanjutnya melakukan desain perkuatan menggunakan metode *soil nailing* dan metode drainase bawah permukaan. Setelah melakukan perancangan dari keduanya dilakukanlah analisis stabilitas dari kedua perkuatan tersebut, serta melakukan perbandingan dari kedua perkuatan tersebut dicari mana angka aman yang paling besar.



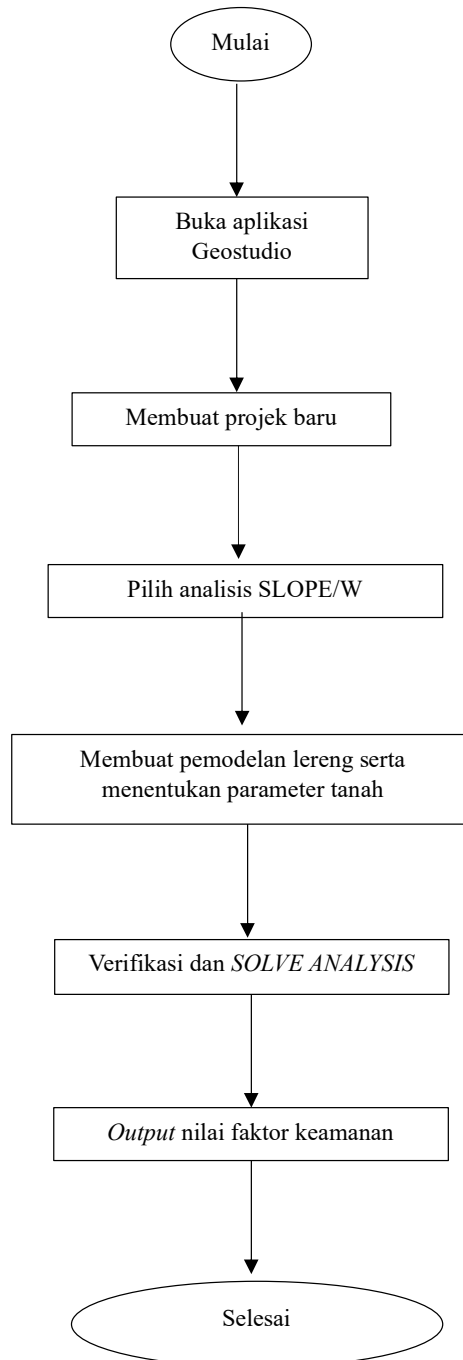
Gambar 4.5 Bagan Alir Penelitian

4.5 Alur Analisis PLAXIS 2D



Gambar 4.6 Bagan Alir PLAXIS 2D

4.6 Alur Analisis Geostudio (SLOPE / W)



Gambar 4.7 Bagan Alir Geostudio

BAB V

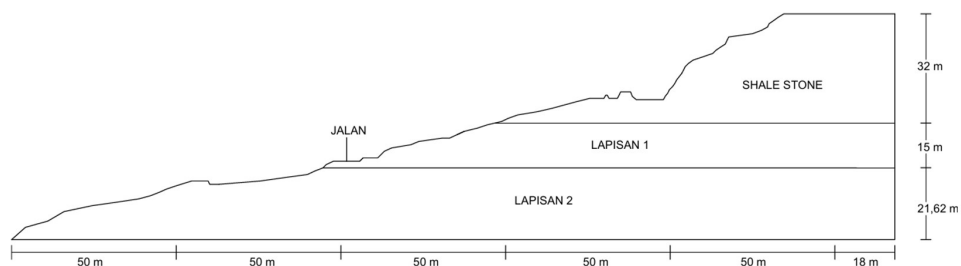
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Kondisi Tanah Lereng

Pada bagian ini dibahas kondisi Tanah lereng pada area penelitian yang meliputi parameter tanah dan jenis tanah pada setiap lapisan pada potongan melintang lereng yang dibuat. Data yang digunakan diperoleh dari “ Laporan Akhir Kajian Penahan Longsor Beji, kabupaten Banjarnegara 2023 “ dan jurnal / penelitian pendukung lainnya.

5.1.1 Jenis Tanah Setiap Lapisan Potongan Melintang Lereng

Berdasarkan data yang didapat, terdapat 3 lapisan tanah yang ada pada potongan lereng melintang di titik penelitian. Berikut adalah lapisan tanah pada potongan melintang lereng pada gambar 5.1.



Gambar 5.1 Lapisan Tanah Potongan Lereng Melintang

Untuk selanjutnya melakukan klasifikasi tanah menggunakan sistem USCS berdasarkan parameter tanah yang ada pada Tabel 4.1 untuk titik S2 merupakan parameter tanah untuk lapisan 1 dan titik S1 adalah parameter tanah untuk lapisan 2 , menurut data hasil pengeboran pada Kajian Penahan Longsor Beji Kabupaten Banjarnegara Tahun 2023 lapisan pertama pada potongan lereng tersebut adalah

lapisan *shale stone*, untuk hasil klasifikasi tanah dapat dilihat pada Gambar 5.2 (lapisan 1) dan Gambar 5.3 (lapisan 2) berikut.

Divisi Utama	Simbol Kelompok	Nama Jenis	Nama Jenis
Tanah berbutir kasar 50% lebih banyak dari 200 (0.075 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir-kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus
		GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir-kerikil atau tidak mengandung butiran halus
	Kerikil banyak kandungan butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir-lempung
		GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil pasir-lempung
	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus
		SP	Pasir gradasi buruk, pasir kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus
Pasir lebih dari 50% dan fraksi kasar lebih banyak dari 4.75 mm	Kerikil banyak kandungan 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 berlempung
		CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus ('lean clays')
		OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah
		MH	Lanau tak organik atau pasir halus diatomae, lanau elastis
Tanah berbutir halus 50% atau lebih, lebih banyak dari 200 (0.075 mm)		CH	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk ('fat clays')
		OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi
Tanah dengan kadar organik tinggi	P _i	Gambut ('peat') dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi	

Gambar 5.2 Klasifikasi Tanah USCS untuk Lapisan 1

Divisi Utama	Simbol Kelompok	Nama Jenis	Nama Jenis
Tanah berbutir kasar 50% lebih banyak dari 200 (0.075 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir-kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus
		GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir-kerikil atau tidak mengandung butiran halus
	Kerikil banyak kandungan butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir-lempung
		GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil pasir-lempung
	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus
		SP	Pasir gradasi buruk, pasir kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus
Pasir lebih dari 50% dan fraksi kasar lebih banyak dari 4.75 mm	Kerikil banyak kandungan 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 berlempung
		CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus ('lean clays')
		OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah
		MH	Lanau tak organik atau pasir halus diatomae, lanau elastis
Tanah berbutir halus 50% atau lebih, lebih banyak dari 200 (0.075 mm)		CH	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk ('fat clays')
		OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi
Tanah dengan kadar organik tinggi	P _i	Gambut ('peat') dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi	

Gambar 5.3 Klasifikasi Tanah USCS untuk Lapisan 2

Menurut hasil klasifikasi tanah dengan sistem USCS di dapatkan untuk lapisan 1 berjenis SC (Pasir berlempung) dan lapisan 2 berjenis CH (Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, *fat clay*).

5.1.2 Ketentuan gempa pada lokasi penelitian

Menurut data gempa yang didapatkan dari desain spektra Indonesia yang diterbitkan oleh Kementerian PUPR bahwa daerah Banjarnegara memiliki nilai PGA batuan dasar = 0,3253, sedangkan PGA permukaan yang digunakan untuk analisis lereng didapatkan dari Tabel 5.1 dengan kelas situs Tanah lunak (SE).

Tabel 5.1 Faktor Amplifikasi

Kelas situs	PGA ≤ 0,1	PGA = 0,2	PGA = 0,3	PGA = 0,4	PGA ≥ 0,5
Batuan keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan (SB)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Tanah keras (SC)	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
Tanah sedang (SD)	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
Tanah lunak (SE)	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9

(Sumber : SNI 8460:2017)

Berdasarkan Tabel 5.1 nilai PGA = 0,3253 g berada pada kategori PGA $0,3 < 0,3253 < 0,4$ maka dilakukan interpolasi linear untuk mendapatkan nilai F_{PGA} yang sesuai.

$$y = y_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} (y_2 - y_1)$$

dimana :

x = nilai PGA batuan dasar

$$x_1 = \text{PGA } 0,3$$

$$x_2 = \text{PGA } 0,4$$

$$y_1 = \text{nilai } F_{\text{PGA}} \text{ pada } x_1$$

$$y_2 = \text{nilai } F_{\text{PGA}} \text{ pada } x_2$$

$$\text{maka } F_{\text{PGA}} = 1,2 + \frac{0,3253 - 0,3}{0,4 - 0,3} (0,9 - 1,2)$$

$$F_{\text{PGA}} = 1,124$$

Setelah didapatkan nilai F_{PGA} untuk PGA batuan = 0,3253 langkah selanjutnya adalah mencari nilai PGA permukaan dengan persamaan berikut.

$$\text{PGA}_{\text{Permukaan}} = F_{\text{PGA}} \times \text{PGA}_{\text{Batuan}}$$

$$\text{Maka, } \text{PGA}_{\text{Permukaan}} = 1,124 \times 0,3253$$

$$\text{PGA}_{\text{Permukaan}} = 0,366 \text{ g}$$

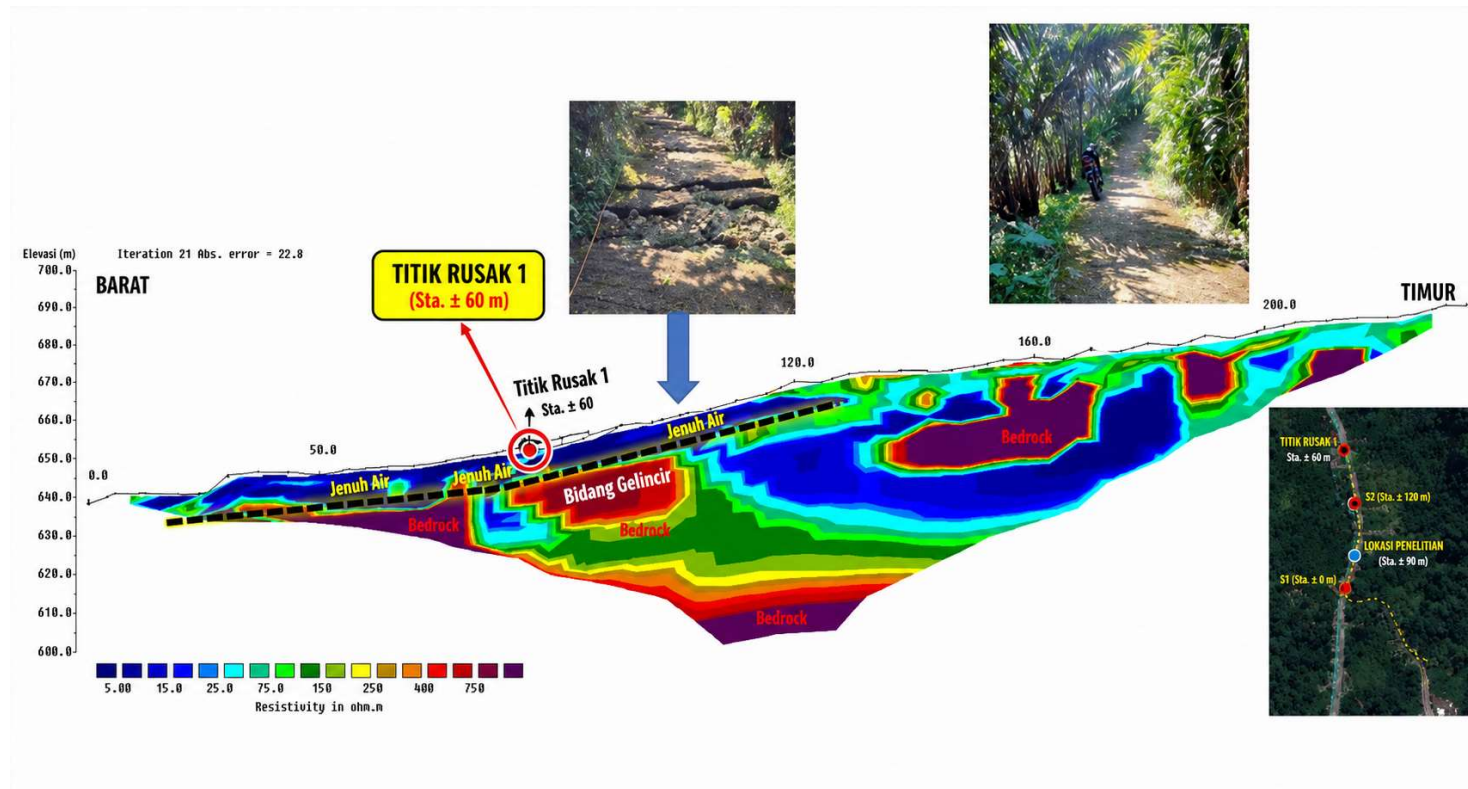
$$kh = 0,5 \times \text{PGA}_{\text{Permukaan}}$$

$$= 0,183$$

Setelah didapatkan nilai $kh = 0,183$ yang kemudian akan digunakan untuk melakukan analisis lereng menggunakan aplikasi PLAXIS 2D dan Geostudio.

