

TUGAS AKHIR
ANALISIS STABILITAS LERENG DENGAN MENGGUNAKAN
PROGRAM SLOPE/W DAN PLAXIS
(Studi Kasus : STA 8+200 Ruas Jalan Bagbagan, Jampangkulon,
Sukabumi)

*Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada Program
Strata (S1) Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sangga Buana YPKP Bandung*

Dosen Pembimbing :

Chandra Afriade Siregar, ST., MT.

NIK. 432.200.167

Disusun Oleh :

GUSNANDI ARAFI AZHAR

NPM. 2112191191



PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SANGGA BUANA
YAYASAN PENDIDIKAN KEUANGAN DAN PERBANKAN (YPKP)
BANDUNG
2023

LEMBAR PENGESAHAN DAN PERSETUJUAN

Judul Tugas Akhir : “Analisis Stabilitas Lereng Dengan Menggunakan Program Slope/W Dan Plaxis (Studi Kasus : Sta 8+200 Ruas Jalan Bagbagan, Jampangkulon, Sukabumi)”

Nama : Gusnandi Arafı Azhar

NPM : 2112191191

Jenis Kelamin : Laki-Laki

Jenjang Program : Sarjana

Program Sudi : Teknik Sipil

Fakultas : Teknik

Perguruan Tinggi : Universitas Sangga Buana YPKP Bandung

Menyetujui & Mengesahkan:
Dosen Pembimbing

Chandra Afriade Siregar, ST., MT
NIK. 432.200.167

Mengetahui :

Ketua Program Studi
Teknik Sipil

Dekan
Fakultas Teknik

Muhammad Syukri, ST., MT.
NIK. 432.200.200

Slamet Risnanto, ST., MT.
NIK. 432.200.125

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini, saya :

Nama : Gusnandi Araf Azhar
NPM : 2112191191
Judul Tugas Akhir : **“Analisis Stabilitas Lereng Dengan Menggunakan Program Slope/W Dan Plaxis (Studi Kasus : STA 8+200 Ruas Jalan Bagbagan, Jampangkulon, Sukabumi)”**

Dengan ini Saya menyatakan bahwa penulisan Tugas Akhir ini hasil analisis saya sendiri dan sepanjang sepengetahuan saya, di dalam karya ini tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang diacu tertulis dengan sumber yang jelas dan disebutkan dalam daftar pustaka. Apabila di kemudian hari ditemukan hal-hal yang melanggar etika dalam penulisan tugas akhir ini, maka saya siap menanggung resiko dan sanksi yang semestinya berlaku.

Bandung, 22 Juli 2023

Yang membuat pernyataan,

Gusnandi Araf Azhar

NPM. 2112191191

LEMBAR HAK CIPTA

ANALISIS STABILITAS LERENG DENGAN MENGGUNAKAN PROGRAM SLOPE/W DAN PLAXIS

(Studi Kasus : STA 8+200 Ruas Jalan Bagbagan, Jampangkulon, Sukabumi)

Oleh :

Gusnandi Arafı Azhar

Sebagai Tugas Akhir yang diajukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (Strata-1) Program Studi Teknik Sipil

© Gusnandi Arafı Azhar

Universitas Sangga Buana – YPKP
Bandung

2023

Hak cipta dilindungi oleh undang undang.

Tugas Akhir ini tidak boleh diperbanyak seluruhnya atau sebagian dengan dicetak ulang, difotokopi, atau cara lainnya tanpa izin dari penulis.

ABSTRAK

Analisis stabilitas lereng adalah suatu studi yang dilakukan untuk mengevaluasi potensi terjadinya longsoran atau kegagalan pada lereng. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan faktor keamanan lereng dengan menggunakan dua metode yang umum digunakan dalam analisis stabilitas lereng, yaitu metode keseimbangan batas (*Limit Equilibrium Method - LEM*) dan metode elemen hingga (*Finite Element Method - FEM*).

Dalam penelitian ini, STA 8+200 Ruas Jalan Bagbagan, Jampangkulon, Sukabumi, dipilih sebagai studi kasus. Data pengujian tanah digunakan sebagai input untuk pemodelan lereng, dengan mempertimbangkan beban jalan yang diberikan. Analisis stabilitas lereng dilakukan menggunakan program Slope/W untuk metode LEM dan program Plaxis untuk metode FEM.

Hasil analisis menunjukkan bahwa faktor keamanan yang diperoleh menggunakan program Plaxis dengan metode FEM adalah 1,388 dengan beban 10 kN/m² dan 1,387 dengan beban 12,5 kN/m², sedangkan menggunakan program Slope/W dengan metode LEM adalah 1,297 dengan beban 10 kN/m² dan 1,295 dengan beban 12,5 kN/m². Meskipun kedua nilai faktor keamanan tersebut kurang dari nilai yang ditetapkan (1,5), namun perbedaannya tidak terlalu signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa kedua metode dapat digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng dengan hasil yang konsisten.

