

TESIS

**ANALISIS PENGARUH KEMIRINGAN SHOTCRETE TERHADAP
FAKTOR KEAMANAN LERENG GALIAN
(Studi Kasus: Proyek Pembangunan Jalan
Bebas Hambatan Seksi 6B IKN)**

Disusun dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Persyaratan
Guna Mencapai Gelar Magister Teknik (MT)



Oleh :

ANTON SANGAJI

NIM : 20202400082

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS
SULTAN AGUNG SEMARANG 2025**

LEMBAR PERSETUJUAN TESIS

**ANALISIS PENGARUH KEMIRINGAN SHOTCRETE TERHADAP
FAKTOR KEAMANAN LERENG GALIAN
(Studi Kasus: Proyek Pembangunan Jalan
Bebas Hambatan Seksi 6B IKN)**

Disusun oleh :

ANTON SANGAJI

NIM : 20202400082

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Tanggal,

Tanggal,

Pembimbing I,

Pembimbing II,


Dr. Abdul Rochim, ST., MT

NIK. 210200031


Dr. Rifqi Brilyant Arif, ST.,MT

NIK. 210200032

LEMBAR PENGESAHAN TESIS
ANALISIS PENGARUH KEMIRINGAN SHOTCRETE TERHADAP
FAKTOR KEAMANAN LERENG GALIAN
(Studi Kasus: Proyek Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Seksi 6B IKN)

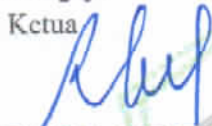
Disusun oleh :

ANTON SANGAJI
NIM : 20202400082

Dipertahankan di Depan Tim Penguji Tanggal:
12 Februari 2026

Tim Penguji:

1. Ketua



Dr. Rifqi Brilliant Arif, ST., MT

2. Anggota



Prof. Dr. Ir. Antonius, MT., IPU

3. Anggota



Ir. Moh Faiqun Ni'am, MT., Ph.D.

Tesis ini diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik (MT)


Semarang, 12 Februari 2026

Mengetahui,

Ketua Program Studi


Prof. Dr. Ir. Antonius, MT., IPU
NIK. 210202033

Mengesahkan,
Dekan Fakultas Teknik

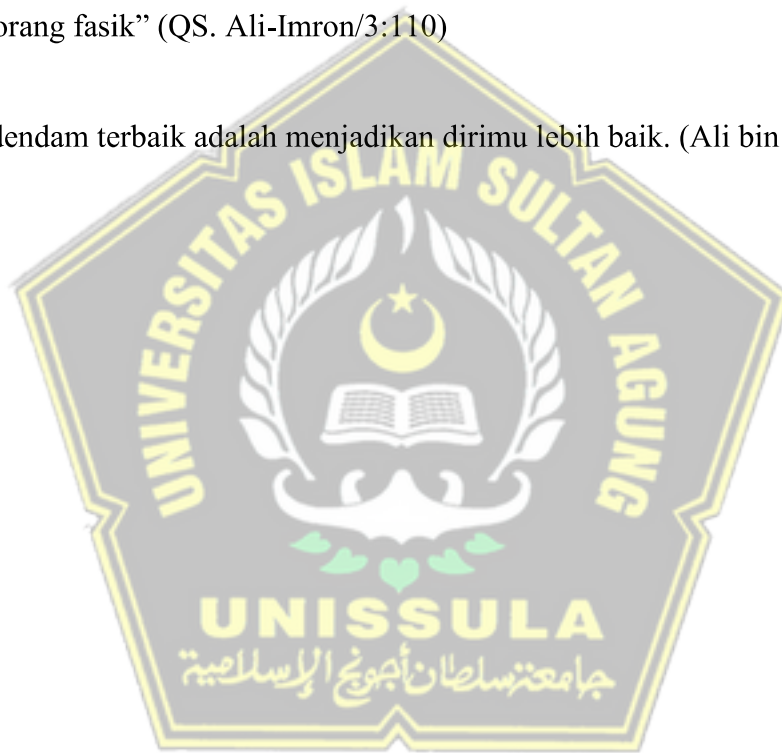

Dr. Abdul Rochim, ST., MT
NIK. 210200031

MOTTO

كُنْتُمْ خَيْرَ أُمَّةٍ أُخْرِجَتْ لِلنَّاسِ تَأْمُرُونَ بِالْمَعْرُوفِ وَتَنْهَوْنَ عَنِ الْمُنْكَرِ وَتُؤْمِنُونَ بِاللَّهِ وَلَوْ
أَمَّنَ أَهْلُ الْكِتَابِ لَكَانَ خَيْرًا لَهُمْ مِنْهُمْ الْمُؤْمِنُونَ وَأَكْثَرُهُمُ الْفَاسِقُونَ

Artinya : “ Kamu (umat Islam) adalah umat terbaik yang dilahirkan untuk manusia (selama) kamu menyuruh (berbuat) yang Makhruf, mencegah dari yang mungkar, dan beriman kepada Allah. Selandainya Ahlulkitab beriman, tentulah itu lebih baik bagi mereka. Di antara mereka ada yang beriman dan kebanyakan mereka adalah orang-orang fasik” (QS. Ali-Imron/3:110)

Balas dendam terbaik adalah menjadikan dirimu lebih baik. (Ali bin Abi Thalib)



HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, Puji Syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nay, sehingga Penulis bisa menyelesaikan Tesis ini. Tesis ini Penulis persembahkan untuk:

1. Kepada kedua orang tua dan mertua tercinta, atas cinta, kasih sayang, pengertian, kesabaran, dan doa yang tak ternilai, yang selalu menjadi fondasi utama dalam setiap langkah saya.
2. Kepada istri dan anak-anak tercinta saya terima kasih atas dukungan secara materiil dan non materiil, serta motivasi, bimbingan dan aura semangat yang tidak pernah padam yang diberikan selama proses penyusunan tesis.
3. Kepada kakak dan adik tercinta saya atas bantuan dan waktu yang diluangkan untuk mendukung penyelesaian tugas ini. Terima kasih atas kerja sama dan kontribusinya.
4. Kepada teman-teman, seluruh tim proyek Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Seksi 6B IKN yang luar biasa atas kesediaannya membantu proses tesis ini dan menjadi partner yang luar biasa selama study S2 ini.
5. Kepada Pembimbing 1 saya Bapak Dr. Abdul Rochim, ST., MT Pembimbing 2 saya Bapak Dr. Rifqi Brillyant Arif, ST., MT dalam arahan yang selalu intens dan sabar dalam mengarahkan saya untuk penyelesaian tesis yang baik dan benar.

ABSTRAK

Pembangunan infrastruktur jalan di Ibu Kota Nusantara (IKN) menghadapi tantangan geoteknik signifikan akibat keberadaan lapisan *Clay shale* yang masif. *Clay shale* merupakan batuan lempung dengan karakteristik kompleks, rapuh, permeabilitas rendah, serta sangat sensitif terhadap perubahan kadar air. Material ini mudah mengalami pelapukan akibat fenomena *slaking* dan *fissility*, yang menyebabkan degradasi kekuatan geser dan berpotensi memicu ke longsor, terutama pada daerah dengan curah hujan tinggi atau kegiatan galian terbuka, penelitian ini bertujuan mengetahui seberapa efektif *shotcrete* dalam mencegah stabilitas tanah *clay shale* dengan beberapa macam variasi kemiringan lereng.

Penelitian mengambil studi kasus pada pembangunan jalan beban hambatan IKN paket 6B yang kebanyakan lapisan tanah merupakan tanah *clay shale*. Penanganan kondisi ini memerlukan pendekatan mitigasi berbasis karakteristik tanah yang komprehensif, seperti penguatan lereng dengan struktur penahan, stabilisasi tanah, serta perlindungan permukaan menggunakan *shotcrete*. *Shotcrete* berfungsi sebagai pengendali erosi, penghambat infiltrasi, dan penunjang awal kekakuan lereng melalui penyemprotan beton bertekanan tinggi pada permukaan yang terlapuk. Penelitian ini menggunakan metode numerik guna mendapatkan gambaran secara komprehensif kondisi lereng yang dimitigasi dengan *shotcrete*.

Hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi lereng tanpa perkuatan dan dengan perkuatan memiliki perbedaan yang cukup signifikan, di mana penerapan *shotcrete* cenderung meningkatkan nilai *Safety factor* (SF) pada sebagian besar kondisi. Sebelum perkuatan, lereng dengan kemiringan 1:0,5 hingga 2:1 memiliki nilai SF antara 0,6 – 1,335, seluruhnya masih di bawah kriteria aman 1,5. Setelah perkuatan dengan *shotcrete*, nilai SF meningkat, yaitu pada rentang 1,27 – 1,335, namun tetap belum mencapai batas aman 1,5. Berdasarkan hasil ini, kemiringan minimum lereng yang direkomendasikan untuk diaplikasikan adalah 1,5:1 dan 2:1, karena memiliki potensi stabilitas yang lebih baik dan dapat dipertahankan di atas batas aman dalam jangka Panjang.

Kata kunci: *Clay shale*, Galian Lereng, *Shotcrete*, *Safety factor*, Stabilitas Lereng

ABSTRACT

The construction of road infrastructure in the new capital city (IKN) faces significant geotechnical challenges due to the widespread presence of clay shale layers. Clay shale is a claystone with complex characteristics: brittle, low permeability, and highly sensitive to changes in moisture content. This material is prone to weathering caused by slaking and fissility, leading to a reduction in shear strength and potential slope failures, particularly in areas with high rainfall or open excavations. This study aims to evaluate the effectiveness of shotcrete in stabilizing clay shale slopes with various slope inclinations.

The case study was conducted on the IKN Section 6B road construction project, where the subsoil is predominantly composed of clay shale. Addressing this condition requires mitigation measures tailored to soil characteristics, such as slope reinforcement with retaining structures, soil stabilization, and surface protection using shotcrete. Shotcrete functions as erosion control, an infiltration barrier, and an initial support system for slope stiffness by spraying high-pressure concrete onto weathered surfaces. This research applies numerical methods to obtain a comprehensive understanding of slope conditions mitigated with shotcrete.

The analysis results show a significant difference between unreinforced and reinforced slope conditions, with shotcrete generally increasing the Safety factor (SF) in most cases. Before reinforcement, slopes with inclinations ranging from 1:0.5 to 2:1 had SF values between 0.6 and 1.335, all of which were below the safety criterion of 1.5. After reinforcement with shotcrete, the SF increased to a range of 1.27–1.335, but still did not reach the safety threshold of 1.5. Based on these findings, the recommended minimum slope inclinations are 1.5:1 and 2:1, as they provide better stability potential and can be maintained above the safety limit in the long term.

Keyword: *Clay shale, Slope Excavation, Shotcrete, Safety factor, Slope Stability*

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : ANTON SANGAJI

NIM : 20202400082

Dengan ini saya nyatakan bahwa Tesis yang berjudul:

ANALISIS PENGARUH KEMIRINGAN SHOTCRETE TERHADAP FAKTOR KEAMANAN LERENG GALIAN

Adalah benar hasil karya saya dan dengan penuh kesadaran bahwa saya tidak melakukan tindakan plagiasi atau mengambil alih seluruh atau sebagian besar karya tulis orang lain tanpa menyebutkan sumbernya. Jika saya terbukti melakukan tindakan plagiasi, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan aturan yang berlaku.

Semarang, 12 Februari 2025



ANTON SANGAJI

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur Penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmatNya sehingga Penulis dapat menyelesaikan Tesis dengan judul “ **Analisis Pengaruh Kemiringan Shotcrete Terhadap Faktor Keamanan Lereng Galian**” guna memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik program studi Teknik Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung.

Penulis menyadari kelemahan serta keterbatasan yang ada sehingga dalam menyelesaikan tesis ini memperoleh bantuan dari berbagai pihak, dalam kesempatan ini Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Abdul Rochim, ST, MT selaku Dosen Pembimbing I yang selalu memberikan waktu dan saran selama penyusunan Tesis ini.
2. Bapak Dr. Rifqi Brilyant Arief , ST.,MT selaku Dosen Pembimbing II yang selalu memberikan waktu bimbingan dan arahan selama penyusunan Tesis ini.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Antonius, M.T. selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil.
4. Seluruh Dosen dan Staf Program Studi Magister Teknik Sipil UNISSULA yang telah memberikan ilmunya kepada Penulis.

Penulis menyadari bahwa Tesis ini masih banyak kekurangan baik isi maupun susunannya. Semoga Tesis ini dapat bermanfaat tidak hanya bagi Penulis juga bagi para Pembaca.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERSETUJUAN TESIS.....	ii
MOTTO	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian	2
1.4. Manfaat Penelitian	3
1.5. Batasan Masalah.....	3
1.6. Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Definisi Tanah.....	5
2.2 Tanah.....	5
2.2.1 Klasifikasi Tanah	5
2.2.2 Tes Boring.....	6
2.3 <i>Clay shale</i>	6
2.3.1 Kekuatan Geser <i>Clay shale</i>	8
2.3.2 Kriteria Keruntuhan Mohr – Coulomb.....	9
2.3.3 Pengurangan Kekuatan Geser <i>Clay shale</i> Akibat Proses Pelapukan	11

2.4	Perbaikan Lereng	14
2.5	Analisis Stabilitas Lereng	17
2.6	Soil Nailing	19
2.7	Dinding Penahan Tanah	21
2.6.1	Definisi Dinding Penahan Tanah	21
2.6.2	Jenis Dinding Penahan Tanah	22
2.6.3	Faktor Kerusakan Dinding Penahan Tanah	24
2.8	<i>Shotcrete</i>	27
2.5.1	Fungsi Shotcrete.....	29
2.9	<i>Software Numerik</i>	29
2.10	Penelitian Terdahulu	30
2.11	<i>Research Gap</i>	23
BAB III METODE PENELITIAN (tambah foto foto lapangan)		24
3.1	Bentuk Penelitian	24
3.2	Lokasi Penelitian.....	24
3.3	Metode Pengumpulan Data.....	25
3.4	Metode Analisis Data.....	26
3.5	Tahapan Penelitian.....	27
3.6	Alur Penelitian	29
BAB IV HASIL PEMBAHASAN		28
4.1	Umum.....	28
4.2	Parameter Analisis (tambah keterangan dari somantri)	29
4.3	Pemodelan Autocad (copy gambar di BAB 3 BAB variabel penelitian).....	31
4.4	Analisis <i>PLAXIS</i>	32
4.3.1	Project Properties	32
4.3.2	Material Setting.....	33

4.3.3	Pemodelan <i>PLAXIS</i>	34
4.3.4	Mesh (hapus)	35
4.3.5	Structure Analysis	35
4.5	Hasil Analysis (tambahkan narasi per kemiringan lereng)	36
4.5.1	Kemiringan Lereng 1 : 0.5	36
4.5.2	Kemiringan Lereng 1 : 1	37
4.5.3	Kemiringan Lereng 1 : 1.5	39
4.5.4	Kemiringan Lereng 1 : 2	42
4.5.5	Perbandingan Hasil Analisis	45
BAB V KESIMPULAN DAN HASIL		45
5.1	Kesimpulan	45
5.2	Saran	45
Daftar Pustaka.....		45



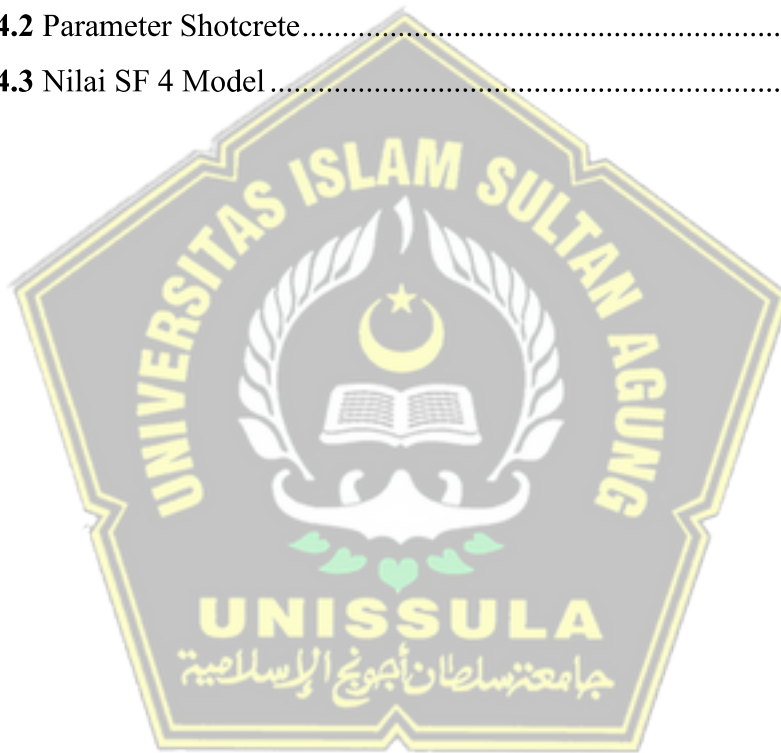
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi proses disintegrasi pada pelapukan Clay shale	7
Gambar 2.2 Multistage Triaxial UU Test pada Clay shale untuk mendapatkan Kekuatan Geser Puncak, Kekuatan Geser Residual (without stress release) dan kekuatan geser residual. Sumber : (Idrus, 2021).....	9
Gambar 2.3 Kriteria Kegagalan Mohr – Coloumb	10
Gambar 2.4 Gred pelapukan W0 (mula-mula) hingga W5 (sangat terpelapukan) terhadap pengurangan sudut geser dalam efektif dan kohesi efektif	12
Gambar 2.5 Hubungan tegangan regangan dari Pamploma Marl unconfined compression test.....	14
Gambar 2.6 Perbaikan Stabilitas Lereng (Sumber: Hardiyatmo, HC. 2003. Mekanika Tanah II).....	15
Gambar 2.7 Perbaikan Stabilitas Lereng Metode Geometri (Sumber: Hardiyatmo, HC. 2003. Mekanika Tanah II).....	16
Gambar 2.8 Perbaikan Stabilitas Lereng (Sumber: Hardiyatmo, HC. 2003. Mekanika Tanah II).....	16
Gambar 2.9 Gaya yang bekerja pada irisan	18
Gambar 2.10 Contoh Soil Nailing (SNI Geoteknik, 2017)	20
Gambar 2.5 Dinding penahan tanah tipe kantilever	22
Gambar 2.11 Dinding penahan tanah tipe kantilever	23
Gambar 2.12 Dinding penahan tanah tipe counterfort	23
Gambar 2.13 Beberapa contoh kegagalan dinding penahan tanah.....	26
Gambar 2.14 Metode Dry Shotcrete Sumber : (Metode Dry Shotcrete).....	27
Gambar 2.15 Metode Wet Shotcrete	28
Gambar 3.1 Lokasi Penelitian	24
Gambar 3.2 Kondisi Longsoran Dari Atas	25
Gambar 3.3 Kondisi Longsoran Dari Bawah	25
Gambar 3.4 Diagram Alir.....	30
Gambar 4.1 Hasil Uji Borehole	30
Gambar 4.2 Pemodelan Autocad	31
Gambar 4.3 Project Properties.....	33
Gambar 4.4 (Input Material Paraneter input di kotakin)	34

Gambar 4.5 Permodelan PLAXIS.....	34
Gambar 4.6 Mesh	35
Gambar 4.7 Stage Konstruksi.....	36
Gambar 4.8 Permodelan Kemiringan Lereng 1:0.5.....	37
Gambar 4.9 Output Initial Phase Kemiringan Lereng 1 : 0.5.....	37
Gambar 4.10 Permodelan Kemiringan Lereng 1:1.....	38
Gambar 4.11 Nilai Safety factor Initial Phase Kemiringan Lereng 1 : 1	38
Gambar 4.12 Nilai Safety factor Instal Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 1	39
Gambar 4.13 Nilai Safety Service Load Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 1	39
Gambar 4.14 Permodelan Kemiringan Lereng 1 : 1.5.....	40
Gambar 4.15 Nilai Safety factor Initial Phase Kemiringan Lereng 1 : 1.5	40
Gambar 4.16 Nilai Safety factor Instal Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 1.5	41
Gambar 4.17 Nilai Safety Service Load Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 1.5 ..	41
Gambar 4.18 Nilai Safety Konsolidasi 1 Tahun Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 1.5.....	42
Gambar 4.19 Nilai Safety Konsolidasi 10 Tahun Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 1.5.....	42
Gambar 4.20 Permodelan Kemiringan Lereng 1 : 2.....	43
Gambar 4.21 Nilai Safety factor Initial Phase Kemiringan Lereng 1 : 2	43
Gambar 4.22 Nilai Safety factor Instal Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 2	44
Gambar 4.23 Nilai Safety Service Load Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 2	44
Gambar 4.24 Nilai Safety Konsolidasi 1 Tahun Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 2.....	45
Gambar 4.25 Nilai Safety Konsolidasi 10 Tahun Shotcrete Kemiringan Lereng 1 : 2.....	45

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Batasan-Batasan Ukuran Golongan Tanah.....	5
Tabel 2.2 Pelapukan terhadap penurunan sudut geser dalam efektif dan kohesi efektif	13
Tabel 2.3 Rekomendasi Nilai Faktor Keamanan untuk Lereng	17
Tabel 2.4 Kombinasi Campuran Bahan Shotcrete	28
Tabel 2.5 Perbandingan Penelitian yang akan dilakukan dalam tesis ini dengan penelitian penelitian sebelumnya	19
Tabel 4.1 Parameter Pemodelan.....	30
Tabel 4.2 Parameter Shotcrete.....	30
Tabel 4.3 Nilai SF 4 Model	46



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Jalan merupakan sektor penting dalam pertumbuhan ekonomi suatu negara karena berperan sebagai distribusi barang, jasa, dan mobilitas penduduk. Salah satu lokasi berada di Ibu Kota Nusantara (IKN), pembangunan infrastruktur jalan menjadi prioritas utama dalam mendukung konektivitas antarzona, mempercepat akses logistik, serta mendorong pertumbuhan kawasan inti pusat pemerintahan dan wilayah masyarakat. Salah satu permasalahan paling sering terjadi pada pembangunan di IKN adalah lapisan *Clay shale* yang begitu massif.

Clay shale merupakan salah satu jenis batuan lempung yang memiliki karakteristik geoteknik yang kompleks dan menantang, khususnya dalam konteks kestabilan lereng (Fitri et al., 2023). Pada lapisan *Clay shale* yang terpapar memperlihatkan tingkat pelapukan tinggi yang berkontribusi signifikan terhadap potensi kelongsoran (Fitri et al., 2023). Material ini tersusun atas partikel lempung berlapis yang mengalami proses diagenesis parsial, menghasilkan struktur yang rapuh, permeabilitas rendah, serta sangat sensitif terhadap perubahan kadar air (Sabrina et al., 2023). *Clay shale* menunjukkan daya tahan mekanis yang terbatas, terutama saat mengalami jenuh air.