5.1.3 Hasil penyelidikan Geolistrik pada lokasi penelitian

Penyelidikan Geolistrik yang dilakukan oleh Balai Air Tanah, Direktorat Air Tanah dan Air Baku, Kementerian PUPR pada 4 – 5 April 2023, dengan panjang lintasan 240 m. Berikut adalah hasil dari penyelidikan Geolistrik ditunjukkan pada Gambar 5.4. Pada penelitian ini hasil dari penyelidikan Geolistrik digunakan untuk mengetahui muka air tanah serta daerah lereng yang jenuh air, dapat dilihat pada Gambar 5.4 “titik rusak 1” merupakan jalan dan di bawah titik tersebut merupakan area jenuh air yang dapat menyebabkan kegagalan lereng.



Gambar 5.4 Hasil Penyelidikan Geolistrik pada Lokasi Penelitian
 (Sumber : Kajian Penahan Longsor Beji, kabupaten Banjarnegara 2023)

5.2 Analisis Stabilitas Lereng Tanpa Perkuatan Dengan PLAXIS 2D

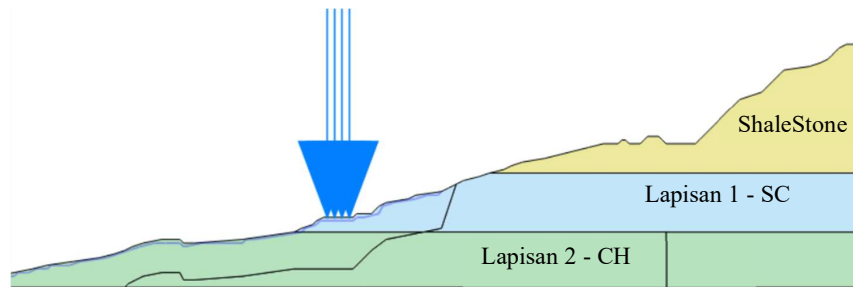
Untuk melakukan analisis dengan PLAXIS 2D yang dilakukan pertama adalah membuat pemodelan lereng. Pemodelan lereng dibuat seperti pada Gambar 4.3. Setelah membuat pemodelan lereng lalu memasukkan parameter tanah sesuai dengan lapisan, untuk parameter yang digunakan ada pada Tabel 5.1. Setiap lapisan memiliki warna yang berbeda, ditunjukkan pada gambar 5.5 berikut.

Tabel 5.2 Parameter Tanah Untuk Analisis PLAXIS 2D

LAPISAN 1	
γ_{sat} (Kn/m ³)	16,55
γ_{unsat} (Kn/m ³)	15,80
E50 ref (Kn/m ²)	1800
E _{oed} ref (Kn/m ²)	1800
E _{ur} ref (Kn/m ²)	5400
c (Kn/m ²)	30
ϕ°	26
LAPISAN 2	
γ_{sat} (Kn/m ³)	15,63
γ_{unsat} (Kn/m ³)	14,67
E50 ref (Kn/m ²)	3500
E _{oed} ref (Kn/m ²)	3500
E _{ur} ref (Kn/m ²)	10500
c (Kn/m ²)	11
ϕ°	29

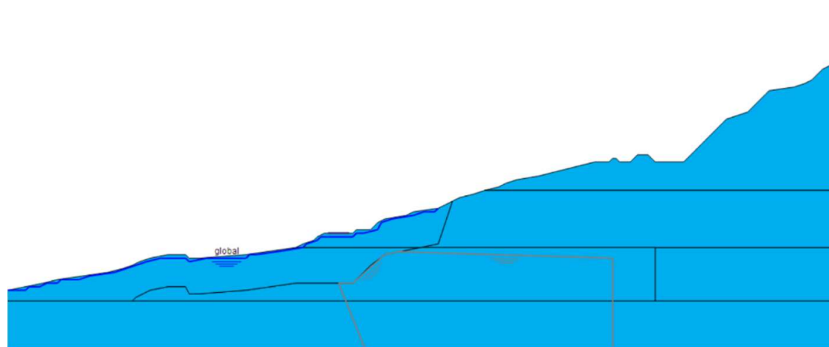
Lanjutan Tabel 5.2 Parameter Tanah Untuk Analisis PLAXIS 2D

Shalestone	
γ_{sat} (Kn/m ³)	23,93
γ_{unsat} (Kn/m ³)	23,24
E (Kn/m ³)	21,49E6
c (Kn/m ²)	350
φ°	35



Gambar 5.5 Modeling Lereng pada PLAXIS 2D

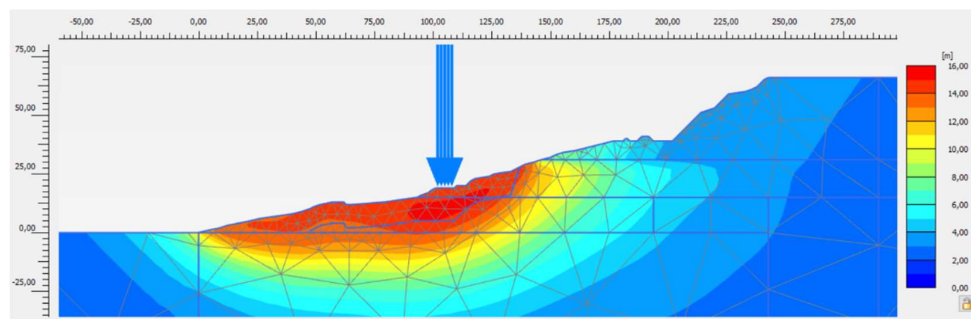
Langkah selanjutnya adalah menentukan *mesh* yang akan digunakan, langkah ini diperlukan untuk menentukan tingkat ketelitian hasil analisis pada setiap bagian tanah. Setelah menentukan tingkat *mesh* yang digunakan lalu membuat muka air tanah pada potongan lereng yang ditunjukkan pada Gambar 5.6 berikut.



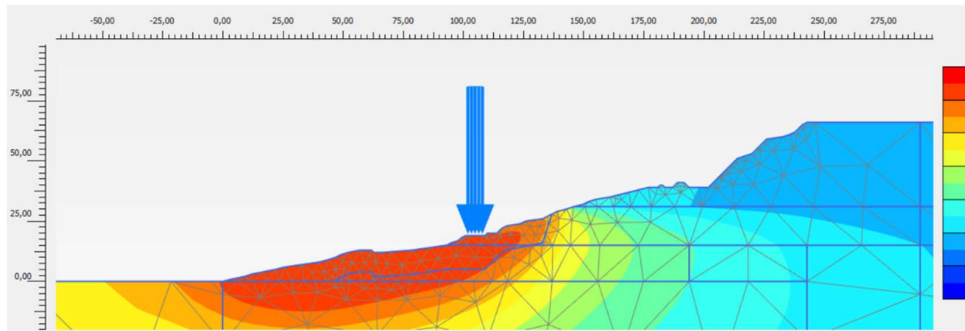
Gambar 5.6 Kondisi Muka Air Tanah pada Lereng

Untuk kondisi muka air tanah yang digambarkan telah disesuaikan dengan hasil penyelidikan Geolistrik pada Gambar 5.4, setelah semua pemodelan kondisi lereng dilakukan langkah selanjutnya melakukan analisis untuk mengetahui nilai SF lereng. Hasil dari analisis lereng tanpa perkuatan ditunjukkan pada Gambar 5.7 dan Gambar 5.8.

Berdasarkan hasil analisis lereng tanpa perkuatan menggunakan PLAXIS 2D tanpa beban gempa didapatkan nilai $SF = 1,046$ angka tersebut belum memenuhi syarat aman lereng ($SF = 1,5$) sehingga lereng tersebut memerlukan perkuatan. Total *Displacement* yang didapatkan adalah 11,73 m. Sedangkan untuk analisis lereng tanpa perkuatan dalam kondisi dinamis didapatkan nilai $SF = 0,425$ angka tersebut belum memenuhi syarat dengan beban gempa ($SF = 1,1$).



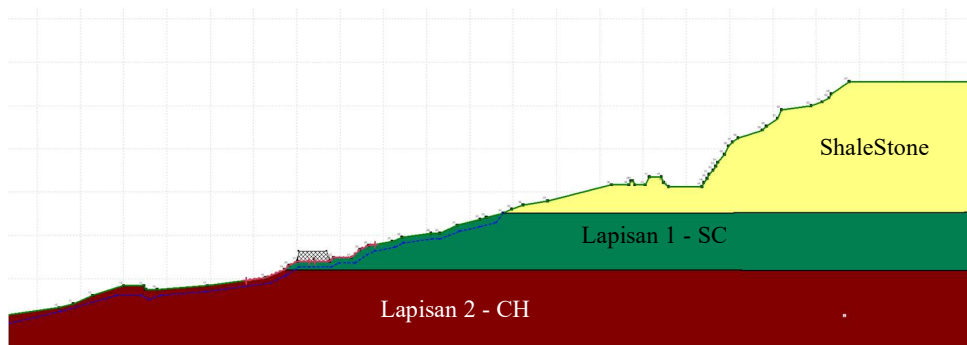
Gambar 5.7 Output Analisis PLAXIS 2D Tanpa Perkuatan



Gambar 5.8 Output Analisis PLAXIS 2D Tanpa Perkuatan dengan Beban Gempa

5.3 Analisis Stabilitas Lereng Tanpa Perkuatan Dengan Geostudio (SLOPE/W)

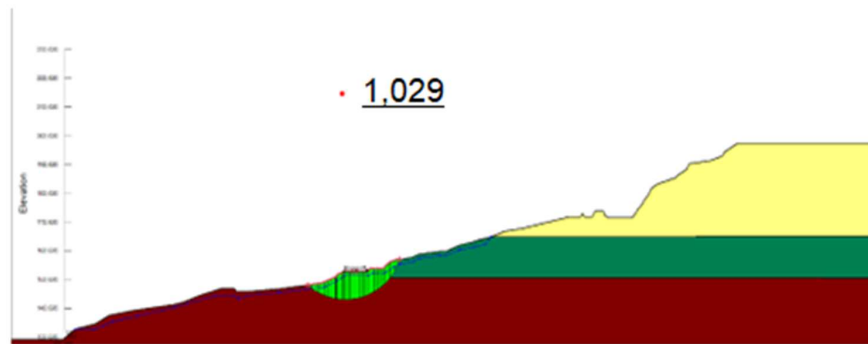
Analisis stabilitas lereng menggunakan GeoStudio (SLOPE/W) diawali dengan pembuatan model lereng, kemudian dilanjutkan dengan memasukkan parameter tanah dan membuat muka air tanah, untuk parameter yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 5.1. Input pemodelan lereng tersebut ditampilkan pada Gambar 5.9 berikut.