Penelitian ini memberikan pemahaman yang lebih baik tentang stabilitas lereng dan membandingkan kelebihan dan kekurangan antara metode LEM dan FEM dalam analisis stabilitas lereng. Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai panduan untuk perencanaan dan pembangunan infrastruktur jalan di daerah perbukitan dengan lebih aman dan tahan lama, sehingga dapat mengurangi risiko terkait dengan ketidakstabilan lereng.

Kata kunci: Stabilitas Lereng, Limit Equilibrium Method (LEM), Finite Element Method (FEM), Slope/W, Plaxis.

ABSTRACT

Slope stability analysis is a study conducted to evaluate the potential occurrence of landslides or failures on slopes. This research aims to determine the safety factor of slopes using two commonly used methods in slope stability analysis: the Limit Equilibrium Method (LEM) and the Finite Element Method (FEM).

In this study, the STA 8+200 section of Bagbagan Road in Jampangkulon, Sukabumi, was chosen as the case study. Soil test data were used as input for slope modeling, considering the applied road loads. Slope stability analysis was performed using the Slope/W program for the LEM method and the Plaxis program for the FEM method.

The analysis results showed that the safety factors obtained using the Plaxis program with the FEM method were 1.388 for a load of 10 kN/m² and 1.387 for a load of 12.5 kN/m², while using the Slope/W program with the LEM method were 1.297 for a load of 10 kN/m and 1.295 for a load of 12.5 kN/m². Although both safety factor values were slightly lower than the designated value of 1.5, the difference was not significant. This indicates that both methods can be used to analyze slope stability with consistent results.

This research provides a better understanding of slope stability and compares the advantages and disadvantages of the LEM and FEM methods in slope stability analysis. The findings are expected to serve as a guide for safer and more durable road infrastructure planning and development in hilly areas, thereby reducing the risks associated with slope instability.

Keywords: Slope Stability, Limit Equilibrium Method (LEM), Finite Element Method (FEM), Slope/W, Plaxis.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa bahwasanya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**Analisis Stabilitas Lereng dengan Menggunakan Program Slope/W dan Plaxis (Studi Kasus : STA 8+200 Ruas Jalan Bagbagan, Jampangkulon, Sukabumi)**” yang disusun sebagai syarat akademis dalam menyelesaikan program strata satu (S1) Program Studi Teknik Sipil Universitas Sangga Buana YPKP Bandung.

Pada kesempatan ini penulis dengan segala kerendahan hati mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Didin Saepudin, SE., M.Si., selaku Rektor Universitas Sangga Buana YPKP Bandung.
2. Bapak Dr. Teguh Nurhadi Suharsono, ST., M.T, selaku Wakil Rektor I Universitas Sangga Buana YPKP Bandung.
3. Bapak Bambang Susanto, SE., M.Si selaku Wakil Rektor II Universitas Sangga Buana YPKP Bandung.
4. Ibu Nurhaeni Sikki, S.A.P., M.A.P selaku Wakil Rektor III Universitas Sangga Buana YPKP Bandung.
5. Bapak Slamet Risnanto, S.T, M.Kom selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Sangga Buana YPKP Bandung.
6. Bapak Muhammad Syukri, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Sangga Buana YPKP Bandung
7. Bapak Chandra Afriade Siregar, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing dan Dosen Wali.
8. Para Dosen dan Staf Pengajar Program Studi Teknik Sipil Universitas Sangga Buana YPKP Bandung yang telah mengajar, mengarahkan dan membantu penulis selama perkuliahan.
9. Ibu saya tercinta dan juga kakak perempuan saya yang selalu mendukung dan mendoakan, serta memberikan dukungan moril maupun materil.
10. Rekan-rekan seperjuangan Teknik Sipil 19-A

11. Pihak-pihak lain yang telah membantu dalam penulisan laporan yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa di dalam laporan Tugas Akhir ini masih ada banyak kekurangannya, oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan juga saran yang sifatnya membangun untuk karya yang lebih baik lagi kedepannya. Harapannya, skripsi ini akan memberikan manfaat bagi para pembaca.

Bandung, Februari 2023

Gusnandi Arafı Azhar

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL	x
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Lereng.....	4
2.2 Longsor.....	5
2.2.1 Penyebab Terjadinya Longsor	6
2.3 Stabilitas Lereng.....	6
2.3.1 Konsep Kestabilan Lereng.....	8
2.3.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kestabilan Lereng	8
2.3.3 Kuat Geser	9
2.4 Metode Analisis Stabilitas Lereng dengan Analitis	11
2.4.1 Metode Bishop.....	11
2.4.2 Metode Fellenius	13
2.4.3 Metode Janbu.....	14
2.5 Metode Analisis Stabilitas Lereng dengan Grafik	16
2.5.1 Metode Cousin.....	16
2.5.2 Metode Janbu.....	23
2.5.3 Metode Duncan & Buchignani	28
2.6 Sifat Mekanis Tanah yang Digunakan Pada Analisis Plaxis.....	30
2.7 Aplikasi Plaxis.....	33