Dalam proyek-proyek infrastruktur skala besar, keberadaan *Clay shale* yang mengalami pelapukan memerlukan pendekatan teknik mitigasi yang terencana dan berbasis karakteristik tanah yang komprehensif. Strategi penanganan dapat mencakup penggunaan sistem drainase bawah permukaan, penguatan lereng dengan struktur penahan (*retaining structure*), serta perbaikan tanah melalui teknik stabilisasi kimia atau mekanik. Evaluasi lebih lanjut terhadap parameter seperti durabilitas batuan, indeks pelapukan, dan uji laboratorium seperti *slake durability test*, sangat diperlukan untuk mendukung desain yang aman dan berkelanjutan.

Material *Clay shale* tinggi berpotensi membentuk jalur rembesan air sepanjang bidang belahan, sehingga diperlukan perencanaan sistem drainase permukaan dan sub-permukaan yang komprehensif untuk mengendalikan infiltrasi air dan mengurangi tingkat kelembapan pada massa tanah. *Shotcrete* diaplikasikan

melalui penyemprotan campuran beton dengan tekanan tinggi ke permukaan lereng, memungkinkan penetrasi ke dalam celah atau permukaan tidak rata, sekaligus memberikan dukungan struktural awal (*initial support*) terhadap massa tanah berkohesi rendah. Selain berfungsi sebagai pengendali erosi dan infiltrasi, *shotcrete* juga meningkatkan kekakuan permukaan lereng.

Seiring meningkatnya aktivitas galian dan eksposur lereng terhadap pengaruh lingkungan, karakteristik *Clay shale* menjadi sangat sensitif terhadap perubahan kadar air. Kondisi ini dapat mempercepat terjadinya proses *slaking* dan perkembangan *fissility*, yang berpotensi menurunkan kekuatan serta kestabilan lereng. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis elemen perkuatan tambahan seperti *shotcrete*, yang berperan dalam meningkatkan interlocking dan dukungan lateral, serta mengurangi potensi pergerakan tanah secara lokal. Dengan pendekatan terpadu antara perlindungan permukaan dan sistem drainase yang tepat, risiko ketidakstabilan lereng pada *Clay shale* dapat diminimalkan secara signifikan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka rumusan masalah yang akan dikaji melalui penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Berapa Maksimum sudut kemiringan galian tanah yang masih bisa ditahan oleh *shotcrete*?
2. Bagaimana perbandingan hasil faktor keamanan (SF) tanah tanpa perkuatan vs perkuatan *shotcrete*?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui stabilitas lereng menggunakan metode *shotcrete* dalam menjaga stabilitas tanah. Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis Maksimum sudut kemiringan tanah yang masih bisa ditahan oleh *shotcrete*.
2. Membandingkan hasil faktor keamanan (SF) tanah tanpa perkuatan vs perkuatan *shotcrete*.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara akademis maupun praktis. Secara akademis, penelitian ini berkontribusi dalam membuat kajian ilmiah mengenai karakteristik dan perilaku tanah *Clay shale*, serta penerapan metode *shotcrete* sebagai sistem perkuatan lereng. Secara praktis, hasil dari penelitian ini dapat menjadi acuan teknis bagi para praktisi geoteknik dan perencana infrastruktur dalam menangani permasalahan kestabilan lereng pada wilayah dengan dominasi tanah *Clay shale*. Selain itu, penelitian ini juga memberikan manfaat langsung bagi Proyek Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Seksi 6B Ibu Kota Nusantara (IKN) sebagai masukan dalam mengevaluasi penanganan lereng eksisting sekaligus sebagai dasar pertimbangan dalam pengambilan keputusan teknis di lapangan.

1.5. Batasan Masalah

Untuk mendapatkan pemecahan masalah yang tepat dan terarah sesuai dengan rumusan masalah, maka dalam penelitian ini terdapat batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dibatasi pada Proyek Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Seksi 6B Ibu Kota Nusantara (IKN).
2. Mitigasi yang digunakan hanya dengan metode *shotcrete* pada analisis numerik.
3. Analisis hanya dilakukan pada STA 2+850.

1.6. Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah dalam memahami hasil penelitian ini, maka digunakan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini memuat latar belakang, perumusan masalah, Batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka memuat studi literatur dan berbagai penelitian terdahulu yang berkaitan dengan permasalahan dalam penelitian. Hasil studi dikembangkan lebih

lanjut menjadi landasan teori yang akan menjadi dasar untuk menjawab permasalahan yang menjadi fokus penelitian ini.

BAB III METODE PENELITIAN

Metode penelitian memuat uraian terinci tentang bentuk penelitian, tahapan penelitian, teknik pengambilan data, teknik pengolahan data, serta teknik analisis data.

BAB IV PEMBAHASAN DAN HASIL PENELITIAN

Bab ini berisi tentang pengolahan data, pemodelan serta pembahasan mengenai penelitian yang dilakukan.

BAB V PENUTUP

Pada bab ini menjelaskan mengenai kesimpulan dan saran terhadap penelitian Analisis Pengaruh kemiringan shotcrete terhadap faktor keamanan lereng galian (Studi Kasus: Proyek Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Seksi 6B IKN



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi Tanah

Dalam konteks teknik secara umum, tanah merupakan material yang tersusun dari butiran-butiran mineral padat yang tidak terikat secara kimia (tidak tersementasi), serta mengandung bahan organik hasil pelapukan yang berbentuk partikel padat. Ruang kosong di antara partikel-partikel padat tersebut biasanya terisi oleh cairan dan gas (Pratikso, 2007).

2.2 Tanah

Secara umum dalam bidang teknik, tanah didefinisikan sebagai material yang tersusun dari agregat mineral padat berupa butiran yang tidak saling terikat secara kimia (tidak tersementasi), serta mengandung bahan organik hasil pelapukan yang berbentuk partikel padat. Di antara partikel-partikel padat ini terdapat ruang kosong yang diisi oleh cairan dan gas (BM, 1995). Dalam pekerjaan teknik sipil, tanah dimanfaatkan sebagai bahan konstruksi dan juga berperan penting sebagai media pendukung pondasi bangunan.

2.2.1 Klasifikasi Tanah

Ukuran partikel tanah sangat bervariasi. Berdasarkan dominasi ukuran partikelnya, tanah dapat dikategorikan menjadi beberapa jenis, yaitu kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*), dan lempung (*clay*).

Tabel 2.1 Batasan-Batasan Ukuran Golongan Tanah

Nama Golongan	Ukuran Butiran (mm)			
	Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	>2	2 – 0,06	0,06 – 0,002	<0,002
U.S. Department of Agriculture (USDA)	>2	2 – 0,075	0,05 – 0,002	<0,002

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	76,2 - 2	2 - 0,075	0,075 - 0,002	<0,002
Unified Soil Classification System (U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Bureau of Reclamation)	76,2 - 4,75	4,75 - 0,075	Halus (yaitu lanau dan lempung) <0,0075.	

Sumber : (Casagrande, 1942)

2.2.2 Tes Boring

Borelog adalah metode investigasi tanah yang dilakukan dengan pengeboran hingga kedalaman tertentu untuk mengamati kondisi lapisan tanah secara visual serta mengambil sampel tanah. Data yang diperoleh digunakan untuk mendeskripsikan dan mengklasifikasikan jenis tanah, serta menjadi bahan untuk pengujian lebih lanjut di laboratorium.

2.3 Clay shale

Clay shale dan batuan sedimen pada umumnya rentan terhadap pelapukan yang mengarah pada penurunan kualitas material. Tanah lempung kaku yang terendam air akan mengalami penurunan daya dukung secara bertahap (Skempton, 1964), namun proses ini memerlukan waktu yang cukup lama, yakni sekitar 16 hingga 80 tahun untuk mencapai kondisi sangat lunak (Skempton, 1977). Berbeda halnya dengan *Clay shale* yang berada pada kondisi terbuka, dimana proses degradasi berlangsung lebih cepat akibat terpapar perubahan cuaca dan siklus kering-basah. Menurut (AK Somantri, 2018) berdasarkan hasil pengujian laboratorium, tanah *clay shale* yang diuji didominasi oleh fraksi lanau dengan sifat lempung berupa tingkat pengembangan (*swelling*), plastisitas, dan kohesivitas yang tinggi, serta tergolong sebagai tanah aktif dengan kandungan mineral montmorillonite sebagai salah satu komponen utamanya. Pengeringan menjadi awal mula terjadinya degradasi pada *Clay shale* (Sadisun et al., 2010; Alatas et al., 2015), meskipun

dampaknya masih terbatas (Alatas & Simatupang, 2017). Setelah mengalami pengeringan, proses pembasahan akan mempercepat laju degradasi ((Duncan et al., 1991); (Sadisun et al., 2010); Alatas & Simatupang, 2017).

Jika siklus kering-basah ini terus berulang, maka tingkat degradasi akan meningkat lebih cepat (Nazir et al., 2016). Skema proses disintegrasi akibat siklus pengeringan dan pembasahan diperlihatkan pada Gambar 2.1. Pengeringan memicu terbentuknya retakan halus sebagai tahap awal degradasi. Ketika *Clay shale* mengalami pembasahan, air akan dengan mudah terserap melalui retakan tersebut, terutama pada *Clay shale* yang kaya akan mineral *smectit* yang memiliki kapasitas serap air tinggi (Zhang et al., 2017). Kehadiran air ini melemahkan ikatan antar mineral lempung, mengakibatkan berkurangnya daya dukung tanah dan akhirnya menyebabkan disintegrasi ((Duncan et al., 1991); (Sadisun et al., 2010)).

Durabilitas *Clay shale* umumnya menurun seiring dengan meningkatnya kandungan mineral lempung dalam *mud rock* (Gautam & Shakoor, 2013; (Nazir et al., 2016). Di antara berbagai jenis mineral lempung, *smectite* memiliki pengaruh paling signifikan terhadap penurunan durabilitas dibandingkan *kaolinite* maupun *illite*. Semakin tinggi kadar *smectite* yang terkandung dalam batuan, maka ketahanannya terhadap pelapukan dan degradasi akan semakin rendah (Sadisun et al., 2010; Alatas & Simatupang, 2017).



Gambar 2.1 Ilustrasi proses disintegrasi pada pelapukan *Clay shale*

Sumber : (Dokumen pribadi)

Berdasarkan pengamatan lapangan durabilitas *Clay shale* dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu siklus kering-basah, karakteristik mineralogi, serta

kondisi pembebanan. Adapun faktor-faktor yang memicu pelapukan *Clay shale* meliputi:

- a. Terbukanya kondisi *Clay shale* yang membuatnya rentan terhadap fluktuasi cuaca, khususnya siklus kering dan basah.
- b. Proses pengeringan atau pembasahan yang terjadi secara terpisah sudah dapat memicu degradasi, namun jika terjadi secara berulang sebagai siklus, maka kecepatan degradasi akan meningkat.
- c. Terjadinya pelepasan tegangan yang menyebabkan *Clay shale* berada dalam kondisi overkonsolidated.
- d. Jenis pembebanan, dimana pembebanan secara siklik cenderung mempercepat proses degradasi dibandingkan pembebanan statis.
- e. Komposisi mineral lempung, khususnya jika kandungan *smectite* cukup tinggi, akan mempercepat terjadinya pelapukan.

2.3.1 Kekuatan Geser *Clay shale*

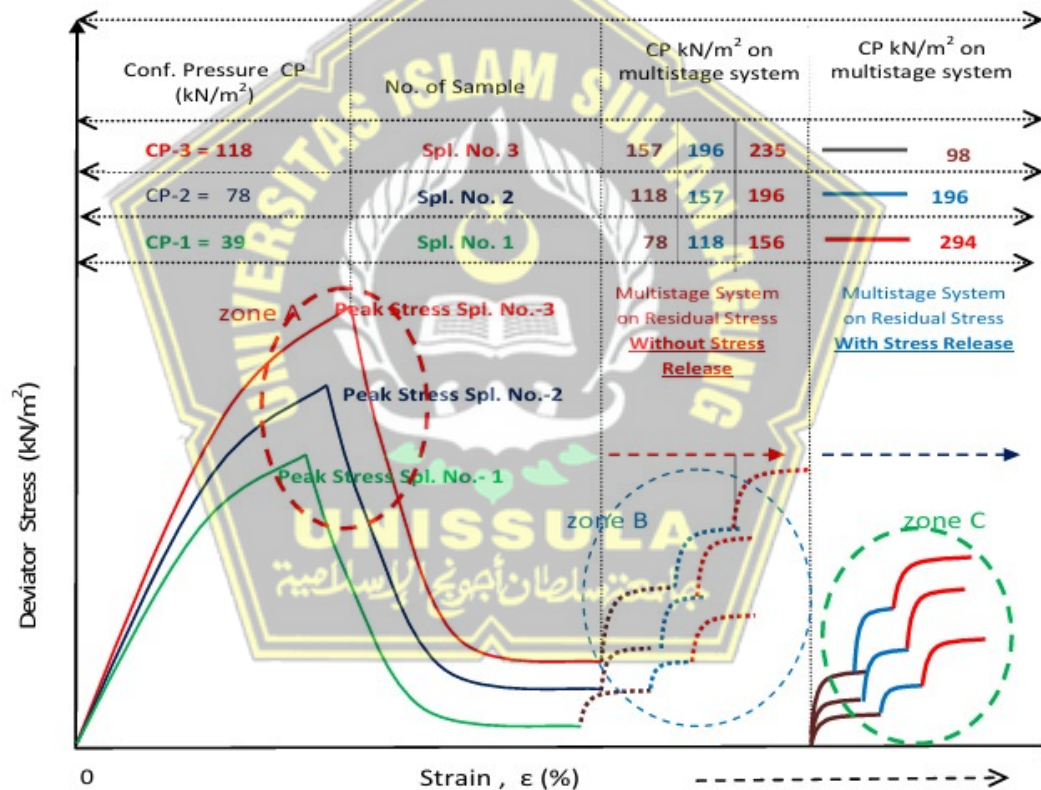
Penentuan kekuatan geser dalam analisis geoteknik memegang peranan penting terhadap keberhasilan suatu perencanaan. Nilai kekuatan geser untuk desain tanah *Clay shale* yang mengacu pada referensi Gartung (1986), yakni $c = 15$ kPa dan $\phi = 20^\circ$, tidak selalu akurat untuk diterapkan dalam semua kondisi kasus. Berdasarkan kejadian kelongsoran pada lereng *Clay shale* di Jalan Tol Semarang–Bawen pada STA 19+250, serta hasil penelitian mengenai pengaruh pelapukan terhadap penurunan kekuatan geser puncak dan residual, diketahui bahwa pemilihan parameter kekuatan geser harus disesuaikan dengan mekanisme kelongsoran yang terjadi. Oleh karena itu, penentuan faktor keamanan lereng *Clay shale* sangat bergantung pada pemakaian parameter yang tepat sesuai kondisi aktual lapangan (Alatas & Simatupang, 2017).

Sebelum terbentuknya bidang longsor, kekuatan geser tanah *Clay shale* yang digunakan adalah kekuatan geser puncak, namun nilai ini telah mengalami penurunan akibat pelapukan di lapangan. Menurut rekomendasi Gartung (1986), untuk keperluan desain digunakan parameter $c = 15$ kPa dan $\phi = 20^\circ$. Umumnya, kekuatan geser yang dipakai dalam analisis direduksi sebesar 20% hingga 80% dari

nilai puncaknya, tergantung tingkat pelapukan yang terjadi, sehingga diperlukan kajian lebih lanjut.

Jika longsoran sudah terjadi namun tidak dilakukan penggalian, maka digunakan parameter kekuatan geser sisa tanpa *stress release*, yang diperoleh melalui uji laboratorium seperti triaxial test atau direct shear test, setelah kondisi tegangan mencapai titik residual dan diuji kembali dengan penambahan tegangan normal secara bertahap.

Sementara itu, jika penanganan longsor melibatkan penggalian dan penimbunan, maka digunakan kekuatan geser sisa dengan stress release, karena proses penggalian menyebabkan berkurangnya tegangan tanah, termasuk pada bidang longsor yang sudah terbentuk.



Gambar 2.2 Multistage Triaxial UU Test pada *Clay shale* untuk mendapatkan Kekuatan Geser Puncak, Kekuatan Geser Residual (without stress release) dan kekuatan geser residual.

Sumber : (Idrus, 2021)

2.3.2 Kriteria Keruntuhan Mohr – Coulomb

Mohr (1900) telah mengemukakan sebuah teori mengenai kegagalan material. Teori ini menegaskan bahwa kegagalan suatu material terjadi akibat kombinasi

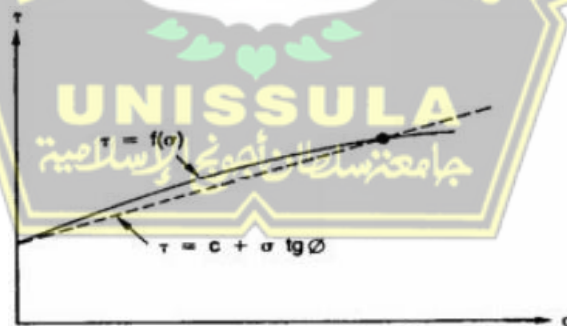
kritis antara tegangan normal dan tegangan geser, bukan disebabkan oleh tegangan normal maksimum atau tegangan geser maksimum secara terpisah. Oleh karena itu, hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser pada bidang kegagalan dapat dinyatakan dalam bentuk suatu persamaan.

$$\tau_f = f(\sigma_n) \dots\dots\dots (2.1)$$

Di mana τ_f merupakan kekuatan geser pada suatu bidang, dan σ_n adalah tegangan normal pada bidang yang sama. Dengan demikian, hubungan kekuatan geser saat terjadi kegagalan dapat dinyatakan dalam Persamaan (2.1). Sementara itu, (Coulomb, 1776) menyatakan bahwa kekuatan geser saat kegagalan (τ_f) pada suatu titik dalam kondisi tertentu merupakan fungsi linear dari tegangan normal (σ_n) pada bidang di titik tersebut, yang dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi \dots\dots\dots (2.2)$$

Di mana c merupakan kohesi (dalam satuan kN/m^2), dan ϕ adalah sudut geser dalam satuan derajat. Persamaan (2.2) ini dikenal sebagai kriteria kegagalan Mohr-Coulomb. Kurva kegagalan serta kriteria tersebut diperlihatkan pada Gambar berikut.



Gambar 2.3 Kriteria Kegagalan Mohr – Coloumb

Sumber : (Prayogo, 2015)

Pada keadaan sampel jenuh, maka tegangan normal ialah tegangan normal efektif (σ') ditambah tegangan air pori (u) yaitu:

$$\sigma_t = \sigma' + u \dots\dots\dots (2.3)$$

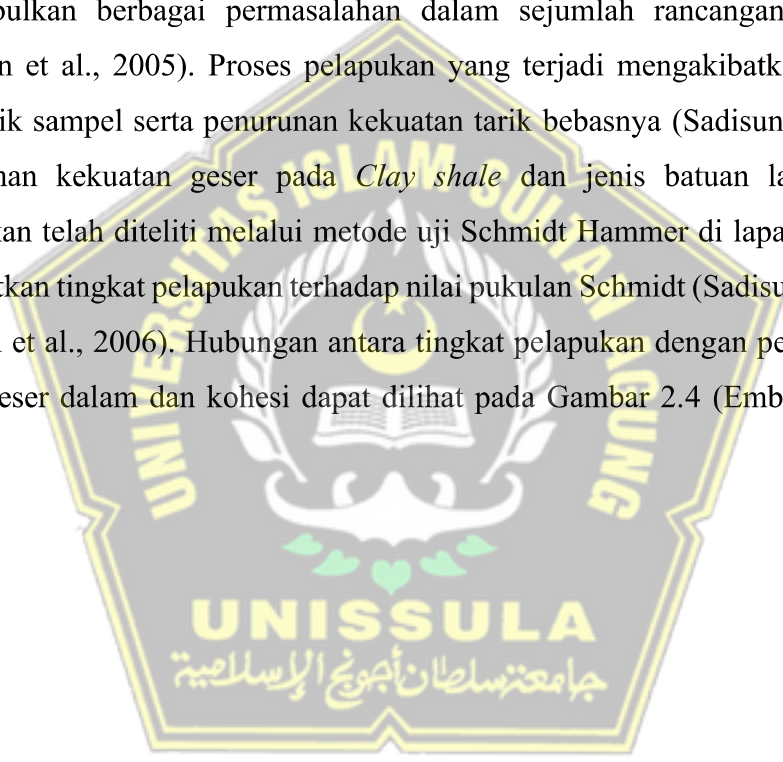
Jika tegangan efektif (σ') dalam persamaan (2.3) diperoleh, maka dengan Persamaan (2.2) akan menjadi

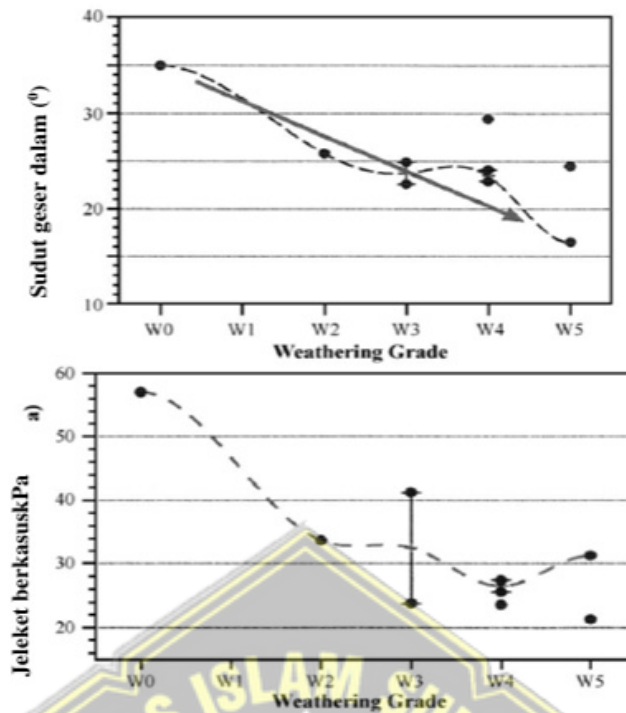
$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \phi' = c' + \sigma' \tan \phi' \dots\dots\dots(2.4)$$

di mana c' ialah kohesi efektif dan ϕ' ialah sudut geser dalam efektif.

2.3.3 Pengurangan Kekuatan Geser *Clay shale* Akibat Proses Pelapukan

Clay shale pada Formasi Subang tersebar luas di wilayah utara Jawa Barat, Indonesia. Ketika material ini terpapar langsung oleh atmosfer dan hidrosfer, kekuatan gesernya mengalami penurunan secara progresif, yang kemudian dapat menimbulkan berbagai permasalahan dalam sejumlah rancangan teknik sipil (Sadisun et al., 2005). Proses pelapukan yang terjadi mengakibatkan perubahan sifat fisik sampel serta penurunan kekuatan tarik bebasnya (Sadisun et al., 2002). Penurunan kekuatan geser pada *Clay shale* dan jenis batuan lainnya akibat pelapukan telah diteliti melalui metode uji Schmidt Hammer di lapangan, dengan mengaitkan tingkat pelapukan terhadap nilai pukulan Schmidt (Sadisun et al., 2001; Sadisun et al., 2006). Hubungan antara tingkat pelapukan dengan penurunan nilai sudut geser dalam dan kohesi dapat dilihat pada Gambar 2.4 (Emberhardt et al., 2004).