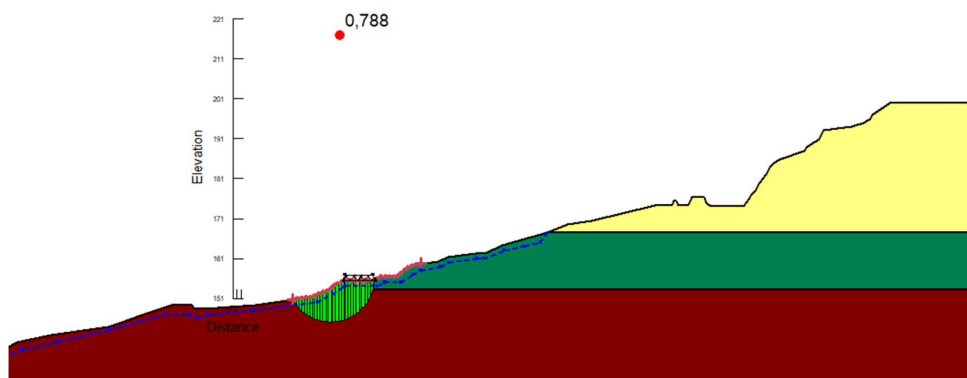
Gambar 5.9 Pemodelan Lereng pada Geostudio (SLOPE/W)

Selanjutnya dilakukan penentuan batas bidang gelincir yang akan ditinjau, kemudian dilanjutkan dengan analisis stabilitas lereng. Analisis menggunakan

metode Morgenstern – Price , untuk hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5.10 dalam kondisi statis dan Gambar 5.11 dalam kondisi dinamis berikut.



Gambar 5.10 Output Analisis Geostudio (SLOPE/W) Tanpa Perkuatan

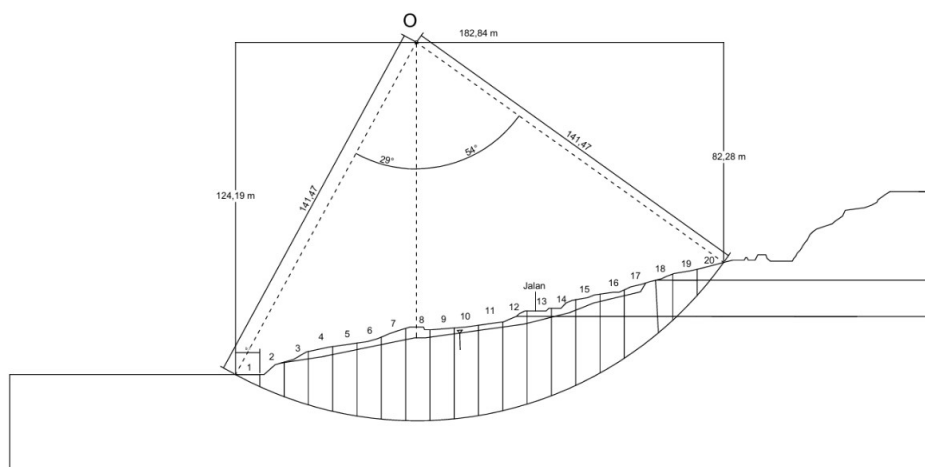


Gambar 5.11 Output Analisis Geostudio (SLOPE/W) Tanpa Perkuatan Kondisi Dinamis

Berdasarkan hasil analisis stabilitas lereng menggunakan Geostudio (SLOPE/W) diperoleh nilai $SF = 1,029$ dan $SF = 0,740$ dengan kondisi dinamis, nilai tersebut belum memenuhi syarat aman lereng ($<SF = 1,5$) sehingga lereng tersebut memerlukan perkuatan.

5.4 Analisis Stabilitas Lereng dengan Metode *Fellenius*

Parameter yang digunakan untuk melakukan perhitungan metode *fellenius* sama seperti Tabel 5.2, menggunakan 20 potongan dan panjang masing – masing potongan adalah 9,1 meter, berikut pemodelan untuk perhitungan metode *fellenius* dapat dilihat pada Gambar 5.12.



Gambar 5. 12 Potongan Metode *Fellenius*

Perhitungan metode *fellenius* menggunakan irisan nomor 2 sebagai contoh perhitungan.

1. Perhitungan berat irisan tanah

$$\begin{aligned} W_n &= \gamma \times A_2 \text{ (luas irisan nomor 2)} \\ &= 19,71 \times 80,7 \\ &= 1590,4 \text{ kN} \end{aligned}$$

2. Perhitungan radians

$$\begin{aligned} \text{Rad} &= \theta \times \frac{\pi}{180} \\ &= -22^\circ \times \frac{\pi}{180} \\ &= -0,38 \end{aligned}$$

3. Perhitungan Sin α

$$\text{Sin } \alpha_2 = \text{Sin (rad2)}$$

$$= \sin (-0,38)$$

$$= -0,37$$

4. Perhitungan $\cos \alpha$

$$\cos \alpha^2 = \cos (\text{rad}^2)$$

$$= \cos (-0,38)$$

$$= 0,719$$

5. Perhitungan $W \sin \alpha$

$$W \sin \alpha^2 = W^2 \times \sin \alpha^2$$

$$= 1590,4 \times -0,37$$

$$= -595,77 \text{ kN}$$

6. Perhitungan $W \cos \alpha$

$$W \cos \alpha = W^2 \times \cos \alpha$$

$$= 1590,4 \times 0,719$$

$$= 1474,58 \text{ kN}$$

7. Perhitungan ΔL

$$\Delta L = \text{panjang irisan (nomor 2)} \times \cos \alpha$$

$$= 9,1 \times 0,719$$

$$= 9,81$$

8. Perhitungan U_n

$$U_2 = z (\text{tinggi muka air tanah pada irisan}) \times \gamma_w$$

$$= 9,58 \times 9,81$$

$$= 96,63 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

9. Perhitungan $U_n \Delta L$

$$U_2 \Delta L = 96,63 \times 9,81$$

$$= 948,38 \text{ (kN/m)}$$

Dengan cara yang sama didapatkan hasil perhitungan pias 1 – 20 ditunjukkan pada Tabel 5.3 berikut.

Tabel 5.3 Rekapitulasi Perhitungan Fellenius

POTONGAN No.	Wn (kN/m)	αn (deg)	RAD	Sin αn	Cos αn	Un (kN/m ²)	Un ΔL (kN/m)	ΔL	Wn Sin αn	Wn Cos αn
1	421.7	-27	-0.47	-0.45	0.89			10.21	-191.47	375.77
2	1590.4	-22	-0.38	-0.37	0.93	96.63	948.38	9.81	-595.77	1474.58
3	2927.1	-19	-0.33	-0.33	0.95	147.05	1415.28	9.62	-952.96	2767.58
4	3979.0	-15	-0.26	-0.26	0.97	190.41	1793.87	9.42	-1029.84	3843.40
5	4626.6	-11	-0.19	-0.19	0.98	260.06	2410.87	9.27	-882.79	4541.58
6	5162.9	-7	-0.12	-0.12	0.99	402.21	3687.60	9.17	-629.20	5124.42
7	5869.1	-3	-0.05	-0.05	1.00	312.55	2848.08	9.11	-307.17	5861.10
8	6224.8	0	0.00	0.00	1.00	407.70	3710.10	9.10	0.00	6224.81
9	6092.1	4	0.07	0.07	1.00	392.40	3579.56	9.12	424.96	6077.25
10	6070.7	8	0.14	0.14	0.99	378.27	3476.12	9.19	844.87	6011.58
11	6013.8	11	0.19	0.19	0.98	371.21	3441.24	9.27	1147.48	5903.29
12	6106.2	15	0.26	0.26	0.97	347.86	3277.22	9.42	1580.41	5898.18
13	6001.8	19	0.33	0.33	0.95	392.40	3776.59	9.62	1953.98	5674.77
14	5690.1	23	0.40	0.39	0.92	300.09	2966.63	9.89	2223.32	5237.81
15	5417.0	27	0.47	0.45	0.89	362.97	3707.07	10.21	2459.27	4826.58
16	4785.2	31	0.54	0.52	0.86	247.51	2627.62	10.62	2464.57	4101.73
17	4131.4	36	0.63	0.59	0.81	210.33	2365.80	11.25	2428.38	3342.38
18	3334.4	40	0.70	0.64	0.77	196.20	2330.70	11.88	2143.30	2554.28
19	2391.1	45	0.79	0.71	0.71			12.87	1690.77	1690.77
20	1102.2	51	0.89	0.78	0.63			15.79	856.55	693.62
Σ						5015,85	45999,07	204,86	15628,68	82225,49

Perhitungan nilai faktor aman lereng sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 FS &= \frac{\sum_{i=1}^{i=n} cl + (W_i \cos \theta_i - u_i a_i) \tan \phi}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \\
 &= \frac{(9 \times 204,86) + (82225,49 - 4599,07) \tan 26^\circ}{15628,68} \\
 &= 1,27
 \end{aligned}$$

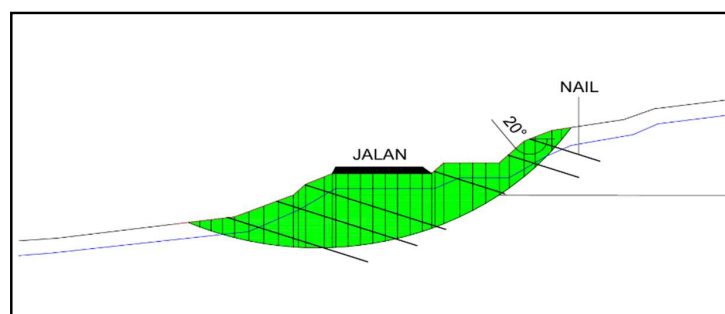
Berdasarkan perhitungan yang didapat nilai FS $1,27 < 1,5$ yang berarti lereng tanpa perkuatan belum memenuhi syarat angka aman lereng.

5.5 Analisis Stabilitas Lereng Perkuatan *Soil Nailing*

Dalam analisis ini perlu menentukan desain *soil nailing* yang akan digunakan, untuk tinggi lereng (H) atas adalah 4,25 m dan 4,5 m untuk lereng bawah. Bidang gelincir yang digunakan untuk menentukan modeling *soil nailing* dapat dilihat pada Gambar 5.10. Berikut adalah ketentuan *soil nailing* yang akan digunakan untuk melakukan modeling sesuai standar yang diberikan oleh SNI 8460:2017.

1. Sudut kemiringan *nail* menggunakan angka (i) 20°
2. Panjang *soil nailing* menggunakan 6 m untuk lereng atas dan 12 m untuk lereng bawah karena jika menggunakan $1.2H$ *nail* belum menembus bidang gelincir.
3. Jarak spasi antar *nail* menggunakan $S_H = S_V = 1,5$ m.
4. Menggunakan lubang bor (D_{DH}) 150 mm = 0,15 m
5. Material menggunakan *nail* diameter 25 mm dan $F_y = 500$ Mpa

Selanjutnya adalah membuat pemodelan *soil nailing* menggunakan Autocad 2D, dapat dilihat pada Gambar 5.13 berikut.



Gambar 5.13 Modeling Soil Nailing

5.5.1 Analisis Stabilitas Internal

Berikut adalah urutan langkah analisis stabilitas internal *soil nailing*.