2.8 Aplikasi SLOPE/W	34
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	36
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	36
3.2 Lokasi Penelitian	37
3.3 Tahapan Penelitian	38
3.4 Persiapan Penelitian	39
3.5 Data Penelitian	40
3.5.1 Data Borlog.....	40
3.5.2 Data Parameter Tanah.....	42
3.6 Metode Analisis Stabilitas Lereng dengan Komputasi	42
3.6.1 Metode Elemen Hingga (<i>Finite Element Method</i>) PLAXIS.....	42
3.6.2 Metode Keseimbangan Batas (<i>Limit Equilibrium Method</i>) SLOPE/W	43
3.7 Parameter Masukan Program Plaxis.....	44
3.8 Paramater Masukan Program SLOPE/W	45
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	46
4.1 Pemodelan Kasus	46
4.2 Analisis Stabilitas Lereng dengan Plaxis (<i>Finite Element Method</i>).....	48
4.2.1 <i>Program Input</i>	48
4.2.2 <i>Program Calculations</i>	55
4.2.3 <i>Program Output</i>	56
4.3 Analisis Stabilitas Lereng dengan SLOPE/W (<i>Limit Equilibrium</i> <i>Method</i>)	57
4.3.1 <i>Input</i>	58
4.3.2 <i>Solving The Problem</i>	62
4.3.3 <i>Result</i>	62
4.4 Hasil Analisa Plaxis dan SLOPE/W	63
BAB V PENUTUP	65
5.1 Kesimpulan.....	65
5.2 Saran	65
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN.....	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Klasifikasi Tipe Longsoran.....	5
Gambar 2.2 Stabilitas Lereng	7
Gambar 2.3 Sistem Gaya Pada Suatu Elemen Menurut Bishop.....	12
Gambar 2.4 Harga m_α Untuk Persamaan Bishop	12
Gambar 2.5 Sistem Gaya Pada Cara Fellenius	13
Gambar 2.6 Sistem Gaya Pada Irisan dengan Metoda Janbu	16
Gambar 2.7 Definisi Dari Tanda-tanda Yang Digunakan Untuk Perhitungan ru	18
Gambar 2.8 Grafik Cousins Untuk Angka Stabilitas dan Perletakan Lingkaran- lingkaran Kritis (lanjutan) – 1	18
Gambar 2.9 Grafik Cousins Untuk Angka Stabilitas dan Perletakan Lingkaran- lingkaran Kritis – 2.....	19
Gambar 2.10 Grafik Cousins Untuk Angka Stabilitas dan Perletakan Lingkaran- lingkaran Kritis (lanjutan) – 3	19
Gambar 2.11 Grafik Cousins Untuk Angka Stabilitas dan Perletakan Lingkaran- lingkaran Kritis (lanjutan) – 4	20
Gambar 2.12 Grafik Cousins Untuk Angka Stabilitas dan Perletakan Lingkaran- lingkaran Kritis (lanjutan) – 5	20
Gambar 2.13 Grafik Cousins Untuk Angka Stabilitas dan Perletakan Lingkaran- lingkaran Kritis (lanjutan) – 6.....	21
Gambar 2.14 Grafik Cousins Untuk Angka Stabilitas dan Perletakan Lingkaran- lingkaran Kritis (lanjutan) – 7	21
Gambar 2.15 Grafik Cousins Untuk Angka Stabilitas dan Perletakan Lingkaran- lingkaran Kritis (lanjutan) – 8.....	22
Gambar 2.16 Lereng Yang Terdiri Atas Empat Lapisan.....	22
Gambar 2.17 Faktor Reduksi Stabilitas $\phi = 0$ dan $\phi > 0$	25
Gambar 2.18 Faktor Reduksi Grafik Stabilitas $\phi = 0$ dan $\phi > 0$	25
Gambar 2.19 Angka Kemantapan dan Koordinat Titik Pusat Bidang Longsor Kritis Untuk Lereng Sederhana.....	26
Gambar 2.20 Grafik Stabilitas Untuk $\phi > 0$	26
Gambar 2.21 Angka Kemantapan Untuk Lereng Tak Terhingga	29

Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	36
Gambar 3.2	Lokasi Penelitian	37
Gambar 3.3	Kondisi Topografi.....	37
Gambar 3.4	Potongan Melintang STA 8+200	38
Gambar 3.5	Data Borlog BH1	40
Gambar 3.6	Data Borlog BH2	41
Gambar 3.7	Data Parameter Tanah.....	42
Gambar 4.1	Titik Uji Bor	46
Gambar 4.2	Penentuan General Model dan Satuan yang Digunakan.....	48
Gambar 4.3	Geometri Lereng	49
Gambar 4.4	Material Sets	49
Gambar 4.5	General Pasir Lepas	50
Gambar 4.6	Parameter Pasir Lepas.....	50
Gambar 4.7	General Pasir Padat.....	51
Gambar 4.8	Parameter Pasir Padat	51
Gambar 4.9	General Pasir Sangat Padat.....	52
Gambar 4.10	Parameter Pasir Sangat Padat	52
Gambar 4.11	Boundary Conditions (Standard Fixities).....	53
Gambar 4.12	Mesh Generation.....	53
Gambar 4.13	Initial Condition.....	54
Gambar 4.14	Input Nilai Beban Jalan Kelas II.....	54
Gambar 4.15	Input Nilai Beban Jalan Kelas I.....	54
Gambar 4.16	Calculation Type, Gravity Loading	55
Gambar 4.17	Calculation Type, Safety	55
Gambar 4.18	Tahap Perhitungan	56
Gambar 4.19	Hasil Calculation	56
Gambar 4.20	Deformasi Pada Saat Initial Phase	56
Gambar 4.21	Bentuk Busur Kelongsoran + Beban Kelas II 10 kN/m ² (SF : 1.388)	57
Gambar 4.22	Bentuk Busur Kelongsoran + Beban Kelas I 12,5 kN/m ² (SF : 1.387)	57
Gambar 4.23	Metode Analisa yang Digunakan.....	58

Gambar 4.24 Tipe Analisis Morgenstern-Price	58
Gambar 4.25 Tipe Slip Surface	59
Gambar 4.26 Geometri Lereng	59
Gambar 4.27 Soil Properties.....	60
Gambar 4.28 Input Beban Perkerasan Kelas II	60
Gambar 4.29 Input Beban Perkerasan Kelas I.....	60
Gambar 4.30 Menggambar Garis Beban Perkerasan Kelas II.....	61
Gambar 4.31 Menggambar Garis Beban Perkerasan Kelas I.....	61
Gambar 4.32 Slip Surface Entry & Exit	61
Gambar 4.33 Jumlah Titik Increment	62
Gambar 4.34 Solving The Problem	62
Gambar 4.35 Result + Beban 10 kN/m ² (SF : 1.297)	63
Gambar 4.36 Result + Beban 12,5 kN/m ² (SF : 1.295)	63

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai Koefisien Permeabilitas Tanah.....	30
Tabel 2.2 Hubungan Angka Poisson dengan Jenis Tanah dan Konsistensi	31
Tabel 2.3 Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas	32
Tabel 2.4 Hubungan Antara Sudut Geser Dalam dengan Jenis Tanah.....	32
Tabel 2.5 Hubungan Atara Angka Pori, Kelembaban dan Berat Volume Tanah Kering.....	33
Tabel 4.1 Stratifikasi Tanah BH1	46
Tabel 4.2 Stratifikasi Tanah BH2.....	47
Tabel 4.3 Tabel Klasifikasi Jalan	48
Tabel 4.4 Hasil Analisis Lereng STA 8+200	64

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permukaan tanah tidak selalu datar atau memiliki perbedaan elevasi antara satu tempat dengan yang lain, sehingga membentuk lereng. Lereng merupakan kondisi topografi yang sering ditemui dalam pekerjaan konstruksi sipil, baik yang terjadi secara alami maupun yang sengaja dibuat oleh manusia untuk tujuan tertentu.

Longsor adalah salah satu bencana alam yang sering terjadi di lereng, baik yang alami maupun buatan. Kejadian longsor terutama meningkat pada musim hujan karena adanya peningkatan tekanan air pori pada lereng. Ini dapat menyebabkan penurunan kuat geser tanah dan sudut geser dalam, yang akhirnya menyebabkan longsor.

Analisis stabilitas lereng memiliki peran penting dalam perencanaan konstruksi sipil. Lereng yang tidak stabil berpotensi berbahaya bagi lingkungan sekitarnya, sehingga analisis stabilitas lereng menjadi sangat penting. Faktor keamanan digunakan untuk mengetahui ukuran stabilitas lereng.

Ruas Jalan Bagbagan di Jampangkulon, Sukabumi memiliki kondisi topografi yang beragam, termasuk dataran tinggi, dataran rendah, perbukitan, dan pegunungan. Daerah dengan topografi perbukitan dan pegunungan rawan terhadap longsor. Pada 28 November 2021, terjadi empat titik longsor di ruas jalan Bagbagan, Jampangkulon, Sukabumi akibat hujan deras yang turun hampir sepanjang hari. Kejadian longsor ini menyebabkan gangguan pada arus lalu lintas di jalan tersebut.

Oleh karena itu, penulis melakukan analisis stabilitas lereng di STA 8+200 Ruas Jalan Bagbagan, Jampangkulon, Kabupaten Sukabumi menggunakan metode keseimbangan batas (limit equilibrium method) dan metode elemen hingga (finite element method). Analisis stabilitas lereng dengan metode ini memerlukan ketelitian dan ketekunan untuk mendapatkan hasil yang akurat, sehingga analisis dilakukan dengan menggunakan program komputer.