Gambar 2.4 Gred pelapukan W0 (mula-mula) hingga W5 (sangat terpelapukan) terhadap pengurangan sudut geser dalam efektif dan kohesi efektif
 Sumber : (Emberhardt E, 2004)

Penelitian mengenai dampak pengeringan udara terhadap perubahan kekuatan geser pada Marl Taylor dan Shale Navarro telah dilakukan menggunakan uji triaksial bertahap. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan kekuatan geser mulai terlihat setelah proses pengeringan udara selama 48 jam. Dalam kurun waktu pengeringan tersebut, telah terjadi perubahan signifikan pada kekuatan geser. Tabel 2.2 menyajikan daftar perubahan nilai kohesi dan sudut geser dalam sebagai akibat dari proses pengeringan udara (Youn & Tonon, 2010). Penelitian oleh Reißmüller (1977) juga menemukan bahwa kohesi efektif menurun seiring meningkatnya tingkat pelapukan, dari 57 kPa pada tingkat pelapukan gred ke-0 menjadi 36 kPa pada tingkat pelapukan 5, berdasarkan hasil uji kotak geser.

Tabel 2.2 Pelapukan terhadap penurunan sudut geser dalam efektif dan kohesi efektif

Formasi	Kekuatan Geser	Masa Pengeringan					
		0 jam	4 jam	8 jam	16 jam	24 jam	48 jam
Marl Taylor	ϕ_u (°)	1.1	1.5	2.0	2.7	3.2	3.5
	Kohesi (kPa)	1050	833	775	665	6.23	598
Shale Navarro	ϕ_u (°)	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	*
	Kohesi (kPa)	733	682	634	549	4.75	*

*) tidak dapat diuji karena sampel hancur

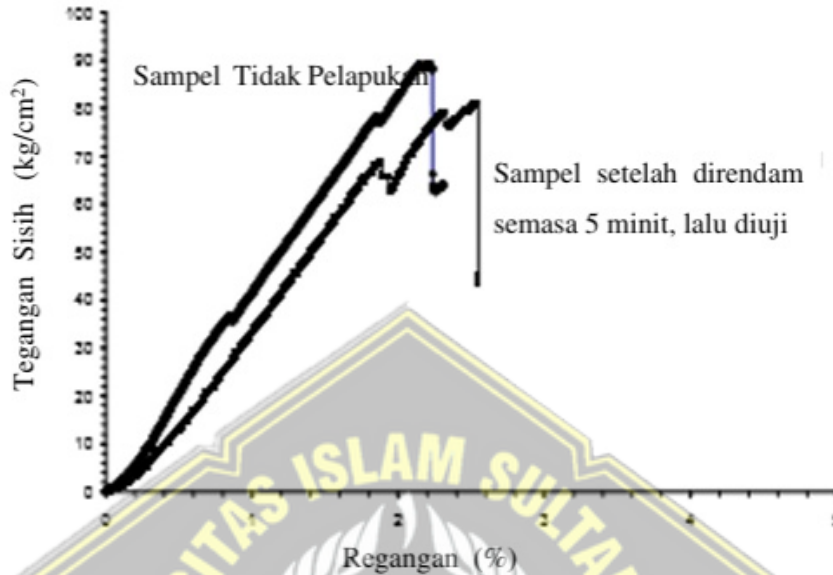
Sumber : (Youn & Tonon, 2010)

Nilai kohesi sisa pada kondisi awal sebesar 41,7 kPa mengalami penurunan menjadi 13 kPa, atau sekitar 31,2%, setelah tiga siklus berlangsung. Sementara itu, sudut geser dalam sisa yang semula sebesar 45° berkurang menjadi 33°, yaitu sekitar 73,3%, setelah melalui tiga siklus (Pineda et al., 2014). Penelitian oleh Bayin et al. (2013) menggunakan uji triaksial terkonsolidasi dan terdrainase (CD) menunjukkan bahwa pada kadar batas cair (LL) sebesar 40%, sudut geser dalam sisa (ϕ_r) menurun dari 27° menjadi 12°, bersamaan dengan penurunan LL dari 115% menjadi 44,4%. Sementara itu, melalui uji pembalikan geser langsung (RDS), sudut geser dalam sisa (ϕ_r) pada LL = 40% berkurang dari 22° menjadi 9°, dengan LL turun dari 115% menjadi 41%. Sedangkan melalui uji geser cincin (RS), pada LL sebesar 40%, sudut geser dalam sisa (ϕ_r) menurun dari 17° menjadi 8°, bersamaan dengan penurunan LL dari 115% menjadi 47% (Bayin et al., 2013).

Nilai sudut geser dalam sisa tertinggi diperoleh melalui uji triaksial terkonsolidasi dan terdrainase (CD), yaitu sebesar 27° pada batas cair (LL) sebesar 40%. Pada pengujian reversal direct shear (RDS), sudut geser dalam sisa tercatat sebesar 22° pada LL yang sama, yang berarti mengalami penurunan sebesar 81,5% dibandingkan dengan hasil dari uji CD. Sedangkan pada pengujian geser cincin (RS), sudut geser dalam sisa tercatat sebesar 17° pada LL = 40%, atau berkurang sekitar 63% dibandingkan dengan hasil dari uji CD (Bayin et al., 2013).

Studi mengenai siklus pembasahan dan pengeringan juga telah dilakukan pada tanah Pamplona Marl menggunakan uji tekan bebas (unconfined compression test). Sebelum dilakukan pengujian geser, sampel terlebih dahulu direndam selama 5

menit, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.5 (Pineda, 2007; Alonso dan Pineda, 2008). Metode perendaman ini akan diterapkan pula pada *Clay shale* Semarang–Bawen dan *Clay shale* Hambalang dalam pengujian triaksial yang melibatkan siklus basah-kering.



Gambar 2.5 Hubungan tegangan regangan dari Pamploma Marl unconfined compression test

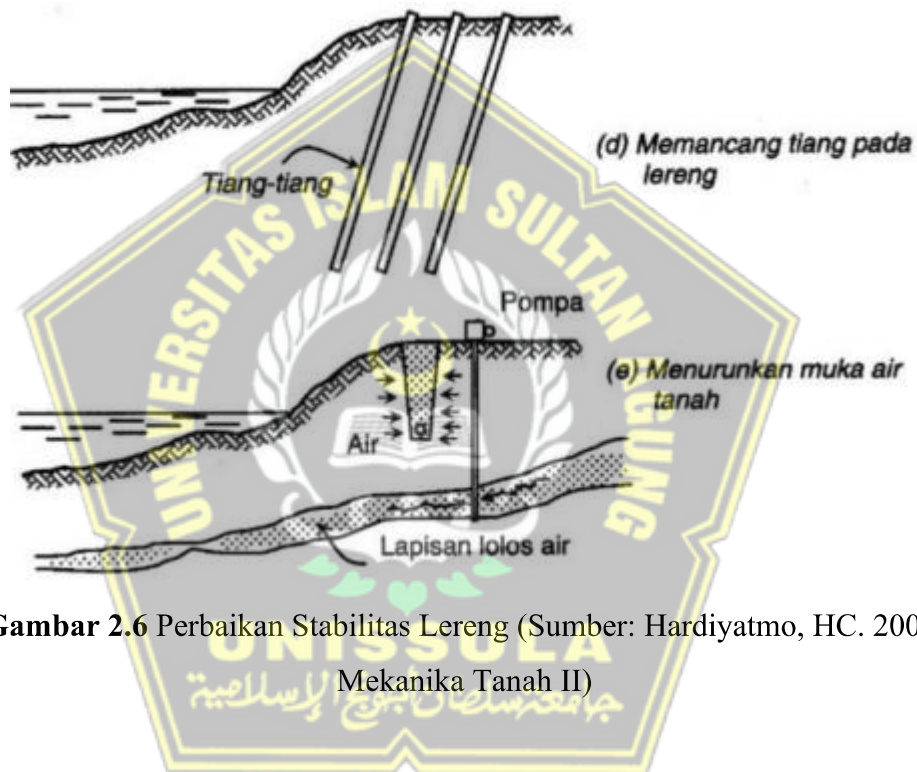
Sumber : (Pineda, 2007; Alonso dan Pineda, 2008)

2.4 Perbaikan Lereng

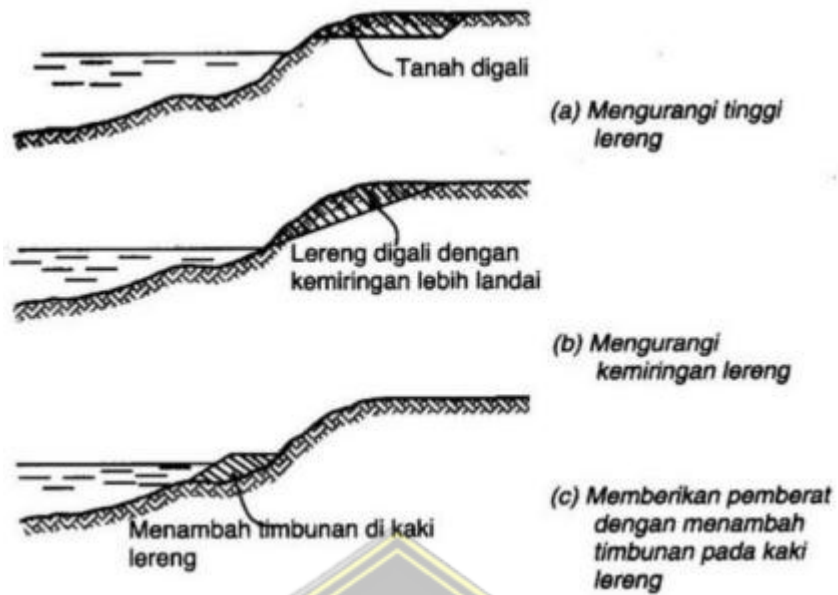
Metode penanganan lereng yang tidak stabil sangat bergantung pada sifat tanah yang ada di lokasi. Tanah dan formasi yang berisiko tinggi biasanya terdiri dari lapisan-lapisan schist yang lapuk, lempung lunak berupa serpihan, lempung kaku yang retak, lempung berpasir atau berlanau, serta massa tanah kohesif yang mengandung lapisan atau kantung pasir dan lanau yang jenuh air (Terzaghi dan Peck, 1967:340).

Banyak cara dapat dilakukan untuk menambah stabilitas lereng, antara lain: pemotongan lereng, pembuatan berm, menurunkan muka air tanah, pemasangan tiang-tiang dan lain-lainnya (Hardiyatmo, 2003:391). Menurut Hardiyatmo metode perbaikan stabilitas lereng dibagi tiga kelompok, yaitu:

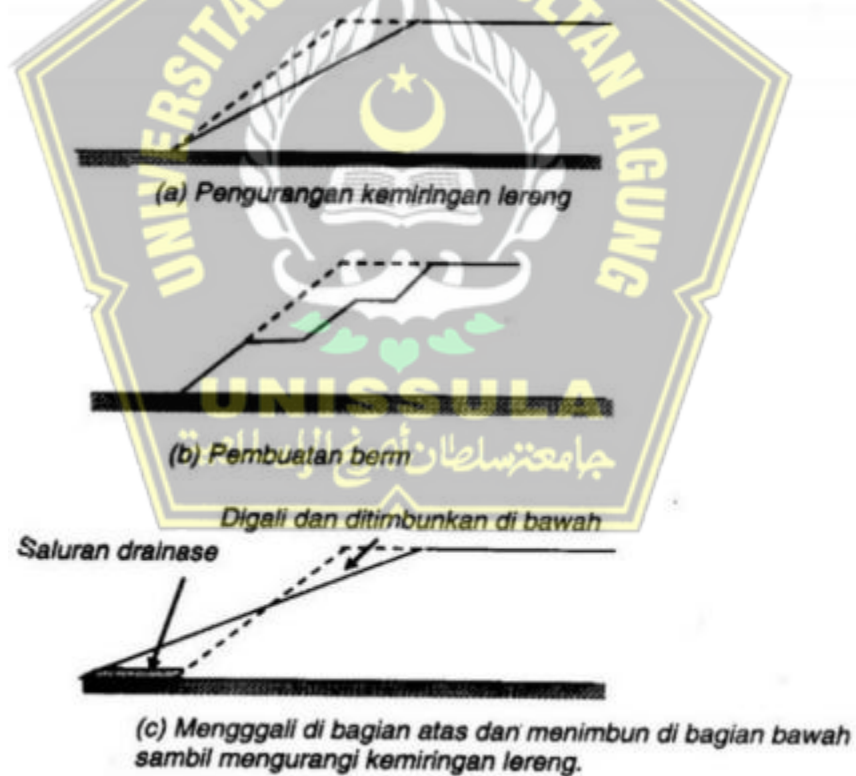
1. Metode geometri yaitu perbaikan lereng dengan cara mengubah geometri lereng. Contoh dari aplikasi metode tersebut bisa dilihat pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4.
2. Metode hidrologi yaitu dengan cara menurunkan muka air tanah atau menurunkan kadar air tanah pada lereng. Contohnya bisa dilihat pada Gambar (e).
3. Metode-metode kimia dan mekanis yaitu dengan cara grouting semen untuk menambah kuat geser tanah atau memasang bahan tertentu (tiang) di dalam tanah. Contohnya pada Gambar (d).



Gambar 2.6 Perbaikan Stabilitas Lereng (Sumber: Hardiyatmo, HC. 2003. Mekanika Tanah II)



Gambar 2.7 Perbaikan Stabilitas Lereng Metode Geometri (Sumber: Hardiyatmo, HC. 2003. Mekanika Tanah II)



Gambar 2.8 Perbaikan Stabilitas Lereng (Sumber: Hardiyatmo, HC. 2003. Mekanika Tanah II)

2.5 Analisis Stabilitas Lereng

Lereng adalah permukaan tanah yang membentuk sudut kemiringan terhadap garis horizontal (Sartiyono, 2017). Berdasarkan asal terbentuknya, lereng dibagi menjadi dua jenis. Lereng alami terbentuk dari proses-proses geologi seperti pelapukan, erosi, aktivitas tektonik, serta perubahan tekanan air pori. Sementara itu, lereng buatan merupakan hasil dari aktivitas manusia, seperti timbunan atau galian yang dilakukan pada lereng alami untuk memenuhi kebutuhan tertentu.

Bowles (1984) memberikan klasifikasi lereng berdasarkan angka keamanan dimana $FS < 1,07$ merupakan lereng labil (longsor biasa terjadi); $1,07 < FS < 1,25$ adalah lereng kritis (longsor pernah terjadi); dan $FS > 1,25$ merupakan lereng dengan kondisi stabil (longsor jarang terjadi) (Andriani et al., 2017). Adapun SNI 8460:2017 memberikan nilai rujukan SF sebagaimana disajikan dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Rekomendasi Nilai Faktor Keamanan untuk Lereng

Kondisi Lereng	SF
Kondisi Permanen	1.5
Kondisi Sementara	1.3

Sumber : (Nasional, 2017)

Dalam analisis stabilitas lereng, beberapa anggapan dibuat (Hardiyatmo, 2003):

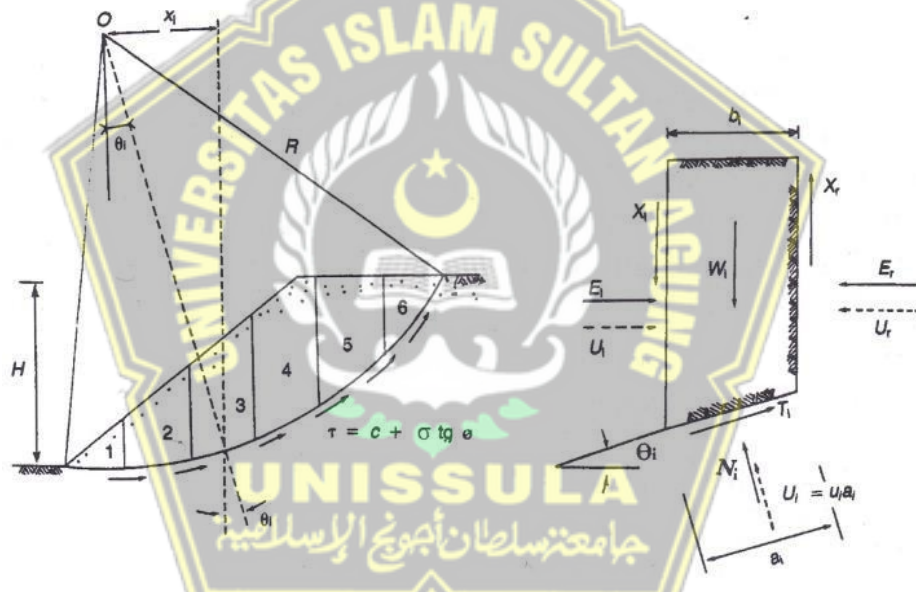
1. Kelongsoran lereng terjadi di sepanjang permukaan bidang longsor tertentu dan dapat dianggap sebagai masalah bidang 2 dimensi,
2. Massa tanah yang longsor dianggap sebagai benda masif
3. Tahanan geser dari massa tanah pada setiap titik sepanjang bidang longsor tidak tergantung dari orientasi permukaan longsor, atau dengan kata lain kuat geser tanah dianggap isotropis
4. Faktor aman didefinisikan dengan memperhatikan tegangan geser rata-rata sepanjang bidang longsor potensial, dan kuat geser tanah rata-rata sepanjang permukaan longsor. Jadi, kuat geser tanah mungkin terlampaui di titik-titik tertentu pada bidang longsornya,

Pengamatan longsor lereng oleh (Collin, 1846) menunjukkan bahwa longsor tanah terjadi dalam bentuk bidang longsor yang berupa lengkungan (Hardiyatmo, 2002). Penyebab longsor pada bidang lengkung ini adalah tidak tersedianya kuat geser tanah yang cukup untuk menahan gerakan tanah longsor pada bidang

gelincirnya. Perhitungan nilai keamanan (F) lereng adalah nilai banding antara gaya yang menahan yang terdiri dari parameter kuat geser tanah (ϕ & C) dan gaya yang menggerakkan lereng.

$$F = \frac{\text{Gaya Penahan}}{\text{Gaya Pengerak}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Penulis memilih metode kesetimbangan batas (*limit element method*) untuk melakukan analisis stabilitas lereng. Dalam *limit element method* (FEM) ditekankan prinsip keseimbangan. Untuk kasus longsoran dengan bidang gelincir berbentuk lingkaran (*circular slide*), prinsip yang digunakan adalah $\Sigma M = 0$. Dua pendekatan metode kesetimbangan batas yang bisa digunakan untuk menghitung faktor keamanan lereng adalah Metode Fellenius dan Metode Bishop.



Gambar 2.9 Gaya yang bekerja pada irisan

Sumber : (Das, Braja M. 1998)

Dimana:

X_l, X_r : gaya geser efektif di sepanjang irisan

E_l, E_r : gaya normal efektif di sepanjang sisi irisan

T_i : resultan gaya geser efektif yang bekerja sepanjang irisan

N_i : resultan gaya normal efektif yang bekerja sepanjang dasar irisan

U_l, U_r : tekanan air pori yang bekerja di kedua sisi irisan

U_i : tekanan air pori di dasar irisan

2.6 Soil Nailing

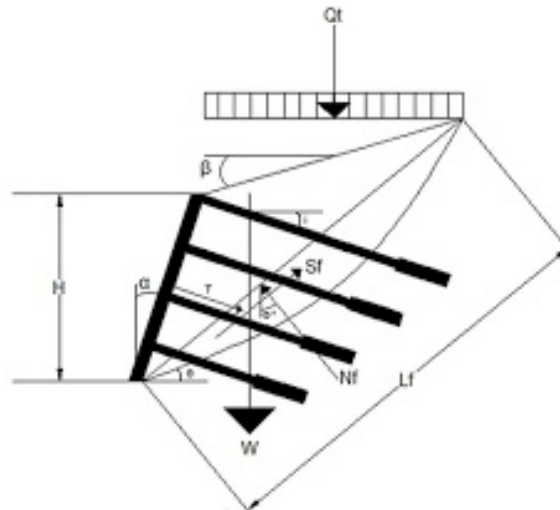
Pada tahun 1961 di Prancis, metode perkuatan *soil nailing* pertama kali diterapkan sebagai sistem perkuatan dinding penahan tanah. *Soil nailing* merupakan metode perkuatan lereng yang bersifat pasif, yaitu tidak menggunakan gaya prategang. Sistem ini pada umumnya terdiri dari sejumlah batang paku tanah (*nail bar*) yang dipasang ke dalam massa tanah melalui proses pengeboran atau pemancangan, serta dilengkapi dengan dinding muka berupa beton semprot bertulang (*reinforced shotcrete*) yang berfungsi sebagai elemen utama penahan lereng (SNI Geoteknik, 2017).

Salah satu penerapan dinding penahan tanah dengan metode *soil nailing* dapat dijumpai pada proyek pelebaran jalur kereta api di dekat Versailles, Prancis, pada tahun 1972. Pada proyek tersebut, *soil nailing* digunakan untuk menahan lereng dengan ketinggian sekitar 18 meter dan sudut kemiringan mencapai 70° . Metode ini kemudian semakin banyak digunakan karena dinilai lebih efisien dari segi biaya serta memiliki waktu pelaksanaan konstruksi yang relatif lebih singkat dibandingkan dengan metode perkuatan konvensional lainnya.

Secara umum, pelaksanaan metode *soil nailing* memerlukan beberapa elemen dasar sebagai komponen utama sistem perkuatan lereng, antara lain sebagai berikut:

1. Nail Bar

Nail bar atau baja ulir merupakan elemen berupa batang baja yang berfungsi sebagai tulangan utama dalam sistem *soil nailing*. Batang baja ini dipasang ke dalam massa tanah dengan sudut kemiringan tertentu yang umumnya mendekati arah horizontal, yaitu sekitar 10° hingga 20° terhadap horizontal, dengan sudut pemasangan yang paling sering digunakan sebesar 15° . Pemasangan *nail bar* dengan kemiringan tersebut bertujuan untuk meningkatkan kemampuan penahan terhadap gaya tarik dan geser yang bekerja pada lereng. Gambar 2.7 menunjukkan contoh penerapan sistem perkuatan *soil nailing* beserta keterangan masing-masing komponennya.



Gambar 2.10 Contoh Soil Nailing (SNI Geoteknik, 2017)

2. Nail Head

Nail head merupakan bagian ujung dari *nail bar* yang menonjol pada permukaan dinding muka lereng. Komponen ini berfungsi untuk menyalurkan gaya dari *nail bar* ke elemen dinding muka dan umumnya terdiri atas *bearing plate* (pelat penahan), *hex nut* (mur segi enam), serta *washer* yang dapat terbuat dari bahan karet maupun logam. *Bearing plate* biasanya berbentuk pelat baja persegi dengan ukuran tipikal antara 200 mm × 200 mm hingga 250 mm × 250 mm, serta memiliki ketebalan sekitar 19 mm. Dimensi dan konfigurasi komponen *nail head* ini disesuaikan dengan kebutuhan desain dan mengacu pada ketentuan yang tercantum dalam SNI Geoteknik (2017).