1. Menghitung nilai *Normalized bond resistance* (μ)

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{q_u D_{BH}}{FSPO \gamma_s SH SV} \\ &= \frac{130 \times 0,15}{1,35 \times 18,07 \times 1,5 \times 1,5} \\ &= 0,3258 \text{ (untuk lereng atas)}\end{aligned}$$

Dengan cara yang sama didapatkan untuk lereng bawah $\mu = 0,3258$

2. Menghitung nilai *normalize cohesion* (c^*)

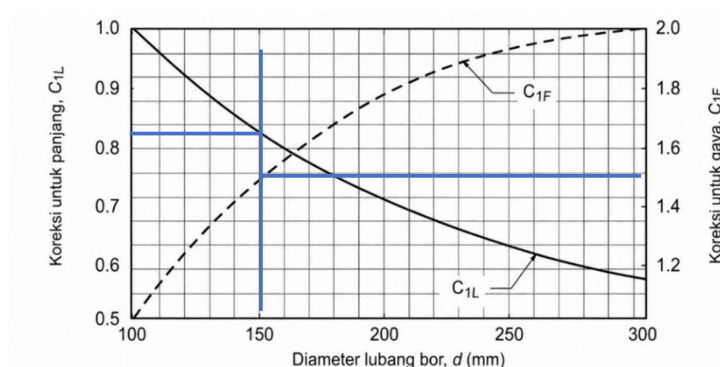
$$\begin{aligned}c^* &= \frac{c'}{(\gamma_s H)} \\ &= \frac{30}{18,07 \times 4,25} \\ &= 0,3905 \text{ (Untuk lereng atas)}\end{aligned}$$

Dengan cara yang sama di dapatkan nilai untuk lereng bawah (c^*) = 0,3925

3. Menghitung nilai $t_{\max}$ koreksi

$$t_{\max} \text{ koreksi} = C_{1F} \times C_{2F} \times t_{\max} \text{ grafik}$$

- a. Nilai C_{1F} didapatkan dari Gambar 5.13 berikut.



Gambar 5.14 Koreksi Pengaruh Diameter Lubang Bor
(Sumber : FHWA, 2003)

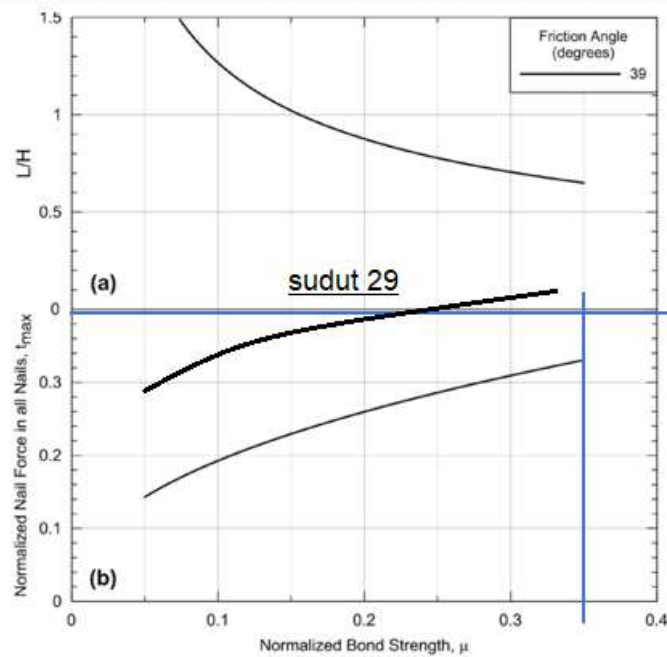
Didapatkan nilai $C1F = 1,45$

b. Menghitung nilai $C2F$

$$\begin{aligned} C2F &= -4,0 c^* + 1,09 \geq 0,85 \\ &= -4,0 \times 0,3905 + 1,09 \\ &= -0,47217 < 0,85 \end{aligned}$$

Karena nilai $C2F < 0,85$ maka $C2F$ menggunakan 0,85

c. Menentukan t_{max} grafik menggunakan grafik pada Gambar 5.14 berikut.



Gambar 5.15 Grafik Desain
(Sumber : FHWA, 2003)

$$\begin{aligned} t_{max \text{ koreksi}} &= C1F \times C2F \times t_{max \text{ grafik}} \\ &= 1,45 \times 0,85 \times 0,4 \\ &= 0,493 \end{aligned}$$

4. Menghitung gaya tarik maksimum (T_{max})

$$\begin{aligned}
 T_{max} &= t_{max} \text{ koreksi} \times \gamma \times H \times S_H \times S_V \\
 &= 0,493 \times 18,07 \times 4,25 \times 1,5 \times 1,5 \\
 &= 85,208 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

5. Periksa *nail* terhadap cabut (R_{po})

$$\begin{aligned}
 R_{po} &= \pi \times q_u \times D_{DH} \times L_p \\
 &= \pi \times 130 \times 0,15 \times 5,78 \text{ (} L_p \text{ diambil tertinggi dari setiap lereng)} \\
 &= 354,09 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Didapatkan R_{po} tertinggi untuk lereng atas 354,09 kN dan 198,49 kN untuk lereng bawah.

6. Faktor keamanan terhadap cabut (FK_{po})

$$\begin{aligned}
 FK_{po} &= R_{po} / T_{max} \\
 &= 354,09 / 85,208 \\
 &= 4,16 > 1,5 \text{ (SNI 8460:2017)}
 \end{aligned}$$

Didapatkan nilai FK_{po} untuk lereng atas 4,16 dan bawah 2,02.

5.5.2 Analisis stabilitas global (FS_G)1. Mencari gaya *soil nailing* ekuivalen (T_{eq})

$$\begin{aligned}
 T_{eq} &= \frac{1}{S_h} T_{all} \\
 &= \frac{1}{1,5} 47,34 \\
 &= 31,56 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Untuk T_{all} menggunakan nilai terkecil antara R_{po} dan $R_T = A_n \times f_y$, sehingga didapatkan T_{eq} lereng atas sebesar 31,56 kN/m² dan 36,43 kN/m² untuk lereng bawah.

$$\begin{aligned}
 FS_G &= \frac{\Sigma R}{\Sigma D} = \frac{cL_F + T_{eq} \cos(\psi - i) + ((W + Q_T) \cos \psi + T_{eq} \sin(\psi - i)) \tan \phi}{((W + Q_T) \sin \psi)} \\
 FS_G &= \frac{(30 \times 5,5) + 31,56 \cos(21 - 20) + ((293,201 + 130) \cos 21 + 31,56 \sin(21 - 20)) \tan \phi}{((293,201 + 130) \sin \psi)} \\
 &= 2,6
 \end{aligned}$$

Maka didapatkan FS_G untuk lereng atas sebesar 2,6 dan 5,2 untuk lereng bawah yang dinyatakan telah melebihi FS syarat $> 1,5$ sesuai dengan SNI 8460:2017.

5.4.3 Analisis stabilitas terhadap gelincir

1. Menghitung koefisien tekanan tanah lateral aktif (K_a)

$$\begin{aligned}
 K_a &= \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \\
 &= \tan^2 \left(45 - \frac{26}{2} \right) \\
 &= 0,390
 \end{aligned}$$

Didapatkan K_a untuk lereng atas sebesar 0,390 dan 0,347 untuk lereng bawah.

2. Menghitung tegangan tanah lateral aktif (σ_H)

$$\begin{aligned}
 \sigma_H &= \gamma \cdot H \cdot K_a \\
 &= 18,07 \times 4,25 \times 0,390 \\
 &= 29,994 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Didapatkan nilai σ_H untuk lereng atas sebesar 29,994 kN/m^2 dan 30,771 kN/m^2 untuk lereng bawah.

3. Menghitung tekanan aktif total ke arah lateral (P)

$$\begin{aligned}
 P &= 0,5 \cdot \sigma_H \cdot H \\
 &= 0,5 \times 29,994 \times 4,25 \\
 &= 63,737 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Didapatkan nilai P untuk lereng atas sebesar 63,737 kN dan 69,234 untuk lereng bawah.

4. Stabilitas terhadap gelincir (FK_{sl})

$$FK_{sl} = \frac{Cb(AF) + (W + Qt) \tan \varphi}{P}$$

$$= \frac{30(3,48) + (293,20 + 1) \tan 26}{63,676}$$

$$= 4,9$$

Didapatkan nilai FK_{sl} untuk lereng atas sebesar 4,9 dan 22,4 untuk lereng bawah.

Setelah dilakukan perhitungan desain *soil nailing*, tahap selanjutnya adalah melakukan *input* parameter dan pemodelan lereng dengan perkuatan *soil nailing* menggunakan aplikasi Geostudio (SLOPE/W), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.16 dan Gambar 5.17.

Define Reinforcements

Name	Type	Color
NAILING	Nail	
NAILING BAWAH	Nail	
New Reinforcement	Pile	

Name: NAILING Color: Set..

Type: Nail

Pullout Resistance

Pullout Resistance (F/Area): 1,35 kPa

Reduction Factor: 1

Tensile Capacity

Tensile Capacity: 245,436 kN

Reduction Factor: 1

Shear Force

Shear Force: 17,744 kN

Reduction Factor: 1

Apply Shear: Parallel to Slip

Calculation Settings

F of S Dependent: No

Force Distribution: Distributed

Installation Specifications

Bond Diameter: 0,31830989 m

Out-of-Plane Spacing: 1,5 m

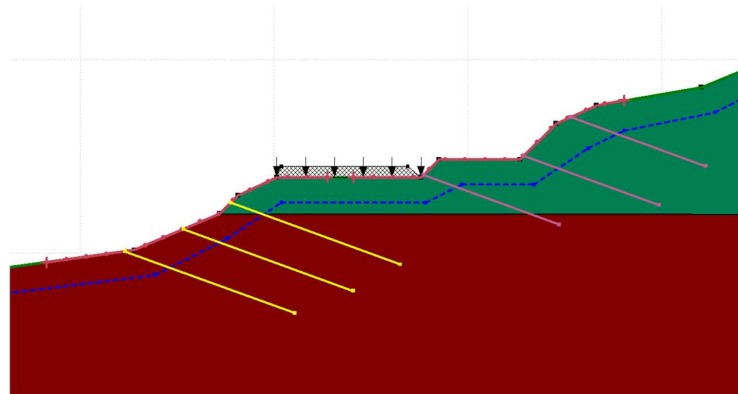
Face Anchorage: Yes

Factored Pullout Resistance: 0,9 kN/m/m

Factored Tensile Capacity: 1,6362e+05 kN/m

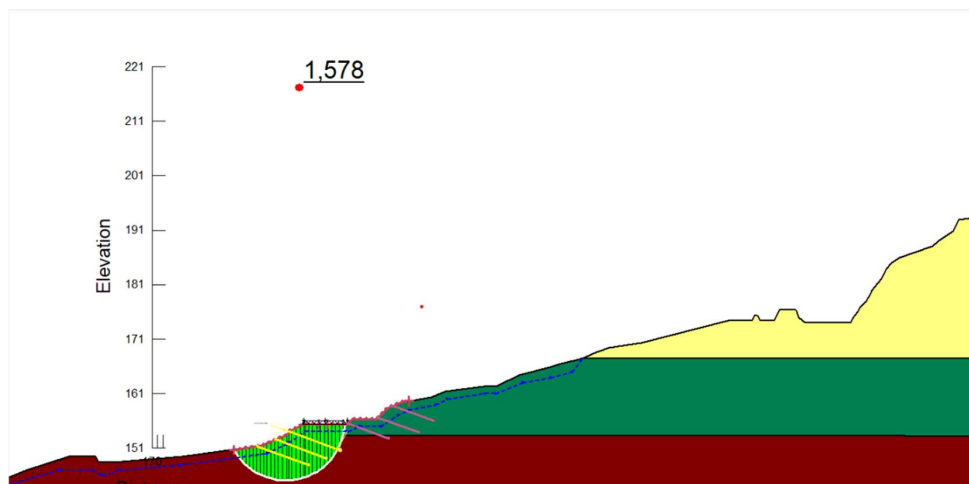
Undo Redo Close

Gambar 5.16 Input Parameter Soil Nailing

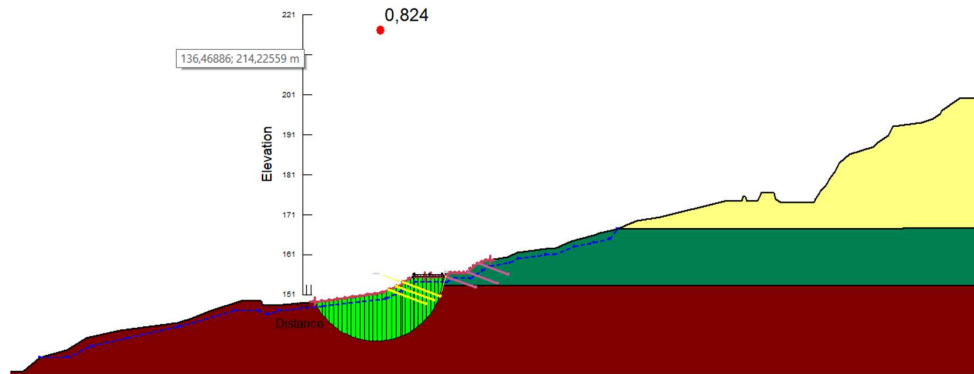


Gambar 5.17 Pemodelan Lereng Dengan Perkuatan *Soil Nailing* Pada Aplikasi Geostudio (SLOPE/W)

Setelah pemodelan lereng selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah melakukan analisis nilai SF menggunakan aplikasi GeoStudio (SLOPE/W). Analisis ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kestabilan lereng setelah diberikan perkuatan *soil nailing*. Hasil analisis nilai SF pada aplikasi Geostudio ditunjukkan pada Gambar 5.18 dan Gambar 5.19.