Saat ini, telah tersedia berbagai jenis program untuk perhitungan mekanika tanah, sehingga pengguna dapat dengan mudah menganalisis berbagai kondisi tanah dengan cepat. Dalam penelitian ini, program yang digunakan adalah SLOPE/W dan Plaxis 2D..

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Berapa faktor keamanan (SF) lereng pada lokasi longsor tersebut dengan menggunakan program *Slope/W* ?
- Berapa faktor keamanan (SF) lereng pada lokasi longsor tersebut dengan menggunakan program Plaxis ?
- Bagaimana hasil nilai faktor keamanan dengan metode FEM menggunakan program Plaxis dan metode LEM menggunakan program SLOPE/W ?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini tidak terlalu luas tinjauannya dan tidak menyimpang dari rumusan masalah yang ditetapkan, maka perlu adanya pembatasan terhadap masalah yang ditinjau. Batasan-batasan masalah yang diambil dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Data tanah yang digunakan adalah data sekunder dari PT. KARYA UTAMA CITRAMANDIRI yang berlokasi di STA 8+200 Ruas Jalan Bagbagan, Jampangkulon, Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat.
- Lereng digambarkan dengan menggunakan pemodelan dua dimensi menggunakan program *Slope/W* dan Plaxis
- Tidak meninjau dari segi biaya dan waktu
- Tidak memperhitungkan adanya muka air tanah
- Analisis stabilitas dengan menggunakan metode FEM dan LEM
- Perhitungan dilakukan dengan program *Slope/W* dan Plaxis

1.4 Tujuan Penelitian

- Mengetahui nilai faktor keamanan (SF) lereng pada lokasi longsor tersebut dengan program *Slope/W*.

- Mengetahui nilai faktor keamanan (SF) lereng pada lokasi longsor tersebut dengan program Plaxis.
- Mencari perbandingan nilai faktor keamanan dengan metode FEM menggunakan program Plaxis dan metode LEM menggunakan program SLOPE/W?

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini yaitu :

- Menambah pengetahuan tentang stabilitas lereng.
- Mendapatkan gambaran tentang visualisasi kelongsoran lereng dalam bentuk dua dimensi.
- Mengenal dan dapat mengoperasikan program *Slope/W* dan Plaxis
- Menghemat waktu dalam menyelesaikan permasalahan dalam bidang geoteknik dengan memanfaatkan program.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam laporan ini dapat diuraikan sebagai berikut :

- BAB I PENDAHULUAN, dalam bab ini terdiri atas latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian serta sistematika penulisan.
- BAB II TINJAUAN PUSTAKA, dalam bab ini terdiri atas definisi lereng, stabilitas lereng, longsor, kuat geser, konsep kestabilan lereng dari berbagai metode, penyelidikan tanah, dan kriteria faktor keamanan.
- BAB III METODOLOGI PENELITIAN, dalam bab ini membahas uraian mengenai data yang akan digunakan serta menjelaskan juga metode dan program yang akan digunakan untuk analisis stabilitas lereng.
- BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN, dalam bab ini membahas dan menganalisa hasil dari perhitungan stabilitas lereng dengan program dan metode yang digunakan.
- BAB V PENUTUP, dalam bab ini berisi kesimpulan dan saran dari laporan ini

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lereng

Lereng adalah suatu permukaan tanah yang miring dan membentuk sudut tertentu terhadap suatu bidang horizontal. Pada tempat dimana terdapat dua permukaan tanah yang berbeda ketinggian, maka akan ada gaya-gaya yang bekerja mendorong sehingga tanah yang lebih tinggi kedudukannya cenderung bergerak ke arah bawah yang disebut dengan gaya potensial gravitasi yang menyebabkan terjadinya longsor. (Suwarsa Putra et al., 2010).

Wesley (2010) membagi lereng menjadi 3 macam ditinjau dari segi terbentuknya yaitu :

- a. Lereng alam, yaitu lereng yang terbentuk akibat kegiatan alam, seperti erosi, gerakan tektonik dan sebagainya.
- b. Lereng yang dibuat manusia, akibat penggalian atau pemotongan pada tanah asli.
- c. Lereng timbunan tanah, seperti urugan untuk jalan raya.

Pada ketiga jenis lereng ini kemungkinan untuk terjadi longsor selalu ada, karena dalam setiap kasus tanah yang tidak rata akan menyebabkan komponen gravitasi dari berat memiliki kecenderungan untuk menggerakkan massa tanah dari elevasi lebih tinggi ke elevasi yang lebih rendah.