3. Grout (Cor Beton)

Material grout pada pekerjaan *soil nailing* berfungsi untuk mengikat *nail bar* dengan massa tanah di sekitarnya serta melindungi baja dari pengaruh lingkungan. Grout umumnya dibuat dari semen tipe I dengan rasio air terhadap semen (*water-cement ratio*) berkisar antara 0,4 hingga 0,5. Kuat tekan grout yang dipersyaratkan pada umur 28 hari adalah sebesar 21 MPa. Pada umumnya, bahan tambah tidak digunakan dalam campuran grout, kecuali *plasticizer* yang ditambahkan untuk meningkatkan *workability* apabila diperlukan, sesuai dengan ketentuan SNI Geoteknik (2017).

2.7 Dinding Penahan Tanah

Dinding atau dinding penahan tanah merupakan struktur yang dibangun untuk mencegah keruntuhan pada lereng yang curam atau pada area di mana stabilitas tanah tidak dapat dijaga hanya oleh kemiringan alami. Kondisi topografi setempat sangat memengaruhi perancangan dinding ini. Pada konstruksi jalan yang berbatasan dengan sungai, danau, atau tanah rawa, dinding penahan dibangun untuk menjaga kestabilan lereng sekaligus menyediakan fondasi yang kuat guna mendukung kemiringan tanah tersebut.

2.6.1 Definisi Dinding Penahan Tanah

Dinding penahan tanah adalah struktur yang dirancang untuk menahan massa tanah dan mencegah terjadinya keruntuhan pada lereng yang stabilitasnya tidak cukup hanya dengan kemiringan alami. Massa tanah yang ditahan akan menimbulkan tekanan lateral terhadap dinding, sehingga struktur ini berisiko mengalami kegagalan berupa terguling (*overturning*) atau bergeser (*sliding*). Material yang umum digunakan untuk membangun dinding penahan tanah meliputi pasangan batu, kayu, beton, maupun baja. Fungsi utamanya adalah menopang tanah, timbunan, atau lereng, serta kondisi serupa lainnya. Struktur ini direncanakan untuk mampu menahan tekanan lateral dari tanah sekaligus pengaruh beban eksternal, termasuk beban akibat gempa, sehingga potensi longsor dapat dikurangi. Dinding penahan tanah banyak diterapkan pada proyek jalan raya, sistem irigasi, pelabuhan, basement, abutment jembatan, serta pekerjaan pengendalian erosi.

Kestabilan dinding penahan tanah harus diperhitungkan terhadap pengaruh beban mati dan beban hidup. Beban mati merupakan beban yang nilainya tetap dan bekerja secara permanen pada struktur, yang meliputi berat sendiri dinding serta beban lain yang melekat secara tetap. Sementara itu, beban hidup adalah beban yang sifatnya tidak tetap dan dapat berubah selama umur struktur. Beban hidup tersebut antara lain meliputi beban angin, tekanan tanah, tekanan air, beban lumpur, serta beban yang timbul selama proses pelaksanaan konstruksi.

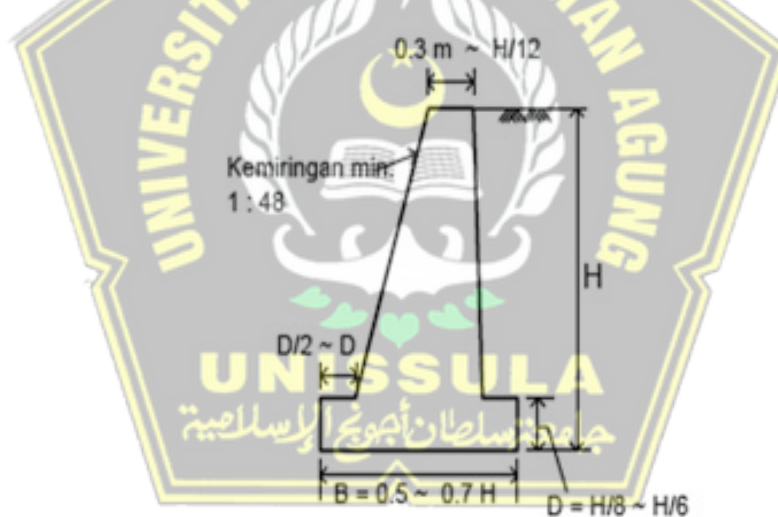
2.6.2 Jenis Dinding Penahan Tanah

Berdasarkan SNI 8460 (2017), dinding penahan tanah dapat dibedakan menjadi beberapa tipe yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Dinding penahan tanah tipe gravitasi dan semi-gravitasi (*gravity wall*)

Dinding penahan tanah tipe gravitasi adalah struktur yang stabilitasnya terutama diperoleh dari berat sendiri. Umumnya, dinding ini dibuat dari beton tanpa tulangan atau pasangan batu kali, sehingga kemampuan menahan tekanan tanah sangat bergantung pada massa dan dimensinya. Karena itu, penggunaan tipe ini menjadi kurang ekonomis untuk menahan tanah dengan tinggi yang besar.

Dinding penahan tipe semi-gravitasi merupakan pengembangan dari dinding gravitasi, dengan ukuran lebih ramping dan penggunaan tulangan minimal, untuk meningkatkan efisiensi struktur tanpa mengurangi peran utama berat sendiri dalam menjaga kestabilan, sesuai SNI 8460:2017. Bentuk dinding gravitasi dapat dilihat pada Gambar 2.5.



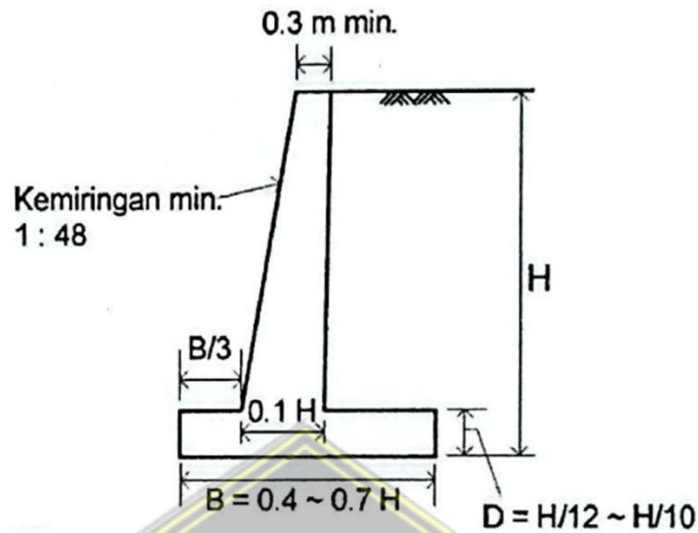
Gambar 2.11 Dinding penahan tanah tipe kantilever

(Sumber: SNI 8460, 2017)

2. Dinding penahan tanah tipe kantilever (*cantilever retaining wall*)

Dinding penahan tanah tipe kantilever adalah struktur berbentuk huruf T yang dibuat dari beton bertulang. Penggunaan beton bertulang memungkinkan batang dinding (*stem*) dan pelat dasar (*base slab*) dirancang lebih tipis dibandingkan dinding gravitasi. Stabilitas dinding ini tidak hanya bergantung pada berat sendiri, tetapi juga memanfaatkan berat tanah di atas pelat dasar sebagai penahan

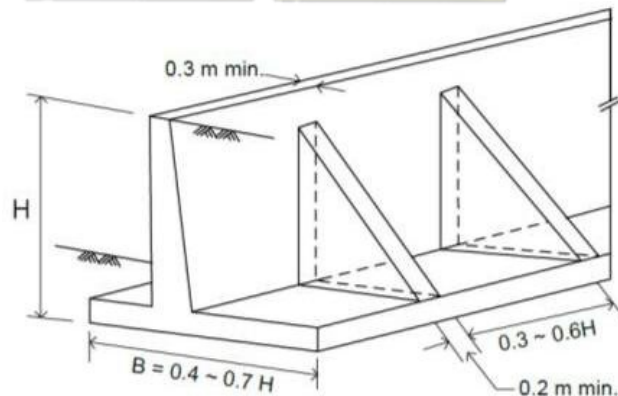
tambahan (SNI 8460:2017). Bentuk dan konfigurasi tipe kantilever ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.12 Dinding penahan tanah tipe kantilever
(Sumber: SNI 8460, 2017)

3. Dinding penahan tanah tipe kantilever dengan pengaku (counterfort retaining wall)

Dinding penahan tanah tipe counterfort digunakan untuk menahan timbunan tanah tinggi tanpa perlu memperbesar ketebalan batang dinding (stem). Pada tipe ini, batang dinding diperkuat dengan rusuk atau rib beton yang dipasang pada jarak tertentu untuk meningkatkan kekakuan dan kapasitas struktur. Jika pengaku berada di belakang dinding dan tertutup tanah, disebut counterfort, sedangkan jika berada di depan dinding disebut buttress (SNI 8460:2017). Konfigurasi tipe counterfort ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.13 Dinding penahan tanah tipe counterfort
(Sumber: SNI 8460, 2017)

2.6.3 Faktor Kerusakan Dinding Penahan Tanah

Kerusakan pada dinding penahan tanah tidak selalu ditandai dengan kegagalan atau keruntuhan total, melainkan dapat berupa berbagai indikasi awal yang menunjukkan potensi terjadinya ketidakstabilan struktur. Tanda-tanda tersebut dapat digunakan untuk memprediksi kemungkinan kerusakan sehingga tindakan penanganan dapat dilakukan secara tepat dan dini. Jenis kerusakan dinding penahan tanah yang tidak dapat diperbaiki umumnya meliputi kondisi dinding yang telah mengalami pergeseran besar, runtuh atau roboh, serta terbalik. Pada kondisi tersebut, solusi yang dapat diterapkan adalah melakukan pembangunan ulang dinding penahan tanah.

Meskipun demikian, sebelum mengalami kerusakan total, dinding penahan tanah biasanya menunjukkan gejala atau indikasi tertentu yang masih dapat diamati, sehingga upaya perbaikan dapat segera dilakukan. Pada umumnya, dinding penahan tanah masih dapat diperbaiki setelah dilakukan evaluasi menyeluruh dan penyebab kerusakan dapat diidentifikasi secara jelas. Menurut Eva Khuzaifah (2019), kerusakan dinding penahan tanah dapat terjadi akibat beberapa faktor, yang akan dijelaskan sebagai berikut:

1. Kesalahan desain

Kerusakan pada dinding penahan tanah akibat kesalahan desain jarang terjadi jika perencana berpengalaman terlibat. Namun, risiko tetap muncul bila data atau informasi yang digunakan tidak akurat atau tidak sesuai kondisi lapangan, yang dapat menyebabkan kegagalan struktur.

2. Kesalahan perhitungan

Kesalahan perhitungan umumnya dapat dideteksi oleh perencana berpengalaman. Oleh karena itu, melakukan verifikasi ulang terhadap perhitungan desain sangat penting untuk mengurangi kemungkinan kesalahan.

3. Kesalahan perhitungan menggunakan perangkat lunak

Perencana harus memastikan bahwa input data ke perangkat lunak analisis akurat dan memahami cara kerja perangkat lunak tersebut. Hasil analisis juga sebaiknya diverifikasi melalui perhitungan manual atau pemeriksaan ulang.

4. Kesalahan pada detail rencana

Detail rencana harus konsisten dengan perhitungan desain dan disajikan dengan jelas untuk menghindari salah interpretasi yang dapat memengaruhi kualitas dan keamanan struktur.

5. Penempatan perkuatan atau tulangan yang tidak tepat

Jika dinding menunjukkan retak atau deformasi berlebihan, lokasi, ukuran, jarak, dan kedalaman tulangan perlu diperiksa. Alat deteksi medan magnet dapat digunakan untuk menentukan posisi dan kedalaman tulangan, lalu perhitungan desain ditinjau ulang untuk menilai kapasitas struktur eksisting dan menentukan perbaikan.

6. Material urugan yang jenuh air

Material di belakang dinding sebaiknya berupa material granular dengan drainase baik. Material yang menyerap air, seperti tanah lempung, meningkatkan tekanan lateral pada dinding. Batu pecah ideal sebagai urugan karena memiliki drainase baik.

7. Lubang drainase yang tidak berfungsi

Drainase yang tersumbat menyebabkan akumulasi air di belakang dinding. Pada dinding batu, lubang drainase dibuat sekitar ± 80 cm, sedangkan pada dinding beton bertulang diameter minimum 7,5 cm dan jarak maksimum 1 m. Kurangnya filter dapat menyebabkan saluran tersumbat oleh material halus atau vegetasi.

8. Beban atau muatan yang tidak terduga

Beban tambahan yang tidak diperhitungkan bisa terjadi akibat kurangnya koordinasi antara pemilik proyek dan perencana. Beban ini dapat berasal dari perubahan kemiringan lereng, beban angin, atau faktor lain yang menurunkan tingkat keamanan dinding.

9. Permasalahan pada fondasi

Perencanaan fondasi harus didasarkan pada data investigasi tanah yang cukup. Kekurangan data lapangan dapat menyebabkan kesalahan penentuan daya dukung tanah, muka air tanah, dan karakteristik tanah dasar, sehingga berpotensi menimbulkan penurunan berlebih atau kegagalan geser fondasi.

10. Spesifikasi teknis yang tidak memadai

Jika kondisi lapangan berbeda dari gambar atau spesifikasi teknis, perlu penyesuaian melalui koordinasi antara perencana dan pelaksana. Spesifikasi

harus mengacu pada data terbaru, dan perubahan harus segera diinformasikan untuk mencegah masalah struktural.

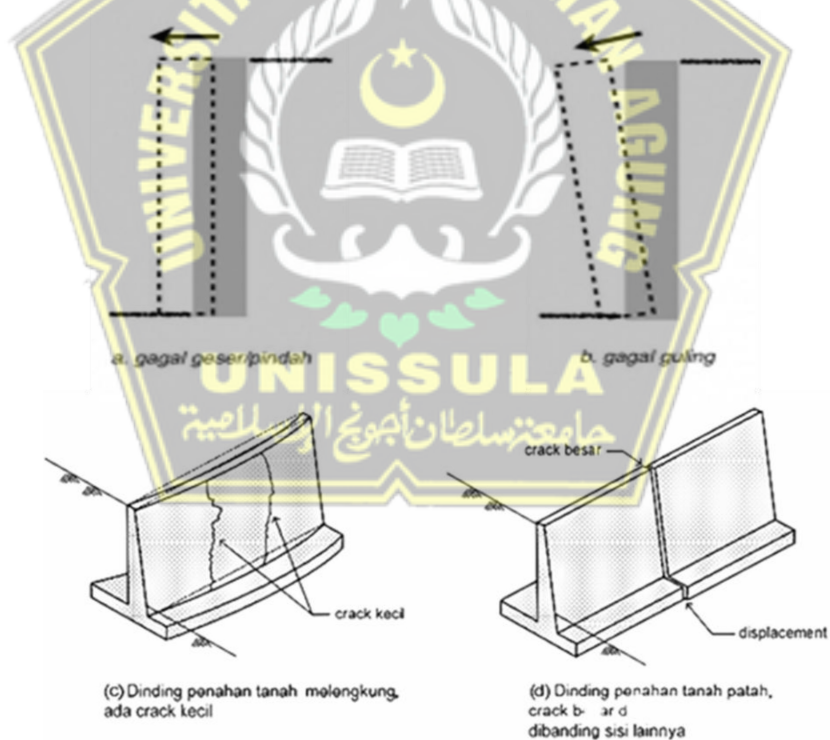
11. Kualitas konstruksi yang buruk

Konstruksi yang tidak memenuhi standar bisa disebabkan oleh kurangnya pengalaman kontraktor atau pelaksanaan yang tidak sesuai desain. Contohnya mutu beton rendah, grouting tidak sempurna, atau penempatan tulangan salah. Pengawasan ketat dan pemahaman spesifikasi sangat penting.

12. Umur layanan dinding penahan tanah

Dinding biasanya dirancang untuk umur layanan sekitar 50 tahun atau lebih. Namun, kondisi lingkungan seperti gempa, penambahan beban, atau perubahan drainase dapat mempercepat penurunan kinerja struktur, sehingga evaluasi dan tindakan perbaikan perlu dilakukan.

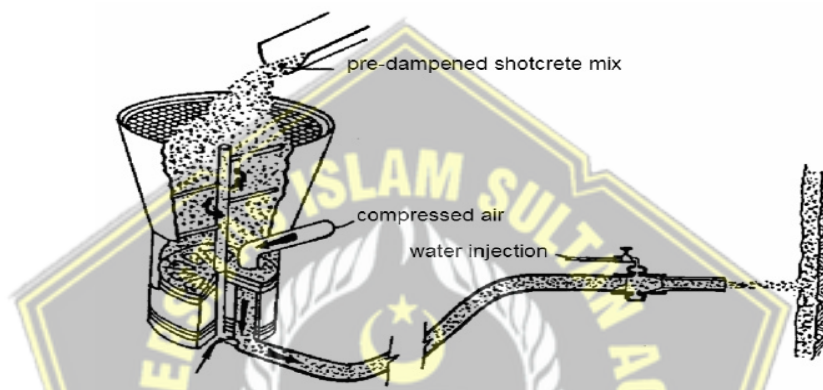
Contoh kegagalan konstruksi pada dinding penahan tanah dapat ditunjukkan pada Gambar dibawah.



Gambar 2.14 Beberapa contoh kegagalan dinding penahan tanah

2.8 Shotcrete

Metode *shotcrete* merupakan teknik aplikasi beton semprot yang pertama kali dikembangkan oleh Carl Ethan Akeley pada tahun 1910. *Shotcrete*, atau beton semprot, adalah campuran beton atau mortar yang disalurkan melalui alat khusus (sering disebut *gun*) dan disemprotkan dengan kecepatan tinggi ke permukaan, seperti dinding atau langit-langit, terutama pada konstruksi seperti terowongan. Campuran yang digunakan biasanya bersifat kering atau setengah kering agar mampu menempel dan menopang beban sendiri, bahkan saat diaplikasikan pada permukaan vertikal (Birön dan Arioğlu, 1983).



Gambar 2.15 Metode *Dry Shotcrete*

Sumber : (Metode *Dry Shotcrete*)

Metode *shotcrete* memberikan beberapa keuntungan antara lain :

1. Rongga – rongga pada permukaan akan terisi bahkan pada permukaan yang tidak beraturan.
2. Pengikatan yang baik antara bahan yang dipakai dan permukaan yang dikerjakan.
3. Menekan biaya pemasangan bekisting dan pembesian.
4. Menjangkau bidang kerja yang sulit untuk dijangkau (fleksibel).



Gambar 2.16 Metode *Wet Shotcrete*

Sumber : (Dokumen pribadi)

Pelaksanaan *shotcrete* terbagi menjadi dua metode utama, yaitu *wet mix* dan *dry mix*, yang masing-masing memiliki persyaratan tersendiri terkait proses pelaksanaan, jenis bahan, serta peralatan yang digunakan. Metode *dry mix* sering dikenal juga dengan istilah *gunite*. Meskipun efektif dalam banyak aplikasi, *shotcrete* memiliki beberapa kelemahan, di antaranya adalah kebutuhan akan peralatan yang relatif mahal, adanya *rebound* (pantulan material saat penyemprotan), pemborosan bahan karena banyaknya material yang terbuang, serta ketergantungan pada operator yang berpengalaman dan terlatih untuk memastikan hasil yang optimal. Mutu beton *shotcrete* yang digunakan dirancang untuk mencapai kuat tekan karakteristik $f_c = 28$ MPa. Sebelum pelaksanaan penyemprotan di lapangan, dilakukan uji coba campuran (*trial mix*) di laboratorium untuk memastikan proporsi material yang digunakan mampu memenuhi target kuat tekan tersebut. Uji kuat tekan dilakukan merujuk SNI 7833:2012 pada benda uji silinder hasil semprotan guna mengevaluasi kinerja campuran terhadap standar mutu. Adapun komposisi bahan penyusun campuran *shotcrete* adalah sebagai berikut:

Tabel 2.4 Kombinasi Campuran Bahan *Shotcrete*

No	ITEM	REFERENSI	Per 1m ³	Per 1 Mixing
1	Semen	Semen PCC	500 kg/m ³	50 kg/m ³
2	Agregat Halus	Ex. Palu	1022 kg/m ³	102.2 kg/m ³
3	Agregat Kasar (0.5)	Ex. Palu	898 kg/m ³	89.8 kg/m ³

Sumber : (Dokumen pribadi)

2.5.1 Fungsi Shotcrete

Shotcrete merupakan salah satu teknologi beton yang diaplikasikan dengan cara penyemprotan menggunakan tekanan udara tinggi ke permukaan yang telah disiapkan. Metode ini memungkinkan beton menempel kuat pada bidang vertikal maupun horizontal tanpa memerlukan bekisting. Dalam dunia konstruksi modern, shotcrete banyak digunakan karena efisiensinya dalam proses pelapisan dan kemampuannya memberikan kekuatan tambahan pada struktur. Setelah memahami pengertian dan karakteristik dasarnya, penting untuk mengetahui fungsi utama shotcrete :

1. Sebagai Lapisan Penahan (Support)
 - Fungsi shotcrete dalam menahan longsoran atau runtuh pada dinding galian.
 - Penggunaan pada tambang bawah tanah dan terowongan.
 - Kombinasi shotcrete dengan *rock bolt*, *wire mesh*, dan sistem perkuatan lain.
2. Sebagai Pelindung Permukaan
 - Melindungi struktur beton dari pengaruh cuaca, air, dan korosi.
 - Penggunaan shotcrete pada lereng, tebing, dan struktur pantai.
3. Sebagai Struktur Permanen
 - Shotcrete sebagai bagian dari struktur akhir (lining terowongan, dinding basement).
 - Keunggulan dibanding beton konvensional.
4. Sebagai Media Perbaikan dan Rehabilitasi
 - Penggunaan shotcrete untuk perbaikan struktur beton rusak atau retak.
 - Keunggulan shotcrete dalam aplikasi permukaan yang sulit dijangkau.

2.9 Software Numerik

PLAXIS adalah suatu program komputer dengan dasar metode elemen hingga yang sangat sesuai untuk menganalisis berbagai permasalahan yang dijumpai pada tanah dan batuan. Dalam menganalisis persoalan yang ada, program *PLAXIS* menggunakan model analisis tegangan pada bidang dan analisis persamaan salib sumbu (Brinkgreve dan Vermer, 1998).

Menurut Bringgreve dan Vermer (1998), model analisis tegangan pada bidang digunakan untuk struktur dengan penampang permukaan yang mengalami regangan atau tekanan, serta pembebanan yang diterapkan pada jarak tertentu dalam arah tegak lurus, dengan asumsi bahwa perpindahan yang terjadi adalah nol. Dalam program *PLAXIS*, model material digambarkan melalui persamaan matematika yang menggambarkan hubungan antara tegangan dan regangan. Model ini biasanya diekspresikan sebagai perubahan tegangan (dikenal sebagai kecepatan tegangan) dan perubahan regangan (dikenal sebagai kecepatan regangan). Semua model material dalam *PLAXIS* didasarkan pada hubungan antara kecepatan tegangan efektif.