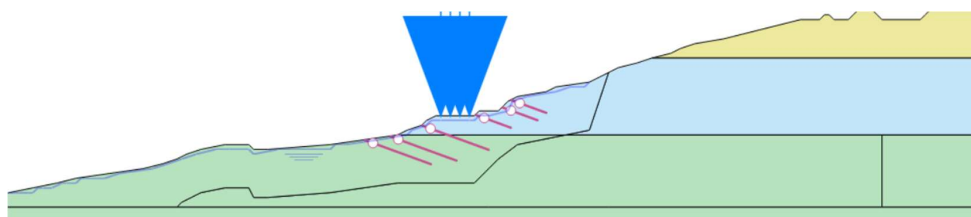
Gambar 5.18 Output Analisis Perkuatan Lereng Dengan *Soil Nailing*



Gambar 5.19 Output Analisis Perkuatan Lereng Dengan *Soil Nailing* Kondisi Dinamis

Berdasarkan hasil analisis, diperoleh nilai $SF = 1,578$ tanpa beban gempa dan $SF = 0,824$ dengan beban gempa. Nilai tersebut menunjukkan bahwa lereng dalam kondisi stabil tanpa beban gempa dengan syarat $SF > 1,5$ dan belum stabil apabila menggunakan beban gempa karena belum memenuhi syarat $SF > 1,1$.

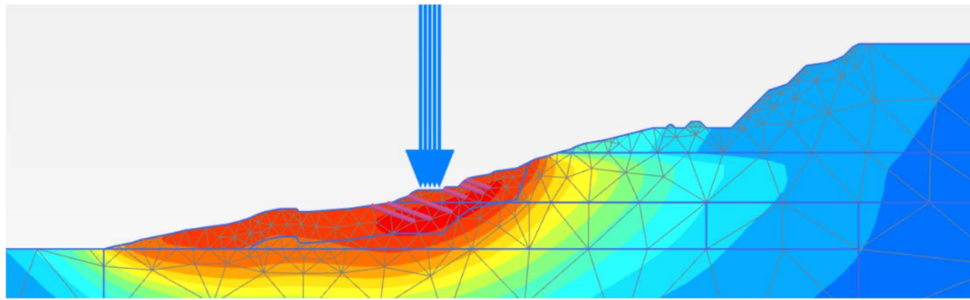
Untuk mendapatkan perbandingan maka dilakukan juga analisis perkuatan *soil nailing* dengan aplikasi PLAXIS 2D dengan parameter yang tanah yang sama seperti pada Tabel 3.2, pertama adalah membuat modeling perkuatan *soil nailing* pada PLAXIS 2D yang ditunjukkan pada Gambar 5.20 berikut.



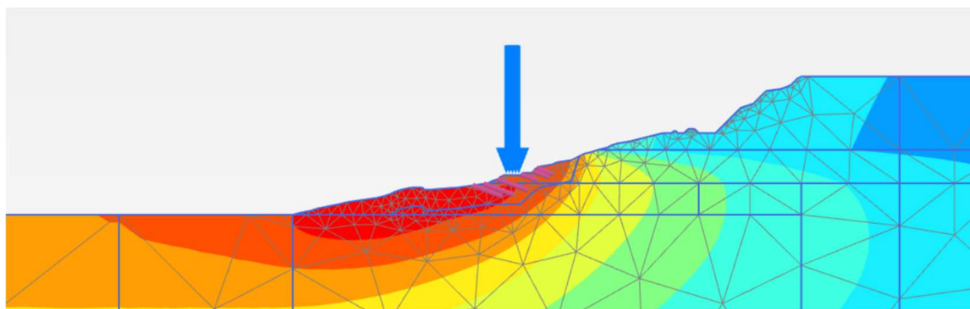
Gambar 5. 20 Modeling *Soil Nailing* PLAXIS 2D

Setelah pemodelan lereng selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah melakukan analisis nilai SF menggunakan aplikasi PLAXIS 2D. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kestabilan lereng setelah diberikan perkuatan *soil nailing*. Hasil

analisis nilai SF pada aplikasi Geostudio ditunjukkan pada Gambar 5.21 dan Gambar 5.22.



Gambar 5.21 Output Analisis Perkuatan Lereng dengan Soil Nailing (PLAXIS 2D) Tanpa Beban Gempa



Gambar 5.22 Output Analisis Perkuatan Lereng dengan Soil Nailing (PLAXIS 2D) Tanpa Beban Gempa

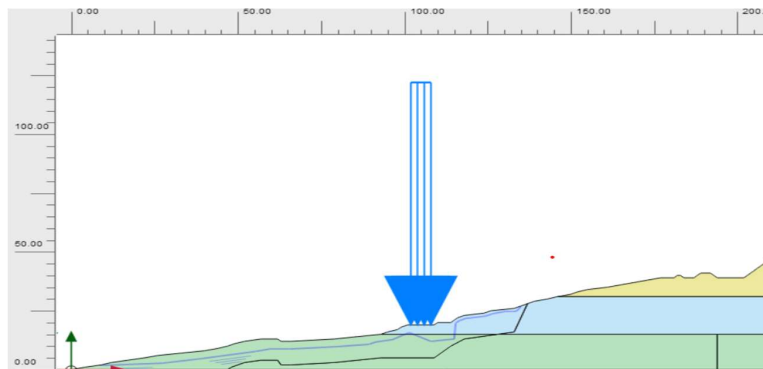
Berdasarkan hasil analisis, diperoleh nilai $SF = 1,1$ tanpa beban gempa dan $SF = 0,456$ dengan beban gempa. Nilai tersebut menunjukkan bahwa lereng dalam kondisi stabil tanpa beban gempa dengan syarat $SF > 1,5$ dan belum stabil apabila menggunakan beban gempa karena belum memenuhi syarat $SF > 1,1$.

5.6 Analisis Stabilitas Lereng Dengan Pengaturan Muka Air Tanah

Dalam sebuah penelitian tentang pengaruh muka air tanah dengan kestabilan lereng yang dilakukan oleh Vickyla dkk. (2019) menyatakan bahwa keberadaan muka air tanah sangat berpengaruh terhadap kestabilan lereng karena dapat meningkatkan tekanan air pori (*pore water pressure*) dan menurunkan kuat geser tanah. Kondisi ini menyebabkan gaya penahan lereng berkurang sehingga potensi terjadinya longsor menjadi lebih besar. Dari penelitian tersebut dapat kita tarik kesimpulan bahwa lereng dengan muka air tanah yang tinggi akan mengakibatkan kegagalan lereng walaupun lereng tersebut tidak terlalu curam.

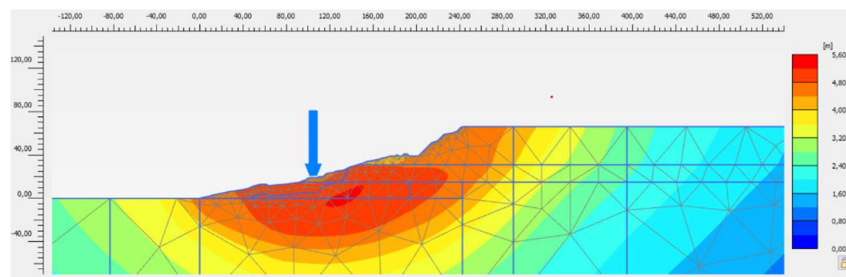
Berdasarkan hasil penyelidikan geolistrik pada Gambar 5.4, diketahui bahwa muka air tanah berada pada kedalaman kurang dari 1 m dari permukaan tanah. Kondisi ini menunjukkan tingkat kejenuhan lereng yang tinggi sehingga meningkatkan tekanan air pori dan menyebabkan nilai SF lereng relatif rendah, yaitu sebesar 1,046. Berdasarkan penelitian Radyatmo dkk. (2019), penurunan muka air tanah memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan nilai SF lereng. Penelitian tersebut dilakukan pada lokasi yang sama dengan penelitian ini dengan menerapkan sistem drainase bawah tanah bermodel siphon sebagai metode rekayasa muka air tanah. Hasil analisis menunjukkan bahwa semakin rendah elevasi muka air tanah terhadap permukaan lereng, maka kestabilan lereng akan meningkat yang ditunjukkan dengan bertambahnya nilai faktor keamanan. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Syah dan Fathani (2018), disebutkan bahwa gerakan tanah di daerah Kalitlaga termasuk dalam jenis rayapan (*creep*) dengan tingkat pergerakan dari sangat lambat hingga sedang. Pada kondisi tersebut, pemasangan sistem drainase untuk menurunkan muka air tanah dapat digunakan sebagai upaya mitigasi longsor. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan Plaxis, regangan terbesar terjadi pada bagian bawah lereng sehingga drainase ditempatkan pada area tersebut. Analisis stabilitas menggunakan perangkat lunak Plaxis 8.6 dan SLOPE/W menunjukkan bahwa penurunan muka air tanah mampu meningkatkan nilai faktor keamanan lereng dari kondisi kritis menjadi aman terhadap potensi longsor ($SF > 1,5$).

Validasi pengaruh penurunan muka air tanah terhadap kestabilan lereng dilakukan menggunakan aplikasi PLAXIS 2D. Analisis dilakukan dengan menggunakan kondisi eksisting yang sama seperti pada Gambar 5.5, kemudian muka air tanah dimodifikasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.19 berikut.

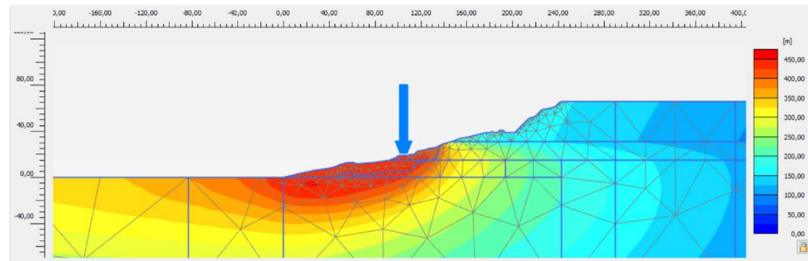


Gambar 5.23 Lereng Dengan Modifikasi Muka Air Tanah

Setelah dilakukan pemodelan dengan memodifikasi muka air tanah selanjutnya melakukan analisis untuk mengetahui nilai SF, untuk *output* analisis ditunjukkan pada Gambar 5.20 dan Gambar 5.21 berikut.