Pada tempat dimana terdapat dua permukaan tanah yang berbeda ketinggiannya, maka akan ada gaya-gaya yang bekerja mendorong sehingga tanah yang lebih tinggi kedudukannya cenderung bergerak ke arah bawah. Disamping gaya yang mendorong ke bawah terdapat pula gaya-gaya dalam tanah yang bekerja menahan/melawan sehingga kedudukan tanah tersebut tetap stabil. Gaya-gaya pendorong berupa gaya berat, gaya tiris/muatan dan gaya-gaya inilah yang menyebabkan kelongsoran. Gaya-gaya penahan berupa gaya gesekan/geseran, lekatan (dari kohesi), kekuatan geser tanah. Jika gaya-gaya pendorong lebih besar dari gaya-gaya penahan, maka tanah akan mulai runtuh dan akhirnya terjadi keruntuhan tanah sepanjang bidang yang menerus dan massa tanah diatas bidang

yang menerus ini akan longsor. Peristiwa ini disebut sebagai keruntuhan lereng dan bidang yang menerus ini disebut bidang gelincir. (Turangan & Sompie, 2014).

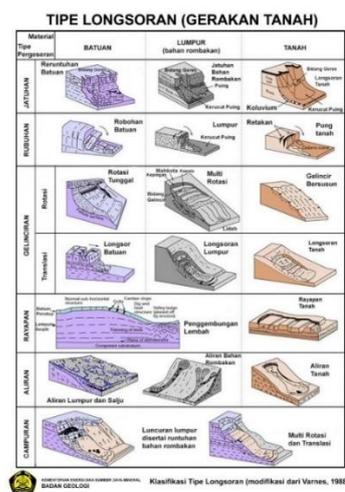
Disetiap macam lereng, kemungkinan terjadi longsor selalu ada. Longsor terjadi akibat gaya dorong (driving force) melampaui gaya berlawanan yang berasal dari kekuatan geser tanah sepanjang bidang longsor. (Das, 1995). Secara teknik dapat dikatakan bahwa longsor terjadi apabila faktor keamanan tidak memenuhi ($F_k < 1,5$).

2.2 Longsor

Tanah longsor (landslides) merupakan perpindahan beberapa massa berbentuk tanah, batuan ataupun bahan rombakan, material penyusun lereng, yang merupakan kombinasi tanah serta batuan, secara gravitasional mengarah bagian dasar suatu lereng (Cruden, 1991). Faktor penyebab longsor :

- Peningkatan kandungan air.
- Getaran yang terjadi umumnya disebabkan oleh gempa bumi, ledakan, penggalian, getaran mesin, serta getaran lalu lintas kendaraan.
- Peningkatan beban yang melampaui daya dukung tanah atau kuat geser tanah.

Klasifikasi tanah longsor dapat dibedakan menjadi enam jenis, yaitu runtuh (fall), robohan (topple), pencaran lateral (lateralispread), longsor (slides), aliran (flow) dan gabungan, (Novotný, 2013).



Gambar 2.1 Klasifikasi Tipe Longsor

2.2.1 Penyebab Terjadinya Longsor

Banyak faktor yang mempengaruhi stabilitas lereng seperti geologi dan hidrologi, topografi, iklim perubahan cuaca. Namun selain itu, kelongsoran juga terjadi akibat (Hardiyatmo, 2010):

- Penambahan beban pada lereng. Tambahan beban pada lereng berupa bangunan baru, tambahan beban pada lereng oleh air yang masuk kedalam pori-pori tanah maupun yang menggenang dipermukaan lereng.
- Penggalan atau pemotongan tanah pada kaki lereng
- Perubahan posisi muka air secara cepat (rapid drawdown) pada bendungan, sungai, dan lain-lain.
- Getaran atau gempa bumi
- Jenis tanah
- Kondisi geometrik lereng

2.3 Stabilitas Lereng

Stabilitas lereng adalah salah satu permasalahan yang sering terjadi dalam pekerjaan konstruksi penambangan, pembuatan jalan dan lain-lain. Kestabilan lereng yang terganggu dapat mengakibatkan kerusakan lingkungan, kerusakan alat konstruksi, mengancam keselamatan pekerja mengurangi intensitas produksi dan mengganggu kelancaran pelaksanaan penambangan (Almenara, 2007). Untuk mencegah terjadinya keruntuhan lereng, perlu dilakukan analisis kestabilan lereng. Salah satu cara untuk menilai kestabilan lereng adalah dengan mencari nilai faktor keamanan (Safety Factor). Faktor keamanan adalah perbandingan antara gaya penahan dengan gaya pendorong pada lereng.

Gaya penahan merupakan kekuatan pada material yang menghambat terjadinya longsor atau keruntuhan lereng. Gaya penahan ini terkait dengan karakteristik fisik dari batuan atau tanah, seperti kohesi (kekuatan ikatan antarpartikel) dan koefisien gesek (perlawanan terhadap pergerakan relatif antarpartikel). Semakin tinggi nilai kohesi dan koefisien gesek, semakin tinggi pula gaya penahan yang dimiliki oleh material tersebut.