Program *PLAXIS* adalah perangkat lunak yang digunakan untuk analisis deformasi dan stabilitas dalam permasalahan geoteknik. *PLAXIS* mengadopsi antarmuka grafis yang *user-friendly*, sehingga memungkinkan pengguna untuk dengan cepat membuat pemodelan geometri dan jaringan elemen berdasarkan penampang melintang dari kondisi yang akan dianalisis. Adapun tahapan dalam pemodelan pada *Software PLAXIS* sebagai berikut:

1. Melakukan pemodelan pada AutoCad, hal tersebut guna memudahkan dalam pemodelan di *PLAXIS*.
2. *Import* gambar AutoCad pada *PLAXIS* dengan format file DXF, lalu membuat material tanah yang akan dimodelkan.
3. *Mesh* model hingga ke ukuran yang paling kecil untuk meningkatkan kualitas hasil perhitungan.
4. Tentukan muka air tanah sesuai dengan hasil pengecekan Borelog.
5. Buat *stage analysis* untuk menggambarkan situasi pekerjaan dilapangan lalu running pemodelan.
6. Setelah running selesai cek nilai SF dan bidang gelincir yang terjadi.

2.10 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu memiliki berbagai macam metode dalam menentukan mitigasi stabilitas lereng yang terdapat tanah *Clay shale*, bidang gelincir dan *safety factor* lereng. Berikut rangkuman hasil penelitian terdahulu:

Tabel 2.5 Perbandingan Penelitian yang akan dilakukan dalam tesis ini dengan penelitian penelitian sebelumnya

No	Author	Judul	Kesimpulan
1	(Sumampouw et al., 2024)	Stabilisasi Lereng Galian Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> Pada Pengalihan Sungai Araren Di Kabupaten Minahasa Utara	Hasil analisis kestabilan lereng dengan perkuatan <i>shotcrete</i> yang dilengkapi drainase horisontal menyimpulkan bahwa penggunaan <i>shotcrete</i> dengan mutu beton K-250 setebal 10 cm yang dilengkapi dengan pipa drainase horisontal sepanjang 10 m dengan sudut kemiringan 4° dari bidang horisontal dapat meningkatkan faktor keamanan lereng pada kondisi statis yakni 1.33 dan pada beban gempa sebesar 1.15.
2	(Putro & Agustina, 2023)	Analisis kestabilan lereng dengan perkuatan <i>shotcrete</i> menggunakan <i>PLAXIS</i> (Studi kasus: Ruas Jalan Tarempa–Rintis STA 07+800, Kab. Anambas)	Hasi dari analisis kestabilan lereng ruas jalan Tarempa – Rintis STA 07+800 pada kondisi awal didapatkan faktor keamanan sebesar 1,183 pada kondisi tanah jenuh, sehingga diperlukan penanganan pada lereng agar tidak terjadi kelongsoran yang menyebabkan terganggunya arus lalu lintas. Perkuatan <i>shotcrete</i> menjadi metode yang dipilih sebagai proteksi kestabilan lereng yang mendapatkan nilai faktor keamanan sebesar 1,730 dalam kondisi jenuh setelah dilakukan analisis dengan program <i>PLAXIS</i> .
3	(Putra et al., 2018)	Penanganan daerah rawan longsor dengan metode menggunakan <i>shotcrete</i>	Dari hasil analisis, ditemukan bahwa metode <i>shotcrete</i> dianggap mampu menangani daerah rawan longsor di KM 107 + 100 - KM 107 + 300. Namun untuk penanganan yang telah dilakukan dengan menggunakan plester baja dari rel bekas. Namun, penanganan ini dianggap tidak optimal karena terbatasnya jumlah rel di sekitar daerah rawan, mengakibatkan dinding plester masih bisa membuat material keluar ke jalan rel.

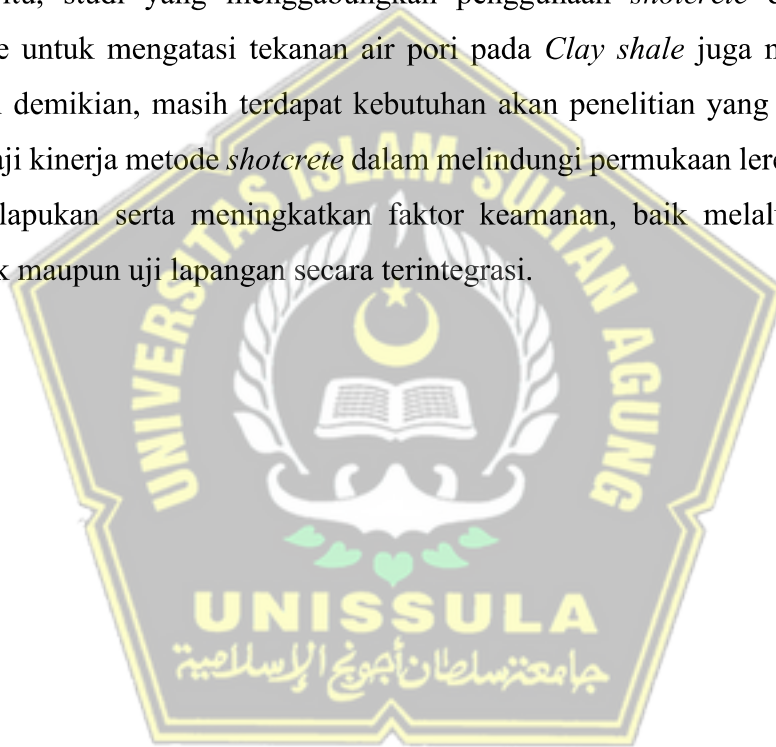
No	Author	Judul	Kesimpulan
4	(RS Hamidah et al., 2025)	Analisis Metode Elemen Hingga Pengaruh Pelapukan <i>Clay shale</i> pada Stabilitas Pekerjaan Galian Jalan	Setiap tahapan analisis stabilitas lereng dilihat nilai faktor keamanan pada fase akhir konstruksi dan kondisi gempa, yang selanjutnya menghasilkan rekomendasi penanganan berupa mengurangi kemiringan lereng menjadi 1:3 agar mengurangi kecenderungan untuk longsor serta membuang lapisan tanah yang kekuatannya sudah berkurang karena pelapukan <i>clay shale</i> , memberi perlindungan terhadap permukaan lereng menggunakan shotcrete, dan memberikan kekuatan berupa dinding secant pile pada lereng sisi kanan agar kuat menahan beban gempa pada kondisi puncak.
5	(Situmorang et al., 2022)	Analisis Stabilitas Lereng Galian Tanah <i>Clay shale</i> Proyek Pembangunan Bendungan Pamakkulu	Dari hasil uji Petrografi dan XRD diperoleh bahwa terdapat lapisan tanah yang mengandung mineral penyusun <i>Clay shale</i> yaitu <i>kaolite</i> dan <i>montmorillonite</i> . Analisis pada kondisi eksisting dilakukan dengan cara analisis balik, sehingga hasil kejadian pada komputasi sesuai dengan kejadian di lapangan. Dari hasil analisis, lereng plinth terindikasi <i>Clay shale</i> di lokasi Bendungan Pamakkulu stabil pada rasio kemiringan IV: 3H dengan faktor keamanan 1,717 serta presentase kenaikan faktor keamanan sebesar 72.7%.
6	(H. Prihatiningsih et al., 2021)	Analisis kuat geser tanah <i>clay shale</i> yang terendam dan tidak terendam menggunakan uji unconfined compression	Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan maksimum pada sampel tidak terendam terjadi pada durasi pendiaman 5 minggu sebesar 1133,23 kN/m ² , kemudian mengalami penurunan pada durasi 7 minggu. Sementara itu, pada sampel terendam, kuat tekan tertinggi diperoleh pada durasi pendiaman 1 minggu sebesar 11,64 kN/m ² dan mulai menurun pada durasi 3 minggu. Nilai kohesi menunjukkan kecenderungan sejalan dengan kuat tekan, di mana kohesi maksimum terjadi pada kondisi pendiaman 5 minggu untuk sampel tidak terendam dan pendiaman 1 minggu untuk sampel terendam.

No	Author	Judul	Kesimpulan
7	(Azhari, 2024)	<p>Analisis Desain Eksisting Perkuatan Lereng Pada Tanah Clay shale Dan Alternatif Modifikasinya Studi Kasus: Ruas Jalan Awunio – Lapuko Sta 4+955 – 5+015 Provinsi Sulawesi Tenggara</p>	<p>Analisis stabilitas lereng eksisting ternyata aman dari kejadian longsor namun hal ini bertolak belakang dengan kejadian di lapangan, oleh sebab itu dalam studi ini digunakan pendekatan <i>crack soil</i> untuk mendapatkan gambaran kondisi longsor di lapangan; lereng jalan diperoleh SF sebesar 0,95. Desain eksisting berupa DPT setinggi 2,5 m dengan <i>bored pile</i> berdiameter 50 cm sedalam 8 m menghasilkan stabilitas lereng dengan SF sebesar 7,91 yang berarti aman tetapi terlalu boros. Perencanaan sistem manajemen air mendapatkan kapasitas saluran drainase masih mampu menampung debit air yang terjadi akibat hujan. Pembuatan <i>subdrain</i> terbukti meningkatkan SF pada lereng dari SF 0,95 menjadi 1,38, hanya saja masih diperlukan perkuatan tambahan. Perencanaan alternatif DPT setinggi 2,5 m dengan <i>bored pile</i> berdiameter 40 cm dengan kedalaman 3 m menghasilkan stabilitas lereng sebesar 3,29. Apabila struktur DPT diganti dengan batu kali dengan <i>bored pile</i> diameter 30 cm dengan kedalaman 3 m menghasilkan SF sebesar 2,18. Apabila dikerjakan alternatif subdrain dengan perkuatan tambahan bronjong menghasilkan stabilitas lereng menjadi 2,23 serta desain alternatif menggunakan geotekstil menghasilkan stabilitas lereng dengan SF sebesar 1,77 sehingga semua perkuatan alternatif aman dan memenuhi persyaratan stabilitas.</p>
8	(Bokko, 2019)	<p>Analisis kelongsoran Jalan Poros Sanggalla–Batuvalu dengan program <i>PLAXIS</i></p>	<p>Model deformasi yang di dapatkan dari hasil <i>PLAXIS</i>, mempunyai kecenderungan yang sama dengan kondisi deformasi yang terjadi di lapangan sedangkan letak bidang longsor dengan <i>PLAXIS</i>, menunjukkan bidang longsor yang menyerupai kondisi di lapangan. kedalaman tiang pancang 7 m dan jarak tiang pancang 50 cm .</p>

No	Author	Judul	Kesimpulan
9	(Afifa, 2019.)	Analisis kestabilan lereng <i>highwall</i> dan <i>lowwall</i> menggunakan <i>limit equilibrium method</i> pada pit penambangan batubara PT. B, Kalimantan Timur	Pada hasil penelitian ini, didapatkan nilai faktor keamanan rekomendasi yaitu pada lereng <i>highwall</i> panel <i>BB</i> yang sebelumnya bernilai FK sebesar 1,13 setelah dioptimasi menjadi 1,27 (metode <i>circular</i>). Pada lereng <i>lowwall</i> panel <i>AA</i> yang sebelumnya bernilai FK sebesar 0,84 setelah dioptimasi menjadi sebesar 1,26 (metode <i>circular</i>) dan 1,52 (metode <i>non-circular</i>), sehingga pada penelitian ini sudah didapatkan kategori bahwa nilai faktor keamanan tersebut sudah aman menurut Bowless. Faktor kekuatan batuan, kadar air pada batuan, sudut lereng tunggal, dan tinggi lereng sangat mempengaruhi besarnya nilai faktor keamanan.
10	(SANJAYA, 2021)	Analisis kestabilan lereng pada tambang batubara terbuka (<i>open coal pit mining</i>) lapangan "X" blok barat IUP PT. Alamjaya Bara Pratama Tbk	Dalam penelitian ini dilakukan permodelan lereng tunggal dengan jumlah model sebanyak 15 model pada masing-masing lithologi. Sedangkan, untuk lereng keseluruhan digunakan 5 model. Dari kelima model tersebut, terdapat satu model dengan sudut lereng 33,67o yang memenuhi standar stabilitas dengan nilai Faktor Keamanan akhir 1,925 dengan Metode Bishop yang berarti lereng dalam keadaan stabil.

2.11 *Research Gap*

Berbagai studi sebelumnya telah membahas penggunaan metode *shotcrete* dalam upaya peningkatan stabilitas lereng, baik melalui pendekatan numerik menggunakan *PLAXIS* maupun observasi di lapangan. Namun, sebagian besar penelitian tersebut belum secara spesifik menyoroti efektivitas *shotcrete* pada lereng dengan berbagai macam kemiringan dan kondisi tanah *Clay shale* yang dikenal memiliki sifat mudah lapuk, swelling, dan sangat sensitif terhadap kadar air. Tanah *Clay shale* memiliki karakteristik geoteknik yang berbeda dibandingkan jenis tanah lainnya, sehingga memerlukan perlakuan khusus dalam penanganannya. Selain itu, studi yang menggabungkan penggunaan *shotcrete* dengan sistem drainase untuk mengatasi tekanan air pori pada *Clay shale* juga masih terbatas. Dengan demikian, masih terdapat kebutuhan akan penelitian yang secara khusus mengkaji kinerja metode *shotcrete* dalam melindungi permukaan lereng *Clay shale* dari pelapukan serta meningkatkan faktor keamanan, baik melalui pendekatan numerik maupun uji lapangan secara terintegrasi.



BAB III

METODE PENELITIAN (tambah foto foto lapangan)

3.1 Bentuk Penelitian

Penelitian ini menggunakan pemodelan numerik dengan *PLAXIS* untuk merepresentasikan kondisi aktual di lapangan. Parameter parameter input diperoleh dari data sekunder yang dikumpulkan langsung di lapangan serta hasil pengujian laboratorium. Hasil pemodelan menunjukkan metode *shotcrete* dalam melindungi permukaan lereng yang didominasi oleh material tanah *Clay shale*.

3.2 Lokasi Penelitian

Penelitian diambil dari Proyek Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Seksi 6B Ibu Kota Nusantara (IKN) STA 2+850. Lokasi tersebut dipilih karna adanya kandungan tanah *Clay shale* pada lereng sebagai zona merah dalam penanganan Proyek Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Seksi 6B Ibu Kota Nusantara (IKN).



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian



Gambar 3.2 Kondisi Longsoran Dari Atas



Gambar 3.3 Kondisi Longsoran Dari Bawah

3.3 Metode Pengumpulan Data

Data yang diperlukan dalam penelitian ini terdiri dari dua jenis, yaitu data primer dan data sekunder.

1. Data sekunder yang bersumber dari penelitian terdahulu, parameter *shotcrete*, dan data *cross section*. Penelitian terdahulu digunakan sebagai referensi dalam memahami karakteristik tanah *clay shale* serta pendekatan analisis stabilitas lereng yang relevan. Parameter *shotcrete* digunakan untuk memodelkan sistem perkuatan lereng pada analisis numerik, sedangkan data *cross section* berfungsi untuk merepresentasikan kondisi geometri lereng yang dianalisis pada lokasi penelitian.
2. Data primer yang digunakan dalam penelitian ini adalah data *borelog* yang diperoleh dari hasil pengujian lapangan. Data *borelog* memberikan informasi mengenai stratifikasi tanah, kedalaman dan ketebalan lapisan tanah *clay shale*, serta kondisi tanah di lokasi penelitian. Data ini menjadi dasar dalam penentuan parameter tanah dan pemodelan kondisi aktual lereng pada analisis stabilitas menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D.

3.4 Metode Analisis Data

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode numerik yang dilakukan dengan bantuan perangkat lunak geoteknik. Analisis numerik ini bertujuan untuk mengetahui tingkat stabilitas lereng, pola dan posisi bidang gelincir yang berpotensi terjadi, serta nilai *safety factor* yang berkembang di dalam massa lereng. Melalui pendekatan ini, perilaku tanah *clay shale* terhadap perubahan geometri lereng dan pengaruh perkuatan dapat dianalisis secara lebih detail dan komprehensif.

Pada penelitian ini juga diperhitungkan tingkat efektivitas penggunaan *shotcrete* sebagai sistem perkuatan permukaan lereng dalam menjaga stabilitas lereng pada berbagai variasi sudut kemiringan lereng. Analisis dilakukan dengan membandingkan kondisi lereng tanpa perkuatan dan dengan perkuatan *shotcrete* untuk setiap skenario kemiringan yang ditinjau. Hasil analisis berupa distribusi deformasi, mekanisme keruntuhan, serta nilai *safety factor* kemudian dievaluasi dan dibandingkan dengan ketentuan dan persyaratan yang tercantum dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) yang berlaku.

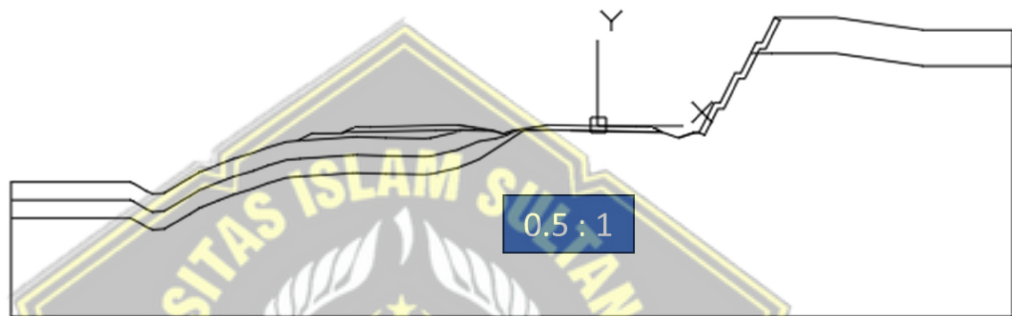
Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, dapat ditarik kesimpulan mengenai kondisi kestabilan lereng pada STA 2+850 serta tingkat keamanan lereng terhadap potensi

kelongsoran. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pertimbangan dalam perencanaan perbaikan dan perkuatan lereng pada proyek jalan bebas hambatan di kawasan Ibu Kota Nusantara.

3.5 Metode penelitian

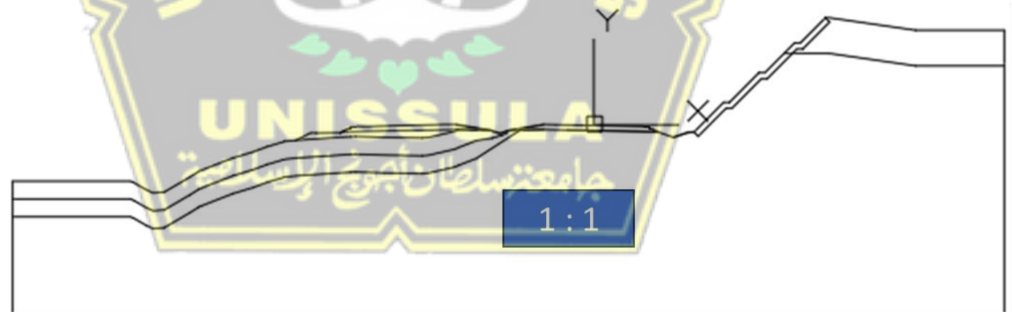
Pada penelitian ini menggunakan beberapa macam metode kemiringan lereng dengan perkuatan shotcrete sebagai perkuatan permukaan lereng yang terdapat tanah clay shale. Berikut variasi metode kemiringan lereng:

1. Kemiringan Lereng 0.5:1



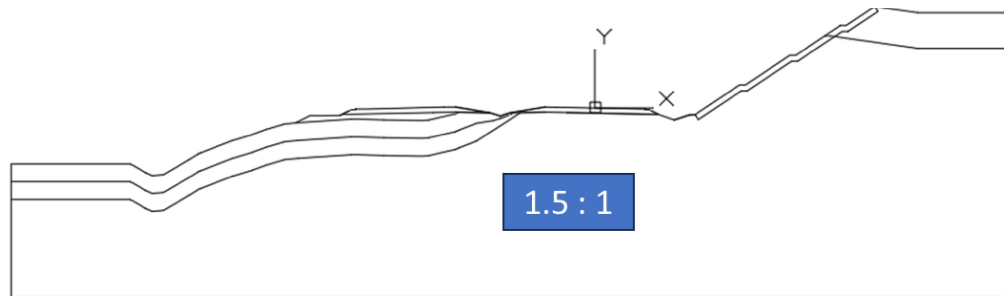
Gambar 3.4 Variabel 1 Kemiringan Lereng 0.5:1

2. Kemiringan Lereng 1:1



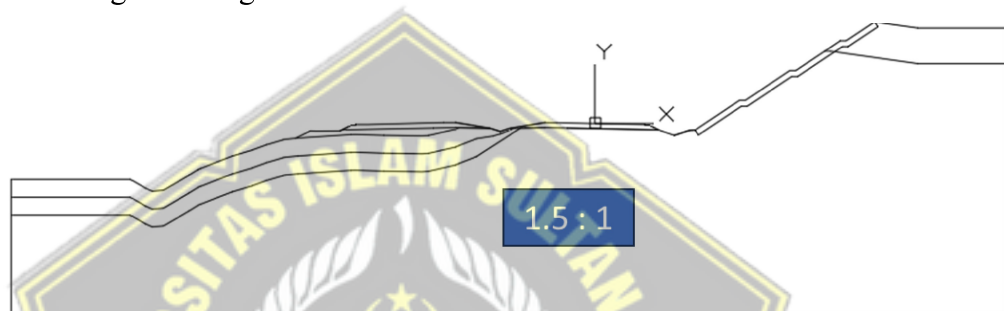
Gambar 3.5 Variabel 1 Kemiringan Lereng 1:1