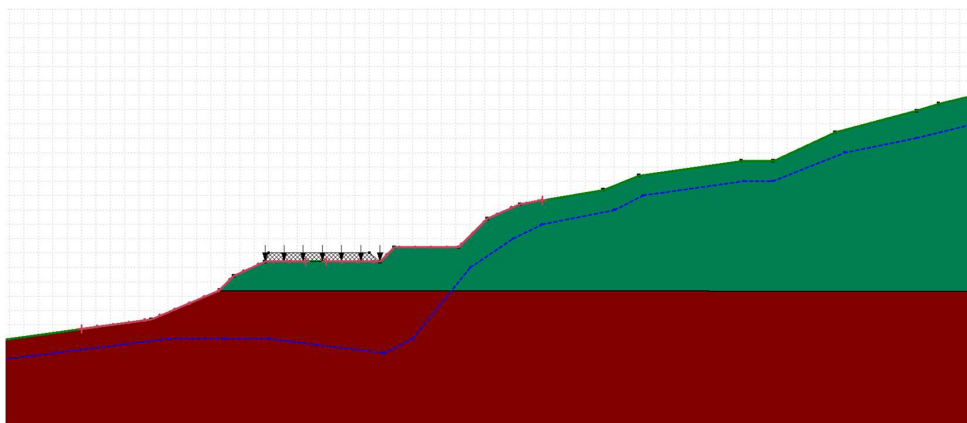
Gambar 5.24 Output PLAXIS 2D Modifikasi Muka Air Tanah



Gambar 5.25 Output PLAXIS 2D Modifikasi Muka Air Tanah Dengan Beban Gempa

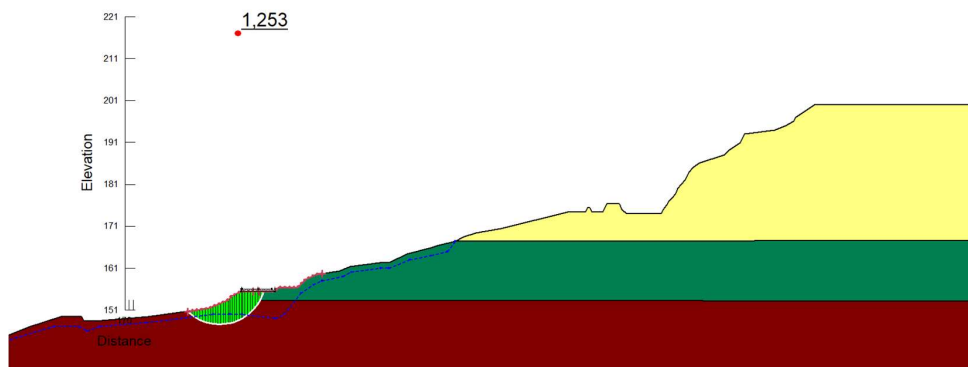
Hasil analisis menunjukkan bahwa penurunan muka air tanah sekitar ± 7 meter dari permukaan jalan menghasilkan nilai $SF = 1,47$ tanpa beban gempa dan $SF = 0,503$ dengan beban gempa. Berdasarkan hasil analisis, nilai SF mengalami peningkatan sebesar 40,54% pada kondisi statis (tanpa beban gempa) dan 9,84% pada kondisi dinamis (dengan beban gempa) dibandingkan dengan kondisi tanpa perkuatan.

Selanjutnya Validasi pengaruh penurunan muka air tanah terhadap kestabilan lereng menggunakan aplikasi Geostudio. Analisis dilakukan dengan menggunakan kondisi eksisting yang sama seperti pada Gambar 5.9, kemudian muka air tanah dimodifikasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.22 berikut.

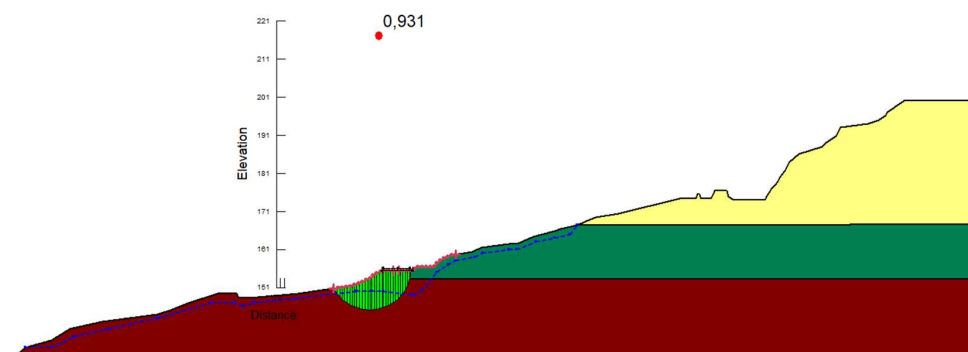


Gambar 5.26 Lereng Dengan Modifikasi Muka Air Tanah (Geostudio)

Setelah dilakukan pemodelan dengan memodifikasi muka air tanah selanjutnya melakukan analisis untuk mengetahui nilai SF, untuk *output* analisis ditunjukkan pada Gambar 5.27 dan Gambar 5.28 berikut.



Gambar 5.27 *Output* Geostudio Modifikasi Muka Air Tanah

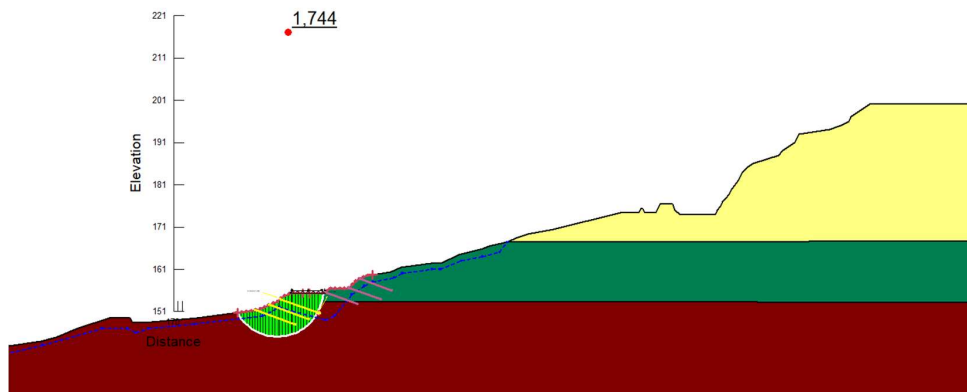


Gambar 5.28 *Output* Geostudio Modifikasi Muka Air Tanah Dengan Beban Gempa

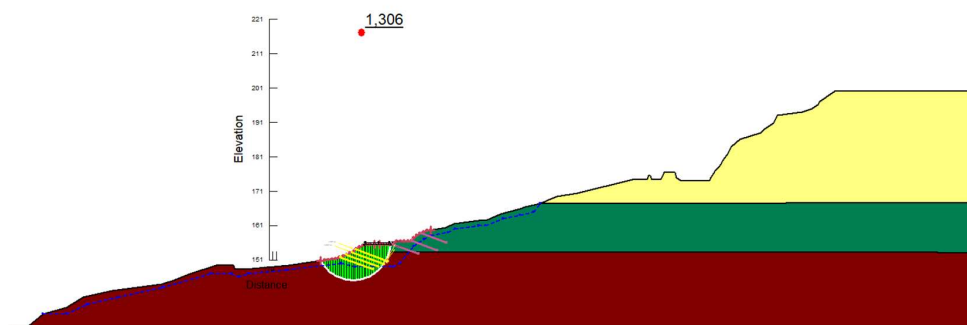
Hasil analisis menunjukkan bahwa penurunan muka air tanah sekitar ± 5 meter dari permukaan jalan menghasilkan nilai $SF = 1,253$ tanpa beban gempa dan $SF = 0,931$ dengan beban gempa. Berdasarkan hasil analisis, nilai SF mengalami peningkatan sebesar 21,77% pada kondisi statis (tanpa beban gempa) dan 20,31% pada kondisi dinamis (dengan beban gempa) dibandingkan dengan kondisi tanpa perkuatan.

5.7 Analisis Stabilitas Lereng Perkuatan *Soil Nailing* Disertai Pengaturan Muka Air Tanah

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, perkuatan lereng menggunakan metode *soil nailing* dan modifikasi muka air tanah yang diterapkan secara terpisah telah mampu meningkatkan stabilitas lereng pada kondisi statis. Analisis yang dilakukan pada kondisi dinamis akibat pengaruh beban gempa, kedua metode perkuatan tersebut belum mampu meningkatkan stabilitas lereng hingga memenuhi kriteria yang dipersyaratkan, yaitu nilai faktor keamanan (SF) $> 1,1$. Untuk mencapai nilai faktor keamanan yang memenuhi persyaratan tersebut, dilakukan penggabungan kedua metode perkuatan sehingga diperoleh stabilitas lereng pada kondisi dinamis. Analisis dilakukan menggunakan Geostudio dengan modeling yang sama dengan Gambar 5.16 dan Gambar 5.22. Berikut adalah *output* analisis penggabungan alternatif perkuatan *soil nailing* dan rekayasa muka air tanah pada Gambar 5.29 dan Gambar 5.30.



Gambar 5.29 Output Analisis Perkuatan *Soil Nailing* Dengan Pengaturan Muka Air Tanah

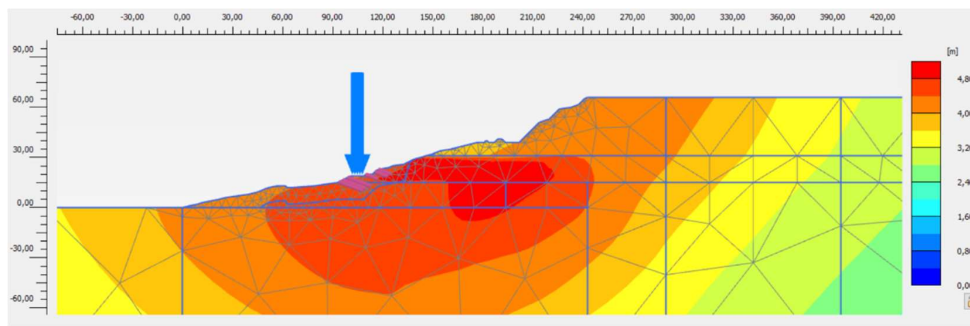


Gambar 5.30 Output Analisis Perkuatan *Soil Nailing* Dengan Pengaturan Muka Air Tanah Menggunakan Beban Gempa

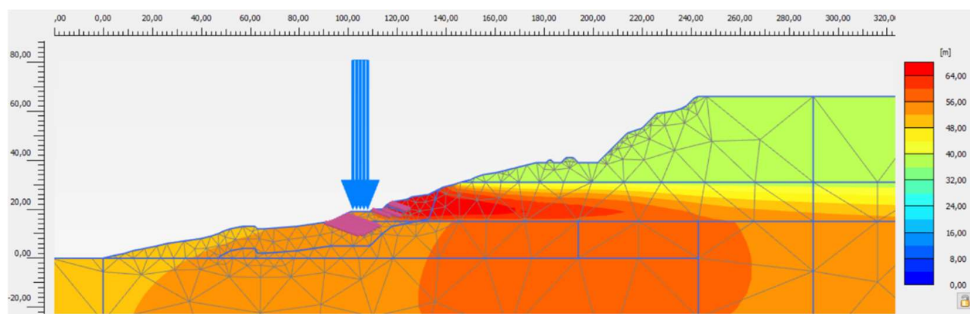
Hasil analisis tanpa beban gempa mendapatkan nilai $SF = 1,744$ yang dimana angka tersebut sudah memenuhi syarat $SF > 1,5$ dan hasil analisis dengan beban gempa mendapatkan nilai $SF = 1,306$ yang dimana sudah memenuhi syarat $SF > 1,1$ dengan catatan untuk jarak vertikal *soil nailing* diubah menjadi 1,2 m serta

menggunakan 4 nail pada lereng bawah guna memenuhi angka aman stabilitas lereng dengan beban gempa.

Untuk melakukan perbandingan, digunakan juga analisis menggunakan aplikasi PLAXIS 2D dengan paramater desain yang sudah digunakan pada pembahasan sebelumnya, untuk hasil analisis dapat dilihat pada Gambar 5.31 dan Gambar 5.32 berikut.