Di sisi lain, gaya pendorong yang paling signifikan adalah gaya gravitasi, yaitu gaya yang bekerja searah dengan lereng dan mengarah keluar dari lereng.

Gaya gravitasi ini menjadi salah satu faktor pendorong yang berpotensi menyebabkan keruntuhan lereng jika melebihi gaya penahan yang ada.

Dalam analisis kestabilan lereng, tujuan utamanya adalah untuk memastikan bahwa faktor keamanan (Safety Factor) memenuhi syarat. Umumnya, nilai faktor keamanan yang diinginkan adalah lebih besar dari 1. Jika faktor keamanan kurang dari 1, itu menunjukkan bahwa lereng tidak stabil dan berpotensi mengalami keruntuhan. Dimana :

$$F = \frac{\text{Momen Penahan}}{\text{Momen Pendorong}} = \frac{R_c \cdot L_{AC}}{W \cdot y}$$

F = Faktor Keamanan

W = Berat tanah yang akan longsor (kN)

LAC = Panjang Lengkungan (m)

c = Kohesi (kN/m²)

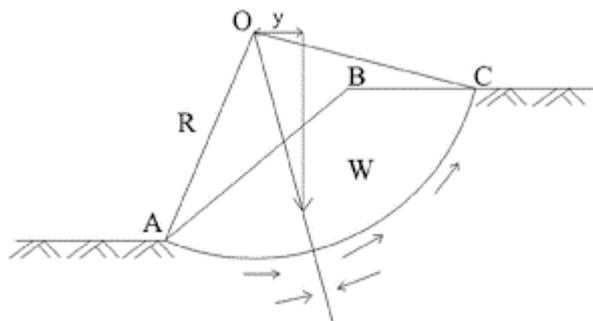
R = Jari-jari bidang longsor yang ditinjau (m)

y = Jarak pusat berat W terhadap O (m)

Adapun angka keamanan untuk stabilitas lereng:

- $F < 1,5$, lereng tidak stabil
- $F = 1,5$, lereng dalam keadaan kritis. Artinya dengan sedikit tambahan momen penggerak maka lereng menjadi tidak stabil.
- $F > 1,5$, lereng stabil.

Angka keamanan lereng dapat diperoleh dengan melakukan “Trial Error” terhadap beberapa bidang longsor yang umumnya berupa busur lingkaran dan kemudian diambil nilai F minimum sebagai indikasi bidang longsor kritis.



Gambar 2.2 Stabilitas Lereng

2.3.1 Konsep Kestabilan Lereng

Gerakan ini dapat melibatkan massa tanah, massa batuan, atau campuran keduanya. Jika gerakan tanah didominasi oleh massa tanah dan terjadi melalui suatu bidang pada lereng, baik itu bidang miring atau bidang lengkung, maka disebut sebagai longsor tanah.

Analisis stabilitas lereng melibatkan konsep kemantapan lereng, yang merupakan penerapan pengetahuan tentang kekuatan geser tanah. Keruntuhan geser pada tanah terjadi karena adanya gerakan relatif antara butir-butir tanah. Oleh karena itu, kekuatan geser tanah tergantung pada gaya-gaya yang bekerja antar butir tanah tersebut.

Dalam analisis stabilitas lereng, digunakan prinsip-prinsip mekanika tanah untuk mengkaji gaya-gaya yang bekerja pada lereng dan membandingkannya dengan kekuatan geser tanah. Hal ini dilakukan untuk menentukan faktor keamanan lereng, yaitu rasio antara gaya penahan dan gaya pendorong. Jika faktor keamanan lebih besar dari 1, berarti lereng dianggap stabil. Namun, jika faktor keamanan kurang dari 1, lereng berpotensi mengalami keruntuhan. sehingga dapat disimpulkan bahwa kekuatan geser terdiri atas:

- Bagian yang bersifat kohesif, tergantung pada macam tanah dan ikatan butirnya.
- Bagian yang bersifat gesekan, yang sebanding dengan tegangan efektif yang bekerja pada bidang geser. (Das, 1995).

2.3.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kestabilan Lereng

Keruntuhan pada lereng alami atau buatan dapat disebabkan oleh beberapa faktor yang menyebabkan perubahan kondisi lereng. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi stabilitas lereng meliputi:

1. Topografi: Perubahan topografi yang signifikan, seperti pemotongan atau pengurangan tanah pada lereng, dapat mengubah distribusi beban dan mengurangi kestabilan lereng.
2. Aktivitas seismik: Gempa bumi atau aktivitas seismik lainnya dapat menyebabkan getaran pada lereng, yang dapat mengurangi kekuatan geser dan menyebabkan keruntuhan.