3. Kemiringan Lereng 1.5:1



Gambar 3.6 Variabel 1 Kemiringan Lereng 1.5:1

4. Kemiringan Lereng 2:1



Gambar 3.7 Variabel 1 Kemiringan Lereng 2:1

3.6 Tahapan Penelitian

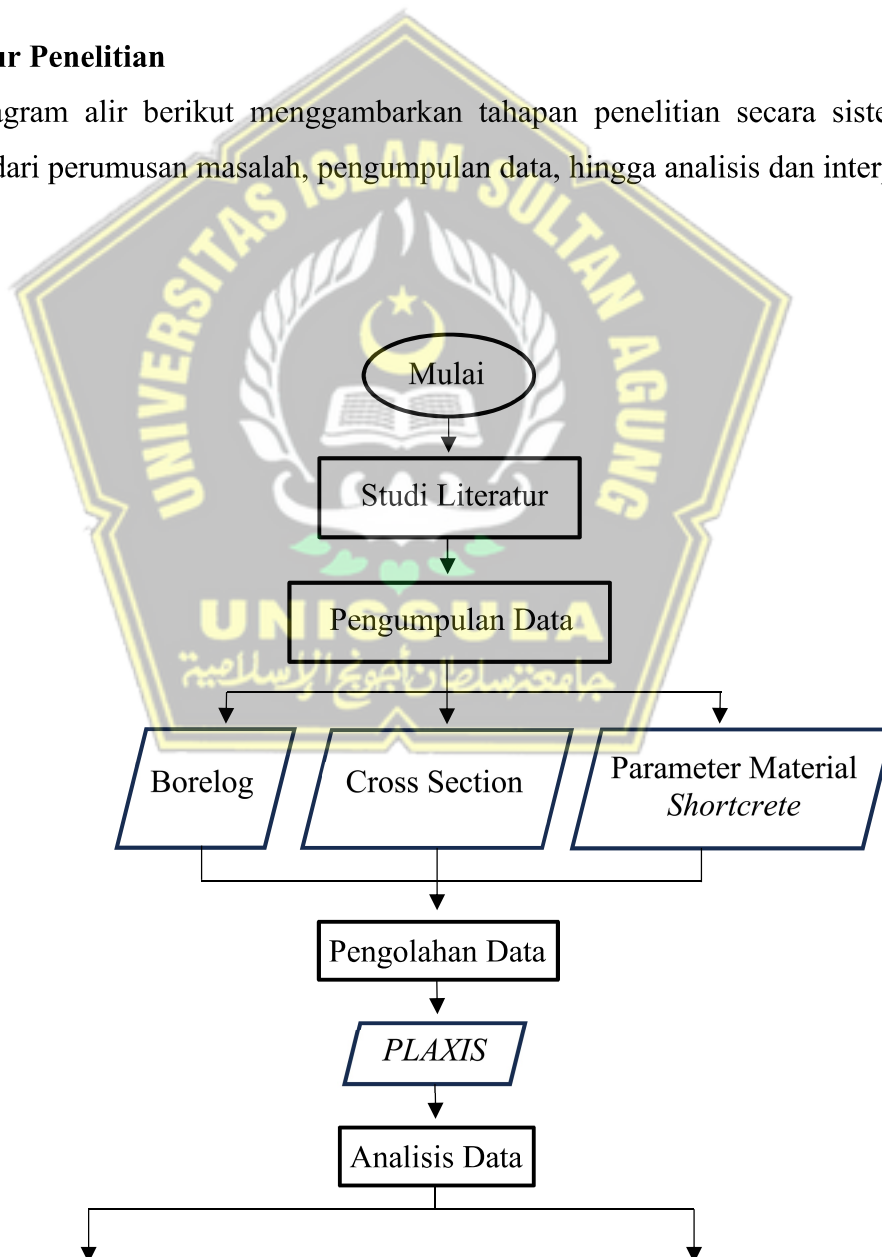
Langkah-langkah dalam penelitian ini perlu dirancang dan diatur secara sistematis agar memudahkan pelaksanaan penelitian. Tahapan-tahapan yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

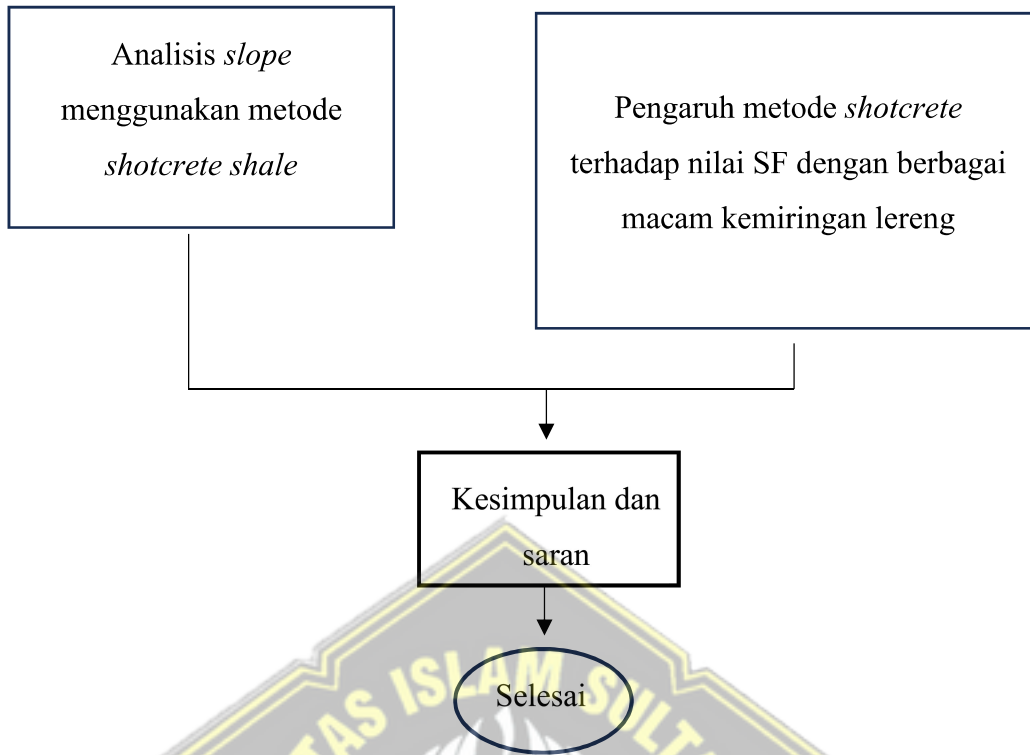
- Perumusan masalah dalam Proyek Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Seksi 6B Ibu Kota Nusantara (IKN) STA 2+850, fokus penelitian adalah untuk mitigasi stabilitas lereng menggunakan metode *shotcrete*. Pertanyaan penelitian adalah bagaimana menggambarkan metode tersebut dalam metode *numerik*.
- Tinjauan pustaka referensi diambil dari penelitian terdahulu seperti buku, jurnal, dan peraturan terkait analisis stabilitas lereng metode *shotcrete*. Tinjauan pustaka dilakukan untuk memperoleh pemahaman yang mendalam tentang analisis stabilitas lereng metode *shotcrete* dalam menangani tanah *Clay shale* pada lereng.

- c. Pengumpulan data-data dikumpulkan melalui data lapangan dan buku rujukan desain stabilitas lereng di Indonesia, serta langkah-langkah analisis yang benar melalui buku panduan *software*.
- d. Pengolahan dan analisis data diolah dengan *software* untuk menganalisis stabilitas lereng, serta hasil analisis disesuaikan dengan SNI yang ada di Indonesia.
- e. Kesimpulan dari analisis data, disimpulkan bahwa stabilitas lereng yang terdapat tanah *Clay shale* masih dalam kondisi aman menggunakan mitigasi metode *shotcrete* dalam meningkatkan nilai SF.

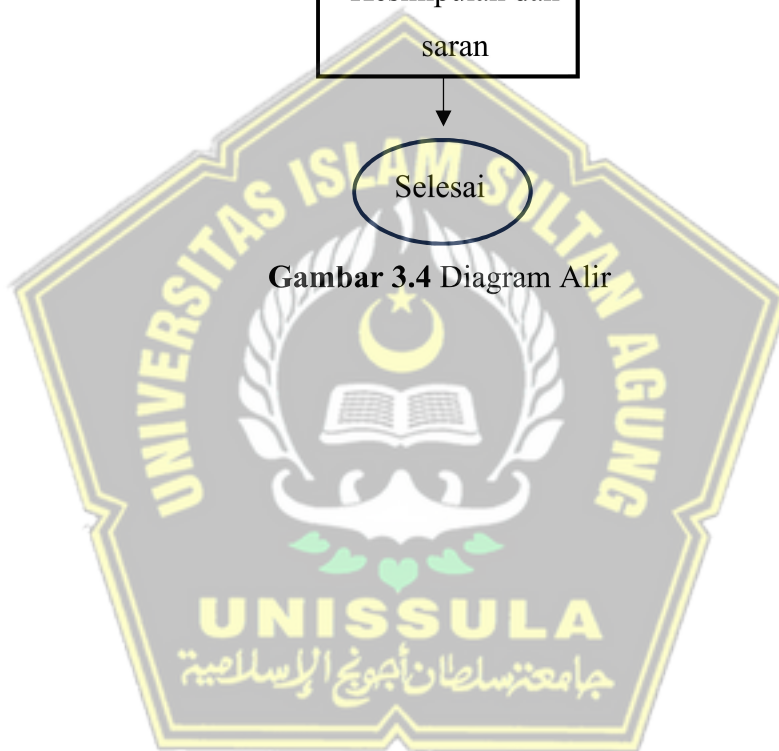
3.7 Alur Penelitian

Diagram alir berikut menggambarkan tahapan penelitian secara sistematis, mulai dari perumusan masalah, pengumpulan data, hingga analisis dan interpretasi hasil.





Gambar 3.4 Diagram Alir



BAB IV

HASIL PEMBAHASAN

4.1 Umum

Analisis stabilitas lereng pada proyek jalan bebas hambatan Seksi 6B Ibu Kota Nusantara (IKN) dilakukan pada kondisi tanah yang didominasi oleh material *clay shale*. Tanah jenis ini merupakan batuan sedimen lempungan yang memiliki karakteristik sangat sensitif terhadap perubahan kadar air, mudah mengalami pelapukan, serta menunjukkan penurunan kekuatan geser secara signifikan ketika terpapar air hujan dan kondisi lingkungan terbuka. Pada wilayah IKN, keberadaan *clay shale* cukup meluas dan menjadi salah satu faktor utama yang mempengaruhi kestabilan lereng galian maupun timbunan pada pembangunan infrastruktur jalan.

Kondisi iklim tropis dengan curah hujan tinggi di kawasan IKN semakin memperbesar potensi degradasi sifat mekanik *clay shale*, yang dapat memicu terjadinya retakan, pelunakan material, hingga longsor lereng. Apabila tidak dilakukan penanganan yang memadai, ketidakstabilan lereng dapat mengganggu fungsi pelayanan jalan tol, menurunkan tingkat keselamatan pengguna jalan, serta meningkatkan biaya pemeliharaan dan perbaikan konstruksi di masa mendatang. Oleh karena itu, perbaikan geoteknik dan perkuatan lereng menjadi aspek yang sangat penting dalam menjamin keberlanjutan infrastruktur jalan bebas hambatan di kawasan ini.

Dalam penelitian ini, analisis stabilitas lereng dilakukan menggunakan metode numerik dengan perangkat lunak PLAXIS 2D. Pemodelan numerik dipilih karena mampu merepresentasikan perilaku nonlinier tanah *clay shale* serta interaksi antara tanah dan sistem perkuatan secara lebih realistis. Analisis dilakukan pada empat kondisi kemiringan lereng yang berbeda untuk mengevaluasi pengaruh perubahan geometri lereng terhadap nilai faktor keamanan (*safety factor*) dan mekanisme keruntuhan yang mungkin terjadi.

Sebagai upaya mitigasi terhadap potensi ketidakstabilan lereng, diterapkan perkuatan *shotcrete* pada permukaan lereng. *Shotcrete* berfungsi sebagai lapisan pelindung yang dapat mengurangi infiltrasi air ke dalam massa *clay shale*, membatasi proses pelapukan, serta meningkatkan stabilitas lereng secara

keseluruhan dengan menambah kekakuan dan daya dukung permukaan lereng. Evaluasi efektivitas perkuatan *shotcrete* dilakukan dengan membandingkan hasil analisis sebelum dan sesudah pemasangan perkuatan pada masing-masing kondisi kemiringan lereng.

Hasil analisis diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai tingkat kestabilan lereng pada kondisi tanah *clay shale* di kawasan IKN, serta menjadi dasar dalam menentukan desain lereng dan sistem perkuatan yang optimal. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat mendukung perencanaan dan pembangunan jalan bebas hambatan yang aman, andal, dan berkelanjutan di wilayah Ibu Kota Nusantara.

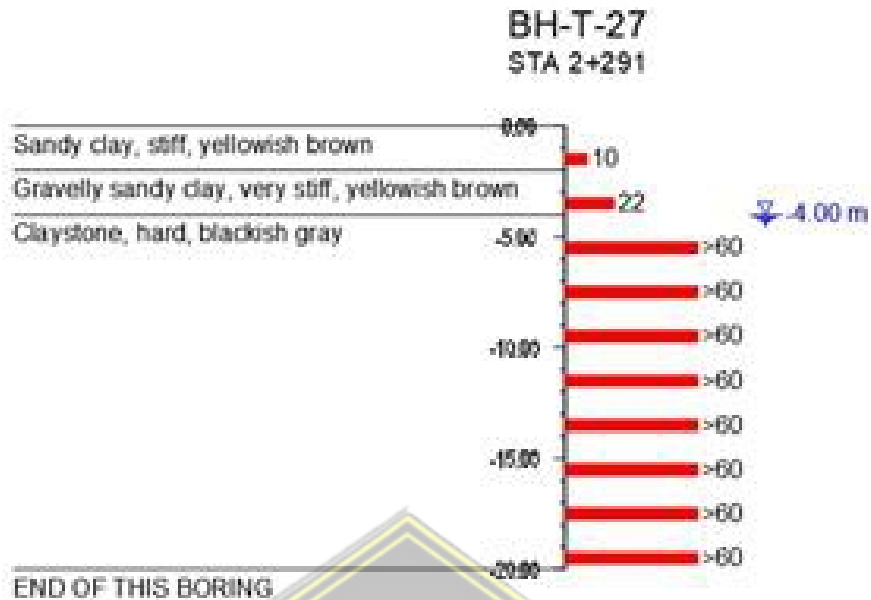
Analisis stabilitas lereng dilakukan dalam 4 kondisi dengan kemiringan lereng sebagai berikut:

- a. 1V : 0.5H
- b. 1V : 1H
- c. 1V : 1.5H
- d. 1V : 2H

Hasil analisis difokuskan pada nilai *safety factor* dari setiap model dalam empat kondisi. Berdasarkan nilai tersebut, dapat ditentukan kemiringan lereng yang aman untuk penerapan mitigasi menggunakan *shotcrete*.

4.2 Parameter Analisis

Pada analisis Sta 2+850 terdapat lapisan *Clay shale* di bagian lereng karena faktor galian yang dilakukan di lapangan. Kondisi tersebut menyebabkan longsoran pada area lereng akibat keterlambatan penutupan lapisan lereng, yang memicu terjadinya pelapukan pada lereng. Nilai parameter *clay shale* diambil dari penelitian (AK Somantri, 2018) dan lapisan tanah dari uji borehole. Dalam jurnal tersebut dijelaskan berbagai variasi parameter tanah *Clay shale* yang telah diteliti. Pada penelitian ini, parameter tanah *Clay shale* dipilih dengan mempertimbangkan nilai *safety factor* pada kondisi *gravity loading* yang berada di bawah 1,5 yang mengindikasikan potensi terjadinya longsor atau kondisi konstruksi yang tidak aman.



Gambar 4.1 Hasil Uji Borehole

(Nspt pengujian lapangan tim proyek pembangunan jalan IKN seksi 6B)

Gambar diatas merupakan hasil pengujian borelog yang dilakukan di Sta terdekat guna menjadi acuan dalam membuat lapisan tanah pada model *PLAXIS*.

Tabel 4.1 Parameter Pemodelan

No	Konsistensi	NSPT	E	c'	ϕ	k	γ
1	Very Stiff Clay Shale	17,2	17200	13	25	4,50E-05	18
2	Hard Clay	115	115000	65	30	4,50E-05	19
3	Hard Clay	60	60000	65	30	4,50E-05	19
4	Very Stiff Clay	30	30000	15	20	4,50E-03	18

Sumber : (AK Somantri, 2018)

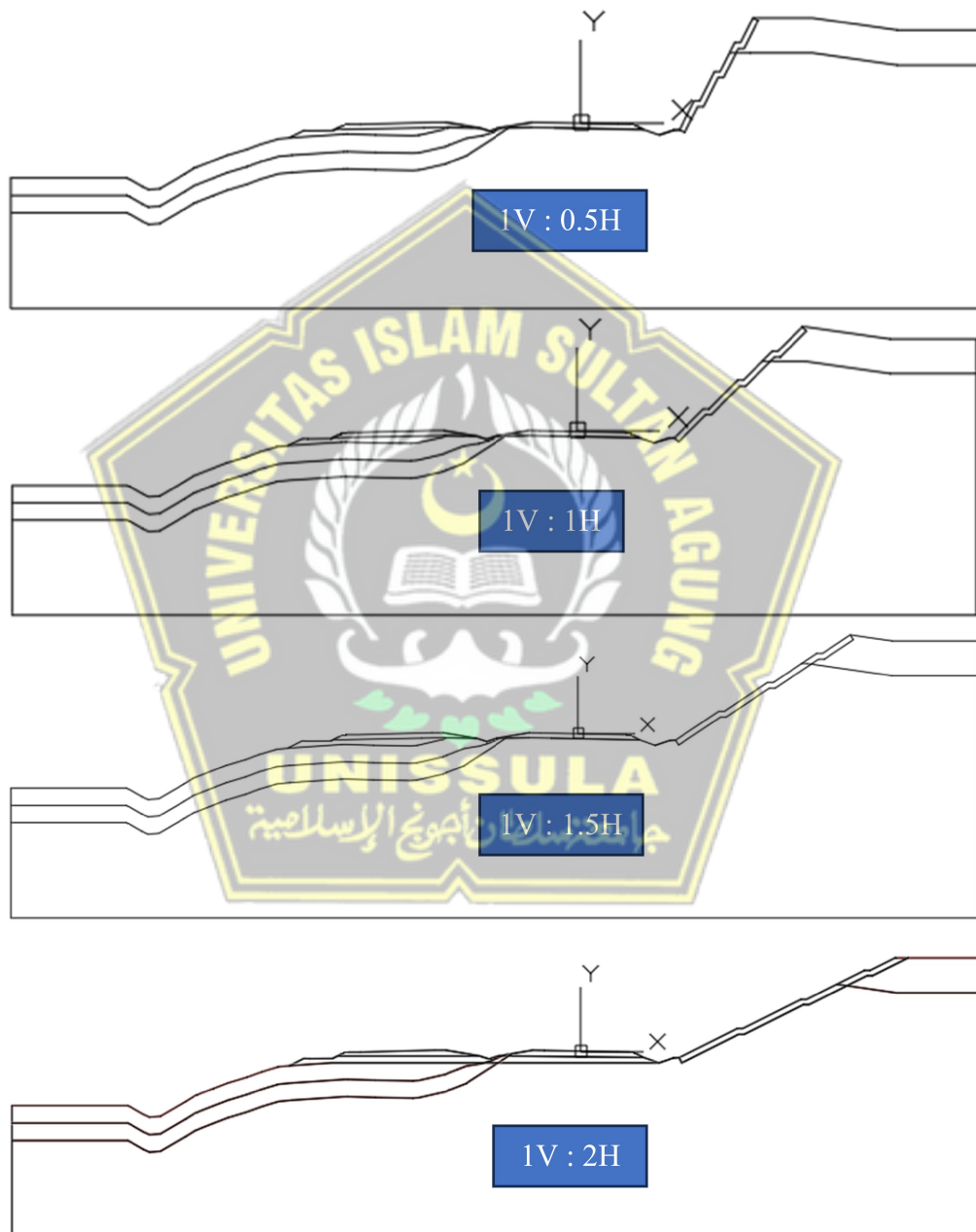
Untuk parameter selain *Clay shale* didapatkan dari soil investigasi di lapangan lalu dikorelasi dengan parameter lain seperti c' , ϕ , k dan gamma. Analisis ini menggunakan *shotcrete* sebagai metode mitigasi pada permukaan lereng dengan variasi kemiringan. Mutu beton yang digunakan memiliki nilai $f_c' = 28$ MPa, dengan parameter material dimodelkan sesuai input pada *PLAXIS* sebagai berikut:

Tabel 4.2 Parameter *Shotcrete*

No	Parameter	EA	EI	v
1	Shotcrete	1.24E+06	2.59E+02	0.15

4.3 Pemodelan Autocad

Untuk mempermudah pemodelan di *PLAXIS*, terlebih dahulu dilakukan pembuatan sketsa tahap konstruksi menggunakan AutoCAD. Setelah sketsa selesai, file disimpan dalam format DXF agar dapat diimpor langsung ke *PLAXIS* sebagai input pemodelan.



Gambar 4.2 Pemodelan Autocad

4.4 Analisis *PLAXIS*

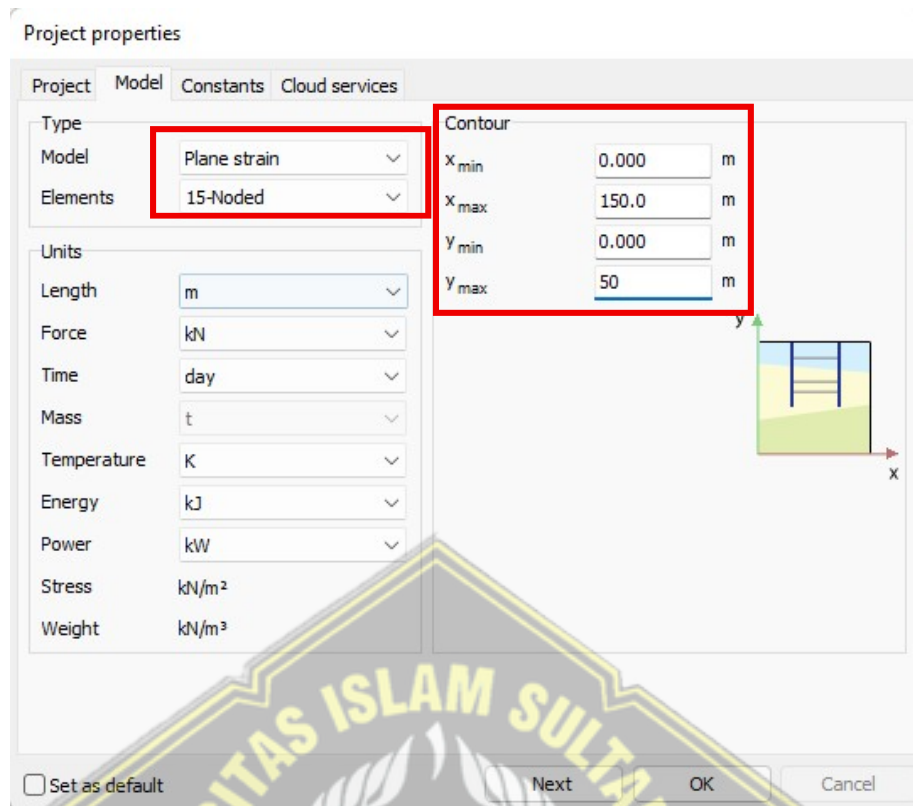
Pada pemodelan *Software PLAXIS V22* penulis menggunakan parameter SI yang berada di lapangan yang sudah diolah. Berikut langkah langkah analisis menggunakan *Software PLAXIS*.

4.3.1 Project Properties

Pada analisis ini digunakan model *plane strain* dengan jumlah elemen *node* sebanyak lima belas. Dimensi geometri diatur sedemikian rupa sehingga posisi model berada simetris di kanan dan kiri, dengan panjang batas (*boundary condition*) sebesar 50 meter. Nilai tersebut dipilih dengan pertimbangan bahwa semakin besar batas model yang digunakan, maka hasil analisis dapat ditangkap secara keseluruhan tanpa harus terpotong. Panjang batas ini dapat diperbesar hingga mendekati kondisi sebenarnya, namun perlu dipertimbangkan bahwa semakin besar *boundary condition* yang digunakan, waktu komputasi akan semakin lama. Satuan yang digunakan adalah meter (m), agar mempermudah dalam pengukuran di *PLAXIS*.