Gambar 5.31 Output Analisis Perkuatan *Soil Nailing* dengan Pengaturan Muka Air Tanah Tanpa Beban Gempa (PLAXIS 2D)



Gambar 5.32 Output Analisis Perkuatan *Soil Nailing* dengan Pengaturan Muka Air Tanah dengan Beban Gempa (PLAXIS 2D)

Hasil analisis tanpa beban gempa mendapatkan nilai $SF = 1,690$ yang dimana angka tersebut sudah memenuhi syarat $SF > 1,5$ dan hasil analisis dengan beban gempa mendapatkan nilai $SF = 1,117$ yang dimana sudah memenuhi syarat $SF > 1,1$ dengan catatan untuk jarak vertikal *soil nailing* diubah menjadi 1,2 m serta

menggunakan 8 nail pada lereng bawah guna memenuhi angka aman stabilitas lereng dengan beban gempa.

5.8 Pembahasan Hasil Analisis

Berdasarkan parameter tanah pada Tabel 4.1 dan klasifikasi USCS, lapisan 1 sebagai tanah SC dan lapisan 2 pada lereng diklasifikasikan sebagai tanah CH. Sementara itu, hasil penyelidikan geolistrik pada Gambar 5.4 menunjukkan adanya kondisi tanah jenuh air di bawah permukaan lereng serta keberadaan lapisan batuan breksi keras yang berpotensi menjadi bidang gelincir.

Analisis stabilitas lereng tanpa perkuatan dengan PLAXIS 2D dan Geostudio mendapatkan angka yang tidak jauh berbeda, berikut adalah rekapitulasi dari hasil analisis lereng tanpa perkuatan yang ditunjukkan pada Tabel 5.2 berikut.

Tabel 5.4 Nilai SF Tanpa Perkuatan

APLIKASI	SF hasil	SF syarat
PLAXIS 2D	1,046	SF > 1,5
Geostudio (SLOPE/W)	1,029	
Metode <i>fellenius</i>	1,270	
PLAXIS 2D (Dinamis)	0,425	SF > 1,1
Geostudio (SLOPE/W) (Dinamis)	0,788	

Dari hasil analisis lereng tanpa perkuatan tidak ada lereng yang memenuhi SF syarat maka kedua lereng tersebut perlu dilakukan perkuatan. Perkuatan yang dipilih untuk analisis adalah perkuatan *soil nailing* dan rekayasa muka air tanah.

Analisis stabilitas lereng dengan perkuatan *soil nailing* dilakukan menggunakan aplikasi GeoStudio (SLOPE/W). Tahap awal analisis dilakukan melalui perhitungan manual untuk menentukan dimensi perkuatan yang akan

digunakan, kemudian dilanjutkan dengan evaluasi stabilitas *soil nailing*. Hasil rekapitulasi dimensi dan analisis stabilitas ditunjukkan pada Tabel 5.5 dan Tabel 5.6.

Tabel 5.5 Dimensi *Soil Nailing*

No	Dimensi	Lereng atas	Lereng bawah
1	Panjang <i>nail</i> (m)	6	12
2	Sudut kemiringan pemasangan (°)	20	20
3	Diameter bor (mm)	150	150

Tabel 5.6 Angka Aman Pada *Soil Nailing*

Lereng atas		
	SF hasil	SF syarat
Stabilitas cabut	4,16	2
Stabilitas global	2,6	1,5
Stabilitas gelincir	4,9	1,5
Lereng bawah		
	SF hasil	SF syarat
Stabilitas cabut	2,02	2
Stabilitas global	5,2	1,5
Stabilitas gelincir	22,4	1,5

Setelah pengecekan faktor keamanan nail pada dimensi yang direncanakan selesai dilakukan, analisis stabilitas lereng dengan perkuatan *soil nailing* kemudian dilakukan menggunakan aplikasi GeoStudio (SLOPE/W). Berdasarkan hasil analisis diperoleh nilai SF sebesar 1,578, yang menunjukkan bahwa lereng telah memenuhi syarat keamanan dengan nilai $SF > 1,5$. Akan tetapi, penerapan *soil nailing* pada lereng ini menjadi kurang efektif karena panjang nail yang dibutuhkan melebihi 1,2H.

Rekayasa muka air tanah merupakan salah satu metode yang efektif untuk meningkatkan stabilitas lereng pada kondisi tanah jenuh air atau muka air tanah yang tinggi. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan analisis menggunakan aplikasi PLAXIS 2D dengan melakukan penurunan muka air tanah untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap nilai SF. Berdasarkan hasil analisis, penurunan muka air tanah sebesar 7 meter dari permukaan menghasilkan nilai SF sebesar 1,47. Walaupun belum memenuhi kriteria aman lereng ($SF > 1,5$), hasil tersebut menunjukkan adanya peningkatan kestabilan lereng akibat rekayasa muka air tanah.

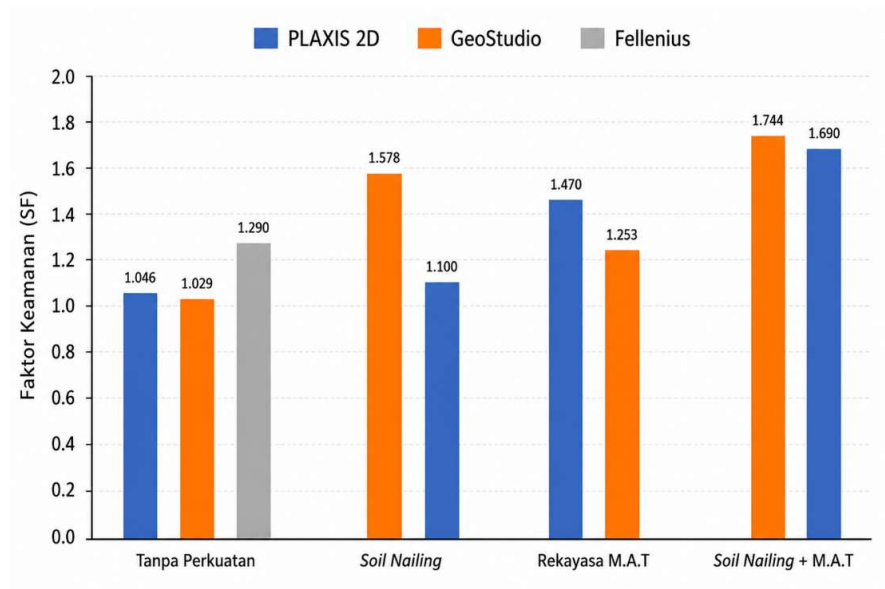
Berikut adalah tabel rekapitulasi dan grafik perbandingan nilai SF pada lereng tanpa perkuatan, lereng dengan perkuatan *soil nailing* dan rekayasa muka air tanah -7 meter.

Tabel 5.7 Rekapitulasi SF Pada Setiap Kondisi Lereng Statis

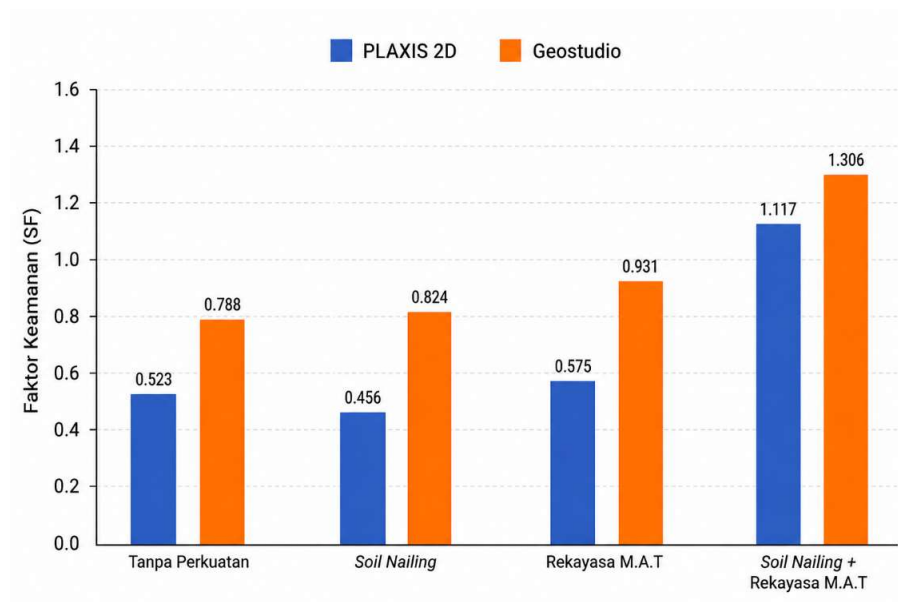
Kondisi lereng	Aplikasi	SF hasil	SF syarat (tanpa beban gempa)
Tanpa perkuatan	PLAXIS 2D	1,046	1,5
	Geostudio	1,029	
	<i>Fellenius</i>	1,290	
<i>Soil nailing</i>	Geostudio	1,578	
	PLAXIS 2D	1,100	
Rekayasa M.A.T	PLAXIS 2D	1,470	
	Geostudio	1,253	
<i>Soil nailing</i> + Rekayasa M.A.T	Geostudio	1,744	
	PLAXIS 2D	1,690	

Tabel 5.8 Rekapitulasi SF Pada Setiap Kondisi Lereng Dinamis

Kondisi lereng	Aplikasi	SF hasil	SF syarat (dengan beban gempa)
Tanpa perkuatan	PLAXIS 2D	0,523	1,1
	Geostudio	0,788	
<i>Soil nailing</i>	Geostudio	0,824	
	PLAXIS 2D	0,456	
Rekayasa M.A.T	PLAXIS 2D	0,575	
	Geostudio	0,931	
<i>Soil nailing</i> + Rekayasa M.A.T	Geostudio	1,306	
	PLAXIS 2D	1,117	



Gambar 5.33 Grafik Perbandingan Nilai SF Kondisi Statis



Gambar 5.34 Grafik Perbandingan Nilai SF Kondisi Dinamis

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil analisis stabilitas lereng yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kondisi eksisting lereng memiliki tingkat kestabilan yang rendah akibat kondisi tanah yang jenuh air dan keberadaan muka air tanah yang tinggi. Berdasarkan klasifikasi USCS, lapisan tanah pada lereng termasuk jenis tanah SC dan CH yang memiliki plastisitas tinggi dan rentan mengalami keruntuhan pada kondisi jenuh air. Selain itu, hasil penyelidikan geolistrik menunjukkan adanya lapisan batuan breksi keras yang berpotensi menjadi bidang gelincir.
2. Hasil analisis stabilitas lereng tanpa perkuatan menunjukkan nilai faktor keamanan (SF) sebesar 1,046 tanpa beban gempa, 0,523 dengan beban gempa berdasarkan analisis menggunakan PLAXIS 2D dan sebesar 1,029 tanpa beban gempa, 0,788 dengan beban gempa berdasarkan analisis menggunakan GeoStudio (SLOPE/W). Nilai SF yang diperoleh dari kedua metode analisis tersebut masih berada di bawah syarat aman lereng tanpa beban gempa ($SF > 1,5$) dan syarat aman lereng dengan beban gempa ($SF > 1,2$), sehingga lereng dikategorikan dalam kondisi tidak stabil.
3. Hasil perhitungan dimensi perkuatan *soil nailing* menunjukkan bahwa perkuatan yang digunakan terdiri dari nail berdiameter 25 mm dengan sudut pemasangan 20° terhadap horizontal dan diameter lubang bor sebesar 150 mm. Panjang nail yang digunakan adalah 6 meter untuk lereng bagian atas dan 12 meter untuk lereng bagian bawah. Berdasarkan hasil analisis, dimensi

tersebut mampu meningkatkan stabilitas lereng terhadap potensi kelongsoran. Namun, pada kondisi lereng penelitian ini, penerapan *soil nailing* dinilai kurang efektif karena panjang nail yang dibutuhkan melebihi $1,2H$.

4. Setelah dilakukan perkuatan menggunakan metode *soil nailing*, nilai SF tanpa beban gempa meningkat menjadi 1,578 dan telah memenuhi kriteria keamanan lereng, untuk nilai SF dengan beban gempa 0,824 pada aplikasi Geostudio, pada aplikasi PLAXIS 2D nilai SF menjadi 1,100 tanpa beban gempa dan 0,456 dengan beban gempa, angka tersebut belum memenuhi syarat angka aman dengan beban gempa ($SF > 1,1$). Sementara itu, penerapan metode pengaturan muka air tanah (M.A.T) pada kedalaman 7 m dengan aplikasi PLAXIS 2D menghasilkan nilai SF sebesar 1,47 tanpa beban gempa dan SF sebesar 0,575 dengan beban gempa, untuk analisis menggunakan Geostudio mendapatkan nilai SF sebesar 1,253 tanpa beban gempa dan SF sebesar 0,931 dengan beban gempa, yang menunjukkan adanya peningkatan stabilitas lereng meskipun masih sedikit di bawah nilai SF yang disyaratkan. Berdasarkan analisis perkuatan *soil nailing* dan pengaturan muka air tanah, tidak ada nilai SF yang memenuhi syarat dengan beban gempa ($SF > 1,1$) sehingga dilakukan penggabungan metode tersebut sehingga mendapatkan nilai SF sebesar 1,744 tanpa beban gempa dan SF sebesar 1,306 dengan beban gempa pada aplikasi Geostudio dan nilai SF sebesar 1,690 tanpa beban gempa dan SF sebesar 1,117 dengan beban gempa pada aplikasi PLAXIS 2D. Angka tersebut sudah memenuhi syarat aman ($SF > 1,5$) tanpa beban gempa dan syarat aman ($SF > 1,1$) dengan gempa.

6.2 Saran

Adapun saran yang dapat disampaikan berdasarkan hasil penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Perlu dilakukan penyelidikan tanah yang lebih detail agar parameter tanah yang digunakan dalam analisis lebih sesuai dengan kondisi lapangan.

2. Perlu dilakukan perhitungan pengaturan muka air tanah yang lebih detail agar hasil analisis stabilitas lereng dapat diperoleh dengan lebih akurat.
3. Perlu dilakukan analisis menggunakan metode perkuatan lain yang lebih sesuai dengan kondisi lereng pada penelitian ini agar diperoleh alternatif perkuatan yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Aripin, D. D., Asniar, N., & Hendardi, A. R. (2022). Studi Analisis Stabilitas Lereng (Studi Kasus Lereng Bukit Cikirai Cikoneng Ciamis). *JITSi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 2(2), 108-124
- Astari, Andre Primantyo Hendrawan, & Emma Yuliani. (2021). *Evaluasi karakteristik mikro-fisik dan mekanik pasir vulkanik tersementasi di tebing sungai aliran lahar Gunung Kelud*. Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air, 1(2), 661–671.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017 Persyaratan perancangan geoteknik*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Balu, A. R., Indriati Martha Patuti, & Fadly Achmad. (2025). *Analisis besaran erosi dan stabilitas lereng dengan perkuatan soil nailing*. Jurnal Teknik, 23(1), 76–?.
- Basoka, I. W. A. (2020). *Perbandingan Daya Dukung Tiang Pancang Berdasarkan Pengujian Cone Penetration Test (CPT) Dan Standard Penetration Test (SPT) Pada Tanah Berpasir*. Ukarst: Universitas Kadiri Riset Teknik Sipil, 4(1), 110-123.
- Bela, K. R., & Sianto, P. (2022). *Penyelidikan Tanah Menggunakan Metode Uji Sondir*. Eternitas: Jurnal Teknik Sipil, 2(1), 50-58.
- Bo, Z., Fu Xiaodi, Wang Linjun, & Cui Xinyi. *Research on the prediction methods of elastic modulus of shale*. Guizhou Minzu University.
- BPSDMD Jawa Tengah, (2025). Tanah longsor.: https://ppid.bpsdmd.jatengprov.go.id/Informasi/view_informasi_se_rta_merta_page/11 (Diakses pada 30 September 2025).
- Braja M. Das, & Khaled Sobhan. (2016). *Principles of geotechnical engineering* (9th ed.).
- Braja M. Das. (1995). *Mekanika tanah: Prinsip-prinsip rekayasa geoteknis*. (N. E. Mochtar & I. B. Mochtar, Penerj.). Penerbit Erlangga.
- F., S. A., Kristyanto T. H. W., Asriza, Syahputra Reza, Tempessy Albert S., & Indra Tito L.. (2016). *Collaboration of high activity soil and geological structure factors in Pagelaran soil creep occurrence, Indonesia*. Dalam SICEST 2016, MATEC Web of Conferences.

- FITRIANI, D. (2023). *Analisis Penggunaan Geotekstil dan Sub Drainase Dalam Penanganan Amblesan Pada Ruas Jalan Bumiayu - Sirampog KAB. Brebes* (Universitas Islam Sultan Agung Semarang).
- Gao, M., Binbin He, Wenhui Li, Wanjia Guo, Shiming Bai, Lijuan Wang, Rui Bian, Liang Zhang, Zhihao He, & Feng Lu. (2025). *Study on mechanical properties of rock and soil mass in the slip zone of Shibanning landslide*.
- Hakam, Abdul. 2008. *Rekayasa Pondasi Untuk Mahasiswa dan Praktisi*. CV Bintang Grafika
- Halza, D. A., Alio Jasipto, & M. Akbari Danasla. (2024). *Analisis kestabilan lereng highwall pada rencana penambangan tahun 2024 di Pit Rajawali di PT Triaryani (Analysis of highwall slope stability in the 2024 mining plan at Rajawali Pit PT Triaryani)*. Jurnal Inovasi Pertambangan dan Lingkungan, 4(2), 64–70.
- Hardiyatmo, H.C. 2018. *Mekanika Tanah 2 Edisi ke Enam*. Gajah Mada University Press. Yogyakarta
- Ibrahim, M. F., Paksitya Purnama Putra, & Indra Nurtjahjaningtyas. *Analisis stabilitas soil nailing sebagai alternatif penanganan longsor di jalur nasional Piket Nol Lumajang Jawa Timur (Stability analysis of soil nailing as an alternative for landslide handling on the Piket Nol national route Lumajang East Java)*. Universitas Jember.
- Iftikhar, A. A. (2024). *Analisis stabilitas lereng dengan perkuatan soil nailing menggunakan program PLAXIS 2D V20 (Studi kasus: Tebing Cibeureum, Kabupaten Cianjur)* Tugas akhir, Universitas Islam Indonesia.
- kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2014). *Badan Geologi kirim tim, tinjau bencana tanah longsor Banjarnegara*. (Diakses pada 30 September 2025).
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2015). *Surat Edaran Nomor 34/SE/M/2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Drainase Bawah Permukaan dengan Menggunakan Filter Geotekstil*.
- Khori Sugianti. (2012). *Pengaruh muka airtanah terhadap kestabilan lereng pada ruas Jalan Raya Cadaspangeran, Sumedang*. Riset Geologi dan Pertambangan, 22(2), 105–125.
- Naryanto, H. S. (2014). *Analisis kejadian bencana tanah longsor tanggal 12 Desember 2014 di Dusun Jemblung, Desa Sampang, Kecamatan Karangobar, Kabupaten Banjarnegara, Provinsi Jawa Tengah (The December 12, 2014 landslide disaster analysis in Jemblung Area, Sampang*

Village, Karangobar Subdistrict, Banjarnegara District, Central Java Province). Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi.

- Naryanto, H.S., 2017. *Analisis Kejadian Bencana Tanah Longsor di Dusun Jemblung, Desa Sampang, Kecamatan Karangobar, Kabupaten Banjarnegara, Provinsi Jawa Tengah tanggal 12 Desember 2014.* Jurnal Alami, 1(1), pp.1-9.
- Nicholson, A., & Chaidir A. Makarim. (2019). *Analisis creep terhadap waktu pada tanah dasar dalam proyek reklamasi Bandara Kansai International Airport.* Jurnal Mitra Teknik Sipil, 2(3), 153–161.
- Pangestu, E. C., & Akhmad Marzuko. *Perencanaan perkuatan lereng dengan metode soil nailing di daerah Bantul Yogyakarta (Design revetment with soil nailing method in Bantul Yogyakarta).* Universitas Islam Indonesia.
- Pasaribu, H. M., & Bigman Marihat Hutapea. (2017). *Analisis deformasi dan penurunan tanah pada galian dalam dengan metode elemen hingga melalui studi evaluasi model tanah.* Dalam Konferensi Nasional Pascasarjana Teknik Sipil (KNPTS) 2017. ISBN 2477-0086.
- Putra, S. P. (2022). *Studi metode perkuatan terhadap lereng menggunakan geomat, shotcrete, dan soil nailing (Studi kasus: Lereng spillway Bendungan Sadawarna Paket II Subang)* Tesis magister, Universitas Islam Sultan Agung.
- Qolby, A. A., Husnul Fataa Fahreza, & Kelana Handika Setiawan. (2025). *Analisis kestabilan lereng pada tanah berlempung menggunakan metode Bishop: Studi kasus di Desa X.* Momentum Jurnal Inovasi Rekayasa Teknik Sipil, 1(1).
- Radyanto, Aldi., Rifa'i, A., & Faris, F. (2019). *Analisis stabilitas lereng dengan sistem drainase bawah permukaan di Kabupaten Banjarnegara.* Departemen FT – UI, DEPOK
- Rosyadah, S. (2025). *Alternatif perkuatan lereng dengan gravity wall dan geosintetik pada kawasan PT United Tractors Satui Kalimantan Selatan (Alternative slope reinforcement with gravity wall and geosynthetics in PT United Tractors Satui Area South Kalimantan)* Tugas akhir, Universitas Islam Indonesia.
- Saputra, A., Edy Purwanto, & Miftahul Fauziah. *Alternatif desain perkerasan jalan dan perkuatan lereng longsor.* Universitas Islam Indonesia.
- Sinarta, I. N. (2014). *Metode penanganan tanah longsor dengan pemakuan tanah (soil nailing).* Paduraksa, 3(2).

- Syah, A., & Teuku Faisal Fathani. (2019). *Analisis stabilitas lereng dan penanganan longsor dengan menurunkan muka air tanah: Studi kasus longsor Kalitlaga, Banjarnegara, Jawa Tengah*. Dalam Seminar Nasional Hasil Penelitian Sains, Teknik, dan Aplikasi Industri 2019. Universitas Lampung.
- Syahbana, A. J., Adrin Tohari, Khoru Sugianti, Nugroho Aji Satrio, Sunarya Wibowo, & Sueno Winduhutomo. (2014). *Rekayasa hidraulika kestabilan lereng dengan sistem siphon: Studi kasus di daerah Karangsambung, Jawa Tengah (Hydraulic slope stability engineering using siphon system: Case study UPT BIKK Karangsambung, Kebumen, Jawa Tengah)*. Riset Geologi dan Pertambangan, 24(2), 103–114.
- Tarakashima, C., Athaya Zhafirah, & Dicky Muhamad Fadli. *Perkuatan soil nailing pada lereng Singajaya Garut*. Jurnal Konstruksi.
- Tarakashima, C., Zhafirah, A., & Fadli, D. M. (2023). Perkuatan Soil Nailing pada Lereng Singajaya Garut. *Jurnal Konstruksi*, 21(2), 217-223.
- Taufik, I. I. (2017). *Analisis stabilitas lereng dengan perkuatan geotekstil dan variasi ketinggian muka air tanah (Slope stability analysis by using geotextile reinforcement and groundwater level variance): Studi kasus Jalan Wanayasa–Banjarnegara Jawa Tengah, Lereng Sta. 70+500* Tugas akhir, Universitas Islam Indonesia.
- Vickyla, M. M., Irvan Sophian, & Dicky Muslim. (2019). *Pengaruh muka air tanah terhadap kestabilan lereng Tambang X*. Padjadjaran Geoscience Journal, 3(3), 191–198.
- Xu, T., John A. Apps, & Karsten Pruess. (2004). *Mineral sequestration of carbon dioxide in a sandstone-shale system*. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Zhang, D., YaFeng Li, YaNan Guo, HanLin Xia, YanXin Liu, JiaShen Yan, Fei Wang, & YinTing Wu. (2025). *Research on shale dynamic and static elastic modulus and anisotropy based on pressurization history*.