No	Konsistensi	NSPT	E	c'	Ø	k	γ
1	Very Stiff Clay Shale	17,2	17200	13	25	4,50E-05	18
2	Hard Clay	115	115000	65	30	4,50E-05	19
3	Hard Clay	60	60000	65	30	4,50E-05	19
4	Very Stiff Clay	30	30000	15	20	4,50E-03	18

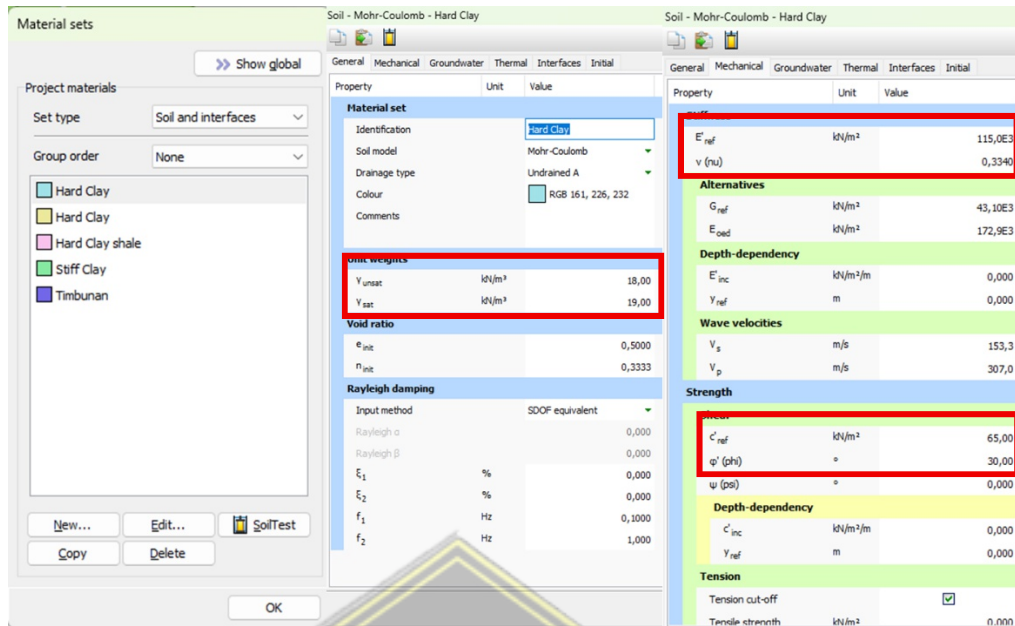
Gambar 4.3 Parameter Input Plaxis



Gambar 4.4 Project Properties

4.3.2 Material Setting

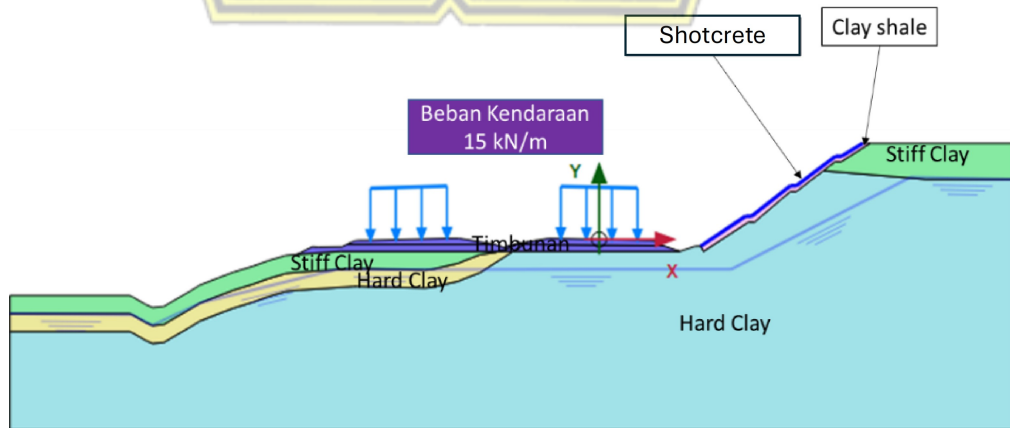
Pada jendela *Soil* di *PLAXIS*, pilih opsi *Show Material* untuk memasukkan parameter tanah yang digunakan pada Proyek Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Seksi 6B IKN STA 2+850. Parameter tanah yang dimasukkan mencakup karakteristik material sesuai hasil investigasi lapangan dan laboratorium. Model yang digunakan dalam pemodelan ini adalah *Soil and Interface*, yang memungkinkan simulasi interaksi antara massa tanah dan elemen struktur secara lebih akurat.



Gambar 4.5 (Input Material Parameter input di kotakin)

4.3.3 Pemodelan PLAXIS

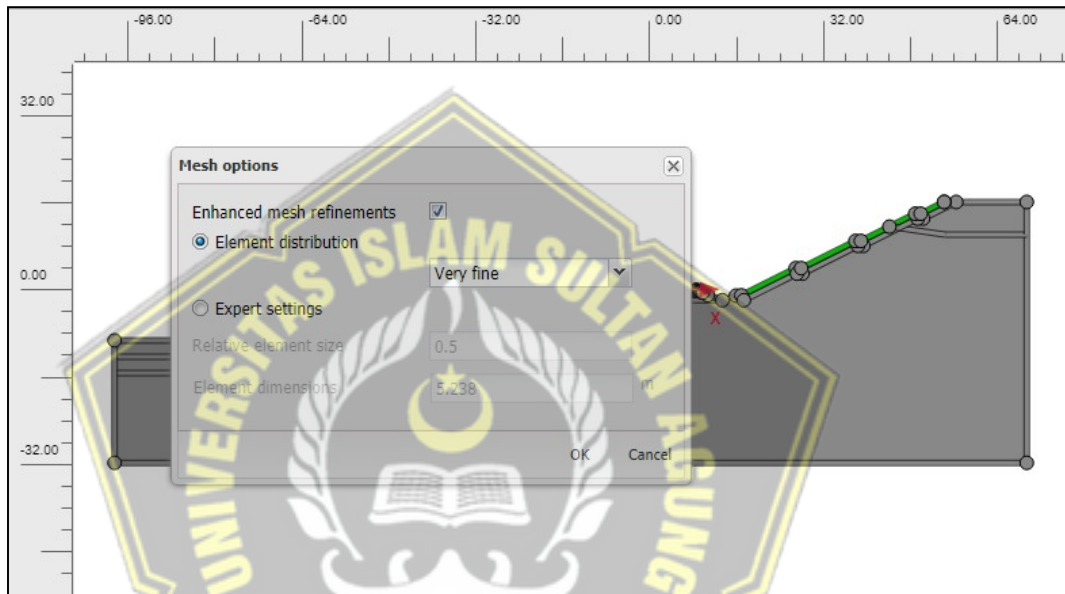
Dalam pemodelan menggunakan *PLAXIS*, elemen *shotcrete* dengan mutu beton $f_c' = 28$ MPa dimodelkan menggunakan *toolbar Plate*, yang berfungsi merepresentasikan elemen struktur tipis dengan kekakuan lentur tertentu. Sementara itu, pembebanan akibat lalu lintas jalan dimodelkan dengan menggunakan opsi *Line Load*, di mana beban sebesar 15 kN/m^2 diterapkan pada area yang direncanakan, sesuai dengan ketentuan pembebanan yang tercantum dalam SNI 8460:2017. Pendekatan ini digunakan agar kondisi lapangan dapat terwakili secara lebih realistis dalam analisis numerik.



Gambar 4.6 Pemodelan PLAXIS

4.3.4 Mesh (hapus)

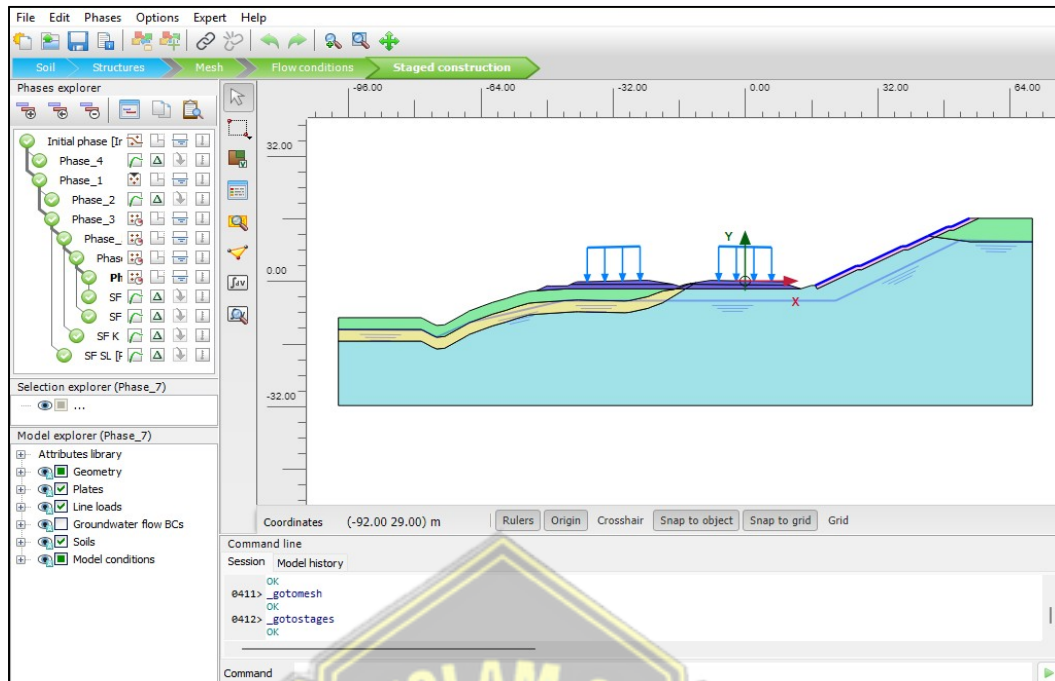
Pada jendela *Mesh* di *PLAXIS*, pilih opsi *Very Fine* untuk menghasilkan kualitas mesh yang lebih detail dan akurat. Pemilihan tingkat kerapatan mesh ini bertujuan untuk meningkatkan ketelitian hasil perhitungan numerik, terutama pada area kritis yang memerlukan representasi geometri yang presisi. Selain itu, penggunaan mesh dengan tingkat ketelitian tinggi juga memastikan bahwa semua perintah yang telah dibuat pada jendela *Structure* dapat terbaca dan berfungsi secara optimal selama proses analisis.



Gambar 4.7 Mesh

4.3.5 Structure Analysis

Pada halaman *structure analysis* kita dapat mengatur stage konstruksi yang akan dilakukan di lapangan. Kondisi eksisting terakhir terjadi longsor dengan tanpa perkuatan. Indikasi awal terdapat adanya *Clay shale* pada area tersebut sehingga perlu dilakukan penanganan untuk menjaga terjadinya *weathered* pada lereng sehingga membuat terjadinya longsor. Pada analisis diasumsikan pada permukaan lereng terdapat 1m lapisan *Clay shale*. Pada kondisi *intial phase* lapisan *clay shale* terinstal dan kondisi lereng sudah terbentuk. Analisis dibagi menjadi 4 model kemiringan lereng yang berbeda.



Gambar 4.8 *Stage Konstruksi*

4.5 Hasil Analisis (tambahkan narasi per kemiringan lereng)

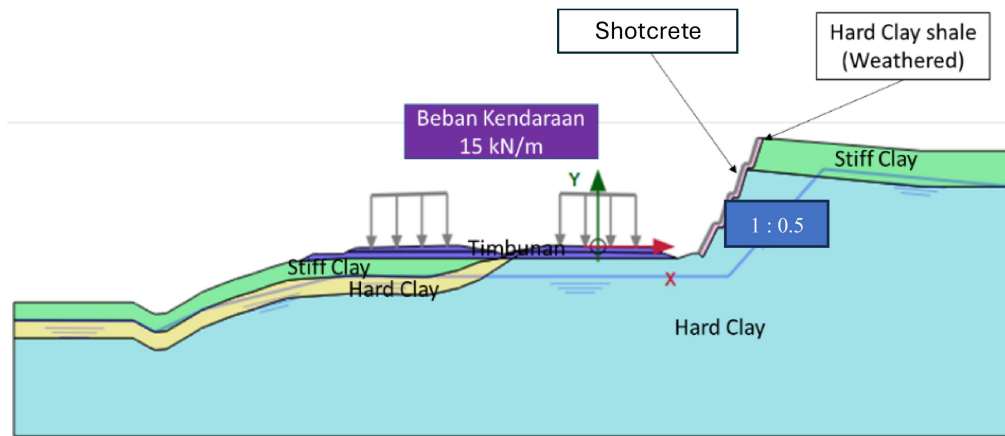
Analisis dilakukan 4 model dengan kemiringan yang berbeda, pada analisis terdapat stage *initial phase*, *instal shotcrete*, beban kendaraan, konsolidasi 1 tahun, konsolidasi 3 tahun dan konsolidasi 10 tahun. Pada hasil analisis yang diambil yaitu *initial phase*, *instal shotcrete* beban kendaraan, konsolidasi 1 tahun, konsolidasi 3 tahun dan konsolidasi 10 tahun. Hasil analisis akan berfokus pada nilai *safety factor* pada tiap kondisi model.

4.5.1 Kemiringan Lereng 1 : 0.5

Asumsi pemodelan dengan galian lereng 1 : 0.5 dilakukan dan terjadi longsor pada lereng galian. Penggambaran longsor dilakukan pada *stage initial phase* dengan *type calculation gravity loading* dan nilai SF dibawah 1.5. Setelah stage konstruksi dilakukan *instal shotcrete* yang diharapkan nilai SF akan semakin naik. Berikut hasil analisis dengan lereng 1 : 0.5.

A. Pemodelan

Berikut ditampilkan hasil pemodelan dengan kondisi galian pada lereng yang memiliki kemiringan 1 : 0.5.



Gambar 4.9 Permodelan Kemiringan Lereng 1:0.5

B. Output Initial Phase

Hasil analisis dengan kemiringan lereng 1 : 0.5, kondisi *initial phase* mengalami kegagalan (runtuh), sehingga proses *running* tidak dapat dilanjutkan. Hal ini disebabkan oleh kondisi lereng yang tidak stabil dan secara teknis tidak memungkinkan untuk diaplikasikan di lapangan.



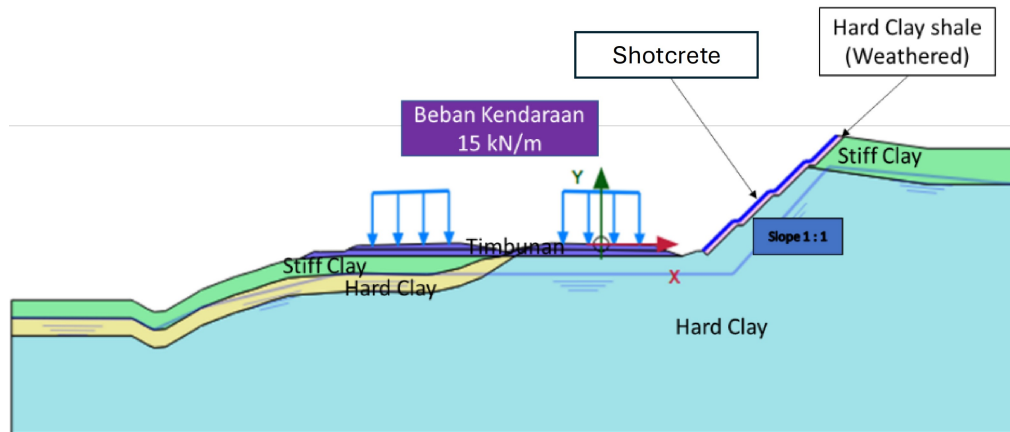
Gambar 4.10 Output Initial Phase Kemiringan Lereng 1 : 0.5

4.5.2 Kemiringan Lereng 1 : 1

Asumsi pemodelan dengan galian lereng 1 : 1 dilakukan dalam terjadi longsor pada lereng galian. Penggambaran longsor dilakukan pada *stage initial phase* dengan *type calculation gravity loading* dan nilai SF dibawah 1.5. Setelah stage konstruksi dilakukan *instal shotcret* yang diharapkan nilai SF akan semakin naik. Berikut hasil analisis dengan lereng 1 : 1.

A. Permodelan

Berikut ditampilkan hasil pemodelan dengan kondisi galian pada lereng yang memiliki kemiringan 1 : 1.



Gambar 4.11 Permodelan Kemiringan Lereng 1:1

B. *Output Initial Phase*

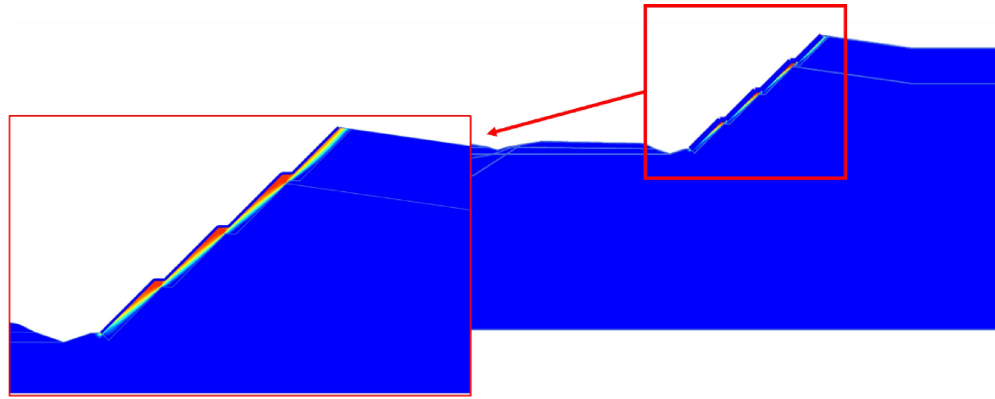
Hasil analisis dengan kemiringan lereng 1:1, kondisi *initial phase* nilai *safety factor* berada di 0.995 dengan bidang gelincir yang cukup dalam seperti ditunjukkan pada gambar dibawah. Kondisi tersebut menggambarkan kondisi lereng yang cukup kritis dan berbahaya jika tidak segera di beri perkuatan.



Gambar 4.12 Nilai *Safety factor* Initial Phase Kemiringan Lereng 1 : 1

C. *Instal Shotcrete*

Hasil analisis dengan kemiringan lereng 1:1, kondisi *install shotcrete* nilai *safety factor* berada di 1.140 dengan bidang gelincir yang tidak terlalu dalam. Dengan nilai *safety factor* yang sudah meningkat menggambarkan saat dilakukan pemasangan *shotcrete* kondisi lereng berangsur membaik tetapi masih belum dalam kondisi aman karna masih dibawah 1.5.



Gambar 4.13 Nilai *Safety factor* Instal *Shotcrete* Kemiringan Lereng 1 : 1

D. *Service Load*

Hasil analisis dengan kemiringan lereng 1:1, kondisi *service load* nilai *safety factor* berada di 1.270 dengan bidang gelincir yang tidak terlalu dalam. Dengan nilai *safety factor* yang sudah meningkat menggambarkan saat jalan sudah bisa beroperasi kondisi lereng berangsur membaik. Nilai *safety factor* yang meningkat dan sedangkan tetapi masih belum dalam kondisi aman karna masih dibawah 1.5. Hal tersebut masih belum memenuhi standar kondisi aman saat akhir konstruksi dengan nilai *safety factor* 1.3.



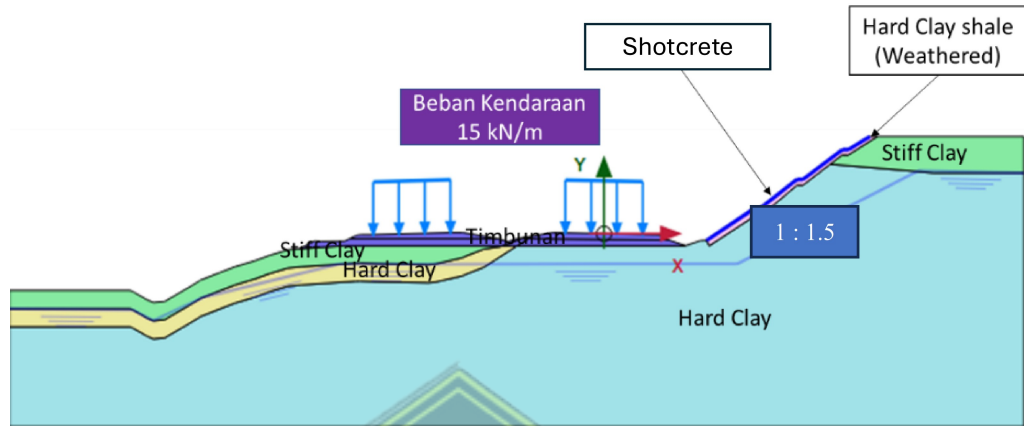
Gambar 4.14 Nilai *Safety Service Load Shotcrete* Kemiringan Lereng 1 : 1

4.5.3 Kemiringan Lereng 1 : 1.5

Asumsi pemodelan dengan galian lereng 1 : 1.5 dilakukan dalam terjadi longsor pada lereng galian. Penggambaran longsor dilakukan pada *stage initial phase* dengan *type calculation gravity loading* dan nilai SF dibawah 1.5. Setelah stage konstruksi dilakukan *instal shotcret* yang diharapkan nilai SF akan semakin naik dan memenuhi kriteria desain dengan nilai SF 1.5. Berikut hasil analisis dengan lereng 1 : 1.5.

A. Permodelan

Berikut ditampilkan hasil pemodelan dengan kondisi galian pada lereng yang memiliki kemiringan 1 : 1.5.



Gambar 4.15 Permodelan Kemiringan Lereng 1 : 1.5

B. Output Initial Phase

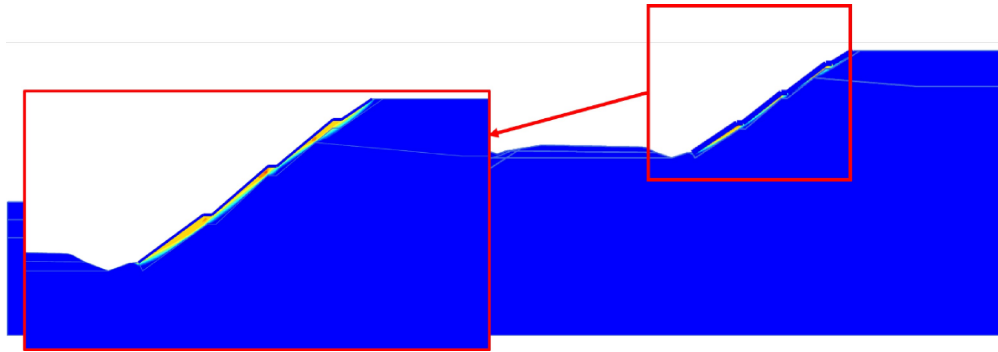
Hasil analisis dengan kemiringan lereng 1 : 1.5, kondisi *initial phase* nilai *safety factor* berada di 1.325 dengan bidang gelincir yang cukup dalam seperti ditunjukkan pada gambar dibawah. Kondisi tersebut menggambarkan kondisi lereng yang cukup kritis dan berbahaya jika tidak segera di beri perkuatan.



Gambar 4.16 Nilai *Safety factor* Initial Phase Kemiringan Lereng 1 : 1.5

C. Output Instal *Shotcrete*

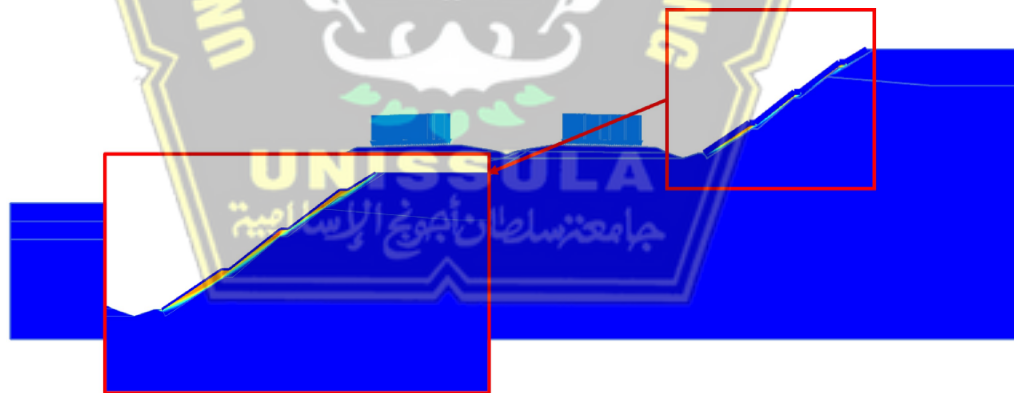
Hasil analisis dengan kemiringan lereng 1 : 1.5, kondisi *install shotcrete* nilai *safety factor* berada di 1.341 dengan bidang gelincir yang tidak terlalu dalam. Dengan nilai *safety factor* yang sudah meningkat menggambarkan saat dilakukan pemasangan *shotcrete* kondisi lereng berangsur membaik tetapi masih belum dalam kondisi aman karna masih dibawah 1.5.



Gambar 4.17 Nilai *Safety factor* Instal *Shotcrete* Kemiringan Lereng 1 : 1.5

D. Output Service Load

Hasil analisis dengan kemiringan lereng 1 : 1.5, kondisi *service load* nilai *safety factor* berada di 1.572 dengan bidang gelincir yang tidak terlalu dalam. Dengan nilai *safety factor* yang sudah meningkat menggambarkan saat jalan sudah bisa beroperasi kondisi lereng sudah memenuhi kriteria desain. Hal tersebut sudah memenuhi standard kondisi aman saat akhir konstruksi dengan nilai *safety factor* lebih dari 1.3. Dengan diberikan beban pada jalan nilai SF semakin meningkat dikarenakan pada pemodelan beban yang diaplikasikan bersifat menahan bidang gelincir dari lereng (bersifat seperti turap / beronjong) sehingga nilai SF semakin meningkat.



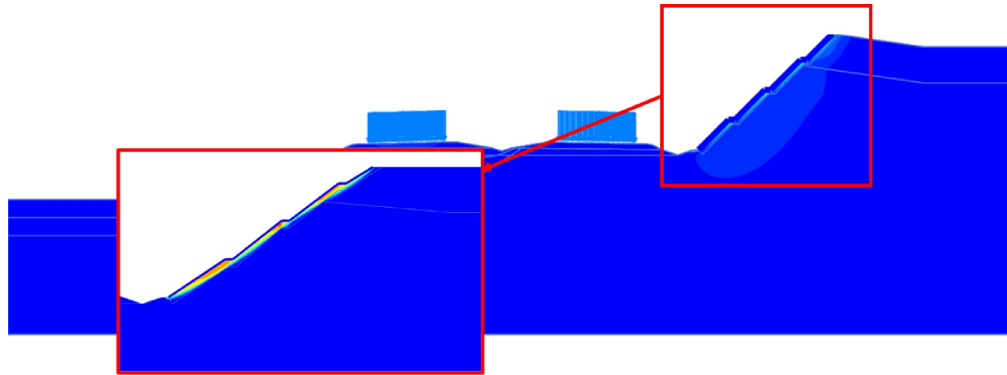
Gambar 4.18 Nilai *Safety Service Load Shotcrete* Kemiringan Lereng 1 :

1.5

E. Output Analisis Konsolidasi 1 Tahun

Hasil analisis dengan kemiringan lereng 1 : 1.5, kondisi konsolidasi 1 tahun nilai *safety factor* berada di 1.600 dengan bidang gelincir yang tidak terlalu dalam. Dengan nilai *safety factor* yang sudah meningkat menggambarkan kondisi lereng kondisi lereng yang cukup baik setelah 1 tahun beroperasi. Hal

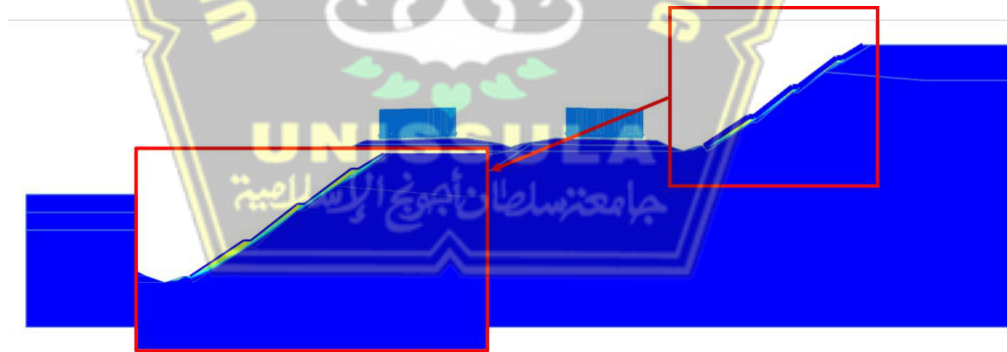
tersebut sudah memenuhi standar kondisi aman desain konstruksi dengan nilai *safety factor* lebih dari 1.5.



Gambar 4.19 Nilai Safety Konsolidasi 1 Tahun *Shotcrete* Kemiringan Lereng 1 : 1.5

F. Output Analisis Konsolidasi 10 Tahun

Hasil analisis dengan kemiringan lereng 1 : 1.5, kondisi konsolidasi 10 tahun nilai *safety factor* berada di 1.634 dengan bidang gelincir yang tidak terlalu dalam. Dengan nilai *safety factor* yang sudah meningkat menggambarkan kondisi lereng yang cukup baik setelah 10 tahun beroperasi. Hal tersebut sudah memenuhi standar kondisi aman desain konstruksi dengan nilai *safety factor* lebih dari 1.5.



Gambar 4.20 Nilai Safety Konsolidasi 10 Tahun *Shotcrete* Kemiringan Lereng 1 : 1.5

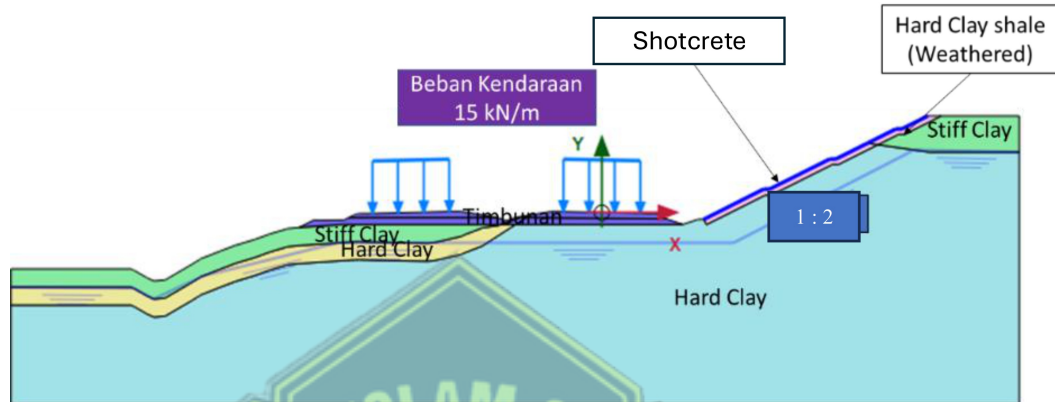
4.5.4 Kemiringan Lereng 1 : 2

Asumsi pemodelan dengan galian lereng 1 : 2 dilakukan dengan keadaan sudah terjadi longsor pada lereng galian. Penggambaran longsor dilakukan pada *stage initial phase* dengan *type calculation gravity loading* dan nilai SF dibawah 1.5. Setelah stage konstruksi dilakukan *instal shotcret* yang diharapkan nilai SF akan

semakin naik dan memenuhi kriteria desain dengan nilai SF 1.5. Berikut hasil analisis dengan lereng 1 : 2.

A. Permodelan

Berikut ditampilkan hasil pemodelan dengan kondisi galian pada lereng yang memiliki kemiringan 1 : 2.



Gambar 4.21 Permodelan Kemiringan Lereng 1 : 2

B. Output Initial Phase

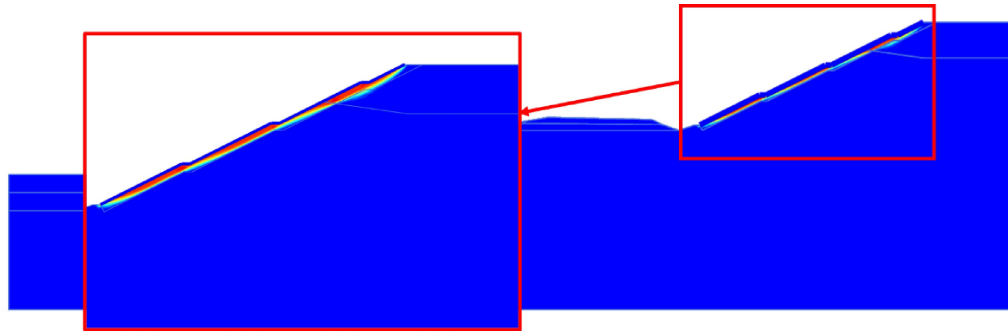
Hasil analisis dengan kemiringan lereng 1 : 2, kondisi *initial phase* nilai *safety factor* berada di 1.335 dengan bidang gelincir yang cukup dalam seperti ditunjukkan pada gambar dibawah. Kondisi tersebut menggambarkan kondisi lereng yang cukup kritis dan berbahaya jika tidak segera di beri perkuatan.



Gambar 4.22 Nilai *Safety factor* Initial Phase Kemiringan Lereng 1 : 2

C. Output Instal *Shotcrete*

Hasil analisis dengan kemiringan lereng 1 : 2, kondisi *install shotcrete* nilai *safety factor* berada di 1.482 dengan bidang gelincir yang tidak terlalu dalam. Dengan nilai *safety factor* yang sudah meningkat menggambarkan saat dilakukan pemasangan *shotcrete* kondisi lereng berangsur membaik tetapi masih belum dalam kondisi aman karna masih dibawah 1.5.



Gambar 4.23 Nilai *Safety factor* Instal *Shotcrete* Kemiringan Lereng 1 : 2

D. Output Service Load

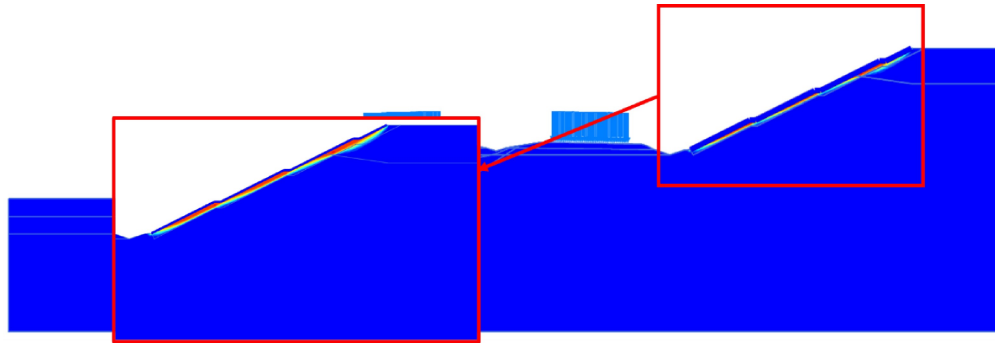
Hasil analisis dengan kemiringan lereng 1 : 2, kondisi *service load* nilai *safety factor* berada di 1.834 dengan bidang gelincir yang tidak terlalu dalam. Dengan nilai *safety factor* yang sudah meningkat menggambarkan saat jalan sudah bisa beroperasi kondisi lereng sudah memenuhi kriteria desain. Hal tersebut sudah memenuhi standard kondisi aman saat akhir konstruksi dengan nilai *safety factor* lebih dari 1.3. Dengan diberikan beban pada jalan nilai SF semakin meningkat dikarenakan pada pemodelan beban yang diaplikasikan bersifat menahan bidang gelincir dari lereng (bersifat seperti turap / beronjong) sehingga nilai SF semakin meningkat.



Gambar 4.24 Nilai *Safety Service Load Shotcrete* Kemiringan Lereng 1 : 2

E. Output Konsolidasi 1 Tahun

Hasil analisis dengan kemiringan lereng 1 : 2, kondisi konsolidasi 1 tahun nilai *safety factor* berada di 1.851 dengan bidang gelincir yang tidak terlalu dalam. Dengan nilai *safety factor* yang sudah meningkat menggambarkan kondisi lereng kondisi lereng yang cukup baik setelah 1 tahun beroperasi. Hal tersebut sudah memenuhi standar kondisi aman desain konstruksi dengan nilai *safety factor* lebih dari 1.5.



Gambar 4.25 Nilai Safety Konsolidasi 1 Tahun *Shotcrete* Kemiringan Lereng 1 : 2

F. Output Konsolidasi 10 Tahun

Hasil analisis dengan kemiringan lereng 1 : 2, kondisi konsolidasi 10 tahun nilai *safety factor* berada di 1.881 dengan bidang gelincir yang tidak terlalu dalam. Dengan nilai *safety factor* yang sudah meningkat menggambarkan kondisi lereng yang cukup baik setelah 10 tahun beroperasi. Hal tersebut sudah memenuhi standar kondisi aman desain konstruksi dengan nilai *safety factor* lebih dari 1.5.



Gambar 4.26 Nilai Safety Konsolidasi 10 Tahun *Shotcrete* Kemiringan Lereng 1 : 2

4.5.5 Perbandingan Hasil Analisis

Pada hasil keseluruhan pada 4 model, kemiringan lereng yang relevan untuk diterapkan pada lereng yang terdapat tanah *Clay shale* adalah 1 : 1.5 dan 1 : 2. Kemiringan lereng tersebut dapat meredam sliding pada lereng sehingga meningkatkan nilai *safety factor* pada lereng. Sedangkan pada lereng 1 : 0.5 dan 1 : 1 tidak dianjurkan jika diterapkan pada kasus galian lereng yang terdapat tanah

Clay shale. Berikut hasil rangkuman analisis dari 4 kondisi kemiringan lereng yang berbeda.

Tabel 4.3 Nilai SF 4 Model

No	Slope	Gravity Loading	Instal Shotcrete	Service Load	1 Tahun	10 Tahun
1	1 : 0.5	0.66	Collaps	Collaps	Collaps	Collaps
2	1 : 1	0.995	1.14	1.27	0.54	Collaps
3	1 : 1.5	1.325	1.341	1.572	1.6	1.634
4	1 : 2	1.335	1.482	1.834	1.851	1.881



BAB V

KESIMPULAN DAN HASIL

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis pada kondisi 4 lereng yang berbeda dengan perkuatan *shotcrete*, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil analisis menunjukkan bahwa konfigurasi kemiringan lereng galian minimum yang direkomendasikan untuk diaplikasikan adalah lereng dengan perbandingan 1:1,5 dan 1:2, karena pada kedua geometri tersebut diperoleh nilai faktor keamanan (safety factor, SF) lebih besar dari 1,5. Nilai SF tersebut menunjukkan tingkat kestabilan yang memadai dan tetap terjaga hingga periode analisis jangka panjang selama 10 tahun.
2. Hasil analisis menunjukkan perbedaan yang signifikan antara kondisi lereng tanpa perkuatan dan dengan perkuatan *shotcrete*. Pada kondisi tanpa perkuatan, lereng 1:0,5 mengalami kegagalan (SF = 0,6), sedangkan lereng 1:1 (SF = 0,995), 1:1,5 (SF = 1,325), dan 1:2 (SF = 1,335) masih berada di bawah kriteria aman (SF \geq 1,5). Setelah diberikan perkuatan *shotcrete*, nilai SF cenderung meningkat, khususnya pada lereng 1:1 dengan SF = 1,27 pada tahap service load, namun seluruh variasi kemiringan lereng tetap belum memenuhi kriteria keamanan yang dipersyaratkan.

5.2 Saran

Setelah mengetahui hasil analisis, diajukan beberapa saran untuk penelitian selanjutnya:

1. Pada lereng yang terjadi runtuh dapat di tambahkan perkuatan soil nailing untuk mengetahui bagaimana peran *shotcrete* dan soil nailing pada lereng.
2. Pada pemodelan dapat ditambahkan perhitungan aliran air pada lereng.

Daftar Pustaka

- Afifa, R. H. (n.d.). Analisis kestabilan lereng highwall dan lowwall menggunakan limit equilibrium method pada pit penambangan batubara PT. B, Kalimantan Timur. *Repository.Uinjkt.Ac.Id*.
- Alatas, I. M., & Simatupang, P. T. (2017). Pengaruh proses pelapukan *Clay shale* terhadap perubahan parameter rasio disintegritas (DR). *Jurnal Teknik Sipil ITB*.
- Alhadar, S., Asrida, L., Prabandiyani, S., (2014). Analisis Stabilitas Lereng Pada Tanah *Clay shale* Proyek Jalan Tol Semarang-Solo Paket VI STA 22+ 700 sampai STA 22+ 775. *Jurnal Karya Teknik Sipil*.
- Andriani, T., Zakaria, Z., Muslim, D., (2017). Analisis Stabilitas Lereng Area Timbunan Menggunakan Metoda Kesetimbangan Batas Pada Tambang Terbuka Batubara Daerah Purwajaya, Kecamatan Loa Janan, Kabupaten Kutai Kartanegara. *Buletin Sumber Daya Geology*.
- Azhari, A. (2024). *Analisis Desain Eksisting Perkuatan Lereng Pada Tanah Clay shale Dan Alternatif Modifikasinya Studi Kasus: Ruas Jalan Awunio–Lapuko Sta 4+ 955–5+ 015 Provinsi Sulawesi Tenggara*. repository.its.ac.id.
- BM, D. (1995). Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik). Penerbit Erlangga.
- Bokko, J. (2019). Analisis Kelongsoran Jalan Poros Sangalla-Batualu Dengan Program *Plaxis*. *Journal Dynamic Saint*.
- Collin, A. (1846). Experimental Investigation on Sliding of Clay Slopes.
- Coulomb, C. A. (1776). An attempt to apply the rules of maxima and minima to several problems of stability related to architecture. *Mémoires de l'Académie Royale Des Sciences*.
- Duncan, J. M., Javete, D. F., & Stark, T. D. (1991). The importance of a desiccated crust on clay settlements. *Soils and Foundations*.
- Fitri, S. N., Surjandari, N. S., & As'Ad, S. (2023). A systematic review of *Clay shale* research development for slope construction. *Przegląd Naukowy Inżynieria i i Kształtowanie Środowiska*.

- Forero, S., Marfisi, N., Cantisano, M., Pineda, E., (2014). Regional Sequence Stratigraphy of the Upper Cretaceous La Luna Formation in the Magdalena Valley Basin, Colombia. *researchgate.net*.
- Gautam, T. P., & Shakoor, A. (2013). *Slaking* behavior of clay-bearing rocks during a one-year exposure to natural climatic conditions. *Engineering Geology*.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah I & Mekanika Tanah II*. Jilid.
- Nasional, B. S. (2017). Persyaratan Perancangan Geoteknik, SNI 8460-2017. *Badan Standarisasi Nasional. Jakarta*.
- Nazir, R., Alatas, I. M., Kamaruddin, S. A. (2016). Effect of weathering on disintegration and shear strength reduction of *Clay shale*. *Jurnal Teknologi*.
- Putra, A. P., Septanto, D., & Praja, S. W. (2018). Penanganan Daerah Rawan Longsor Dengan Menggunakan Metode *Shotcrete*. *Jurnal Perkeretaapian Indonesia Volume II Nomor*.
- Putro, M., & Agustina, D. H. (2023). Analisis kestabilan lereng dengan perkuatan *shotcrete* menggunakan *PLAXIS* (Studi kasus: Ruas Jalan Tarempa–Rintis STA 07+800, Kab. Anambas). Sigma Teknika.
- RS Hamidah et al., (2025) Analisis Metode Elemen Hingga Pengaruh Pelapukan *Clay shale* pada Stabilitas Pekerjaan Galian Jalan. *Jurnal Teknik Sipil Terapan*.
- Sabrina, A., Yudhyantoro, Y., & Chairullah, B. (2023). Stabilisasi Tanah *Clay shale* Terhadap Nilai CBR Unsoaked. *Journal of The Civil Engineering Forum*.
- Sadisun, I. A., Bandonno, B., Shimada, H., (2010). Physical disintegration characterization of mudrocks subjected to *slaking* exposure and immersion tests. *Indonesian Journal On Geoscience*.
- Sadisun, I. A., Shimada, H., Ichinose, M., (2002). An experimental study of swelling strain in some argillaceous rocks by means of an improved unconfined swelling test. *Reserch Gate*.
- Sadisun, I. A., Shimada, H., Ichinose, M., (2005). Study on the physical disintegration characteristics of Subang claystone subjected to a modified *slaking* index test. *Geotechnical & Geological Engineering*.

- SANJAYA, E. B. (2021). *Analisis kestabilan lereng pada tambang batubara terbuka (open coal pit mining) lapangan "X" blok barat IUP PT. Alamjaya Bara Pratama Tbk.* repository.unhas.ac.id.
- Situmorang, Y. L. A., Pribadi, A. D., (2022). Analisis Stabilitas Lereng Galian Tanah *Clay shale* Proyek Pembangunan Bendungan Pamakkulu. *Syntax Literate*.
- Skempton, A. W. (1964). Long-term stability of clay slopes. *Geotechnique*.
- Skempton, A. W. (1977). "Slope stability of cutting in Brown London Clay," Special Lecture Volume. *9th ICSMFE*.
- Sumampouw, A. N., Legrans, R. R. I., & Sarajar, A. N. (2024). Stabilisasi Lereng Galian Dengan Perkuatan *Shotcrete* Pada Pengalihan Sungai Araren Di Kabupaten Minahasa Utara. *TEKNO*.
- Waskito, F. Z., Pamungkas, G., Hardiyati, S., & ... (2016). Analisa Stabilitas Lereng *Clay shale* Pada Pekerjaan Pembangunan Jalan Tol Bawen-salatiga Paket 3.1 Sta 22+ 900–Sta 23+ 500. *Jurnal Karya Teknik Sipil*.
- Youn, H., & Tonon, F. (2010). Effect of air-drying duration on the engineering properties of four clay-bearing rocks in Texas. *Engineering Geology*.
- Zhang, X., Lu, Y., Tang, J., Zhou, Z., & Liao, Y. (2017). Experimental study on fracture initiation and propagation in shale using supercritical carbon dioxide fracturing. *Fuel*.