3. Air tanah: Perubahan dalam aliran air tanah, seperti rembesan air atau infiltrasi hujan yang berlebihan, dapat menyebabkan peningkatan tekanan air pori dalam tanah. Tekanan air pori yang tinggi dapat mengurangi gesekan antara butir-butir tanah dan mengurangi kekuatan geser, yang pada gilirannya dapat menyebabkan keruntuhan.
4. Kehilangan kekuatan: Faktor-faktor seperti perubahan komposisi tanah, pengeringan, pembusukan, atau reaksi kimia tertentu dapat menyebabkan kehilangan kekuatan dan kestabilan lereng.
5. Perubahan tegangan: Perubahan dalam tegangan yang bekerja pada lereng, misalnya akibat perubahan beban yang diterapkan pada lereng atau pemindahan tanah di sekitar lereng, dapat menyebabkan ketidakseimbangan tegangan dan menyebabkan keruntuhan.
6. Musim/Iklim/Cuaca: Variasi iklim dan cuaca, seperti curah hujan yang tinggi atau pembekuan dan pencairan tanah, dapat mempengaruhi kelembaban tanah dan menyebabkan perubahan dalam kekuatan dan stabilitas lereng.

Semua faktor ini saling berinteraksi dan dapat menyebabkan penurunan faktor keamanan lereng. Oleh karena itu, analisis stabilitas lereng yang komprehensif perlu dilakukan untuk mengidentifikasi potensi risiko keruntuhan dan mengambil langkah-langkah pencegahan yang sesuai untuk menjaga kestabilan lereng.

Faktor-faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng dapat menghasilkan tegangan geser pada seluruh massa tanah, dan suatu gerakan akan terjadi kecuali tahanan geser pada setiap permukaan runtuh yang mungkin terjadi lebih besar dari tegangan geser yang bekerja. (Bowles, 1991)

2.3.3 Kuat Geser

kekuatan geser pada suatu lereng terdiri dari dua komponen utama: kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Kedua komponen ini mempengaruhi kemampuan material tanah atau batuan untuk menahan gaya-gaya pendorong dan mempertahankan stabilitas lereng.

1. Kohesi (c): Kohesi adalah kemampuan material tanah atau batuan untuk menahan gaya geser bahkan ketika tidak ada tegangan efektif yang bekerja

pada bidang geser. Kohesi tergantung pada jenis tanah atau batuan dan ikatan butirannya. Semakin tinggi nilai kohesi, semakin tinggi kekuatan geser tanah atau batuan.

2. Sudut geser dalam (Φ): Sudut geser dalam adalah sudut antara bidang geser dan bidang normal pada saat terjadi keruntuhan atau pergerakan tanah. Sudut geser dalam menunjukkan kemampuan material untuk menahan gaya geser. Semakin tinggi sudut geser dalam, semakin tinggi kekuatan geser tanah atau batuan.

Kedua komponen ini secara kombinasi menentukan kekuatan geser efektif (tanpa mempertimbangkan tekanan air pori) dari material tanah atau batuan. Dalam analisis stabilitas lereng jangka panjang, digunakan nilai kuat geser efektif maksimum (c' , Φ') untuk mewakili kemampuan material dalam menahan gaya geser.

Namun, pada lereng yang sudah mengalami gerakan atau material dengan diskontinuitas tinggi, digunakan nilai kuat geser sisa ($C_r = 0$, Φ') yang mengasumsikan bahwa kohesi tidak berkontribusi setelah terjadinya gerakan. Untuk analisis balik pada lereng yang telah mengalami longsor, digunakan nilai rata-rata kuat geser sisa untuk memperkirakan kekuatan geser yang tersisa pada lereng.

Kombinasi kohesi dan sudut geser dalam ini menjadi faktor penentu dalam analisis stabilitas lereng dan membantu dalam mengevaluasi faktor keamanan lereng terhadap kemungkinan keruntuhan.

Kekuatan geser tanah dapat dinyatakan dalam rumus:

$$S = C' + (\tau - \mu) \tan \Phi'$$

Dimana :

S = kekuatan geser

τ = tegangan total pada bidang geser

μ = tekanan air pori

C' = kohesi efektif

Φ' = sudut geser dalam efektif

2.4 Metode Analisis Stabilitas Lereng dengan Analitis

2.4.1 Metode Bishop

Cara analisis yang dibuat oleh A.W. Bishop (1955) menggunakan cara elemen dimana gaya yang bekerja pada tiap elemen. Persyaratan keseimbangan diterapkan pada elemen yang membentuk lereng tersebut. Faktor keamanan terhadap longsoran didefinisikan sebagai perbandingan kekuatan geser maksimum yang dimiliki tanah di bidang longsoran ($S_{tersedia}$) dengan tahanan geser yang diperlukan untuk keseimbangan (S_{perlu})

$$FK = \frac{S_{tersedia}}{S_{perlu}}$$

Bila kekuatan geser tanah adalah :

$$S_{tersedia} = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi' = c' + \sigma \tan \phi'$$

Maka tahanan geser yang diperlukan untuk keseimbangan adalah :

$$S_{perlu} = \left[\frac{1}{FK(c)'} + (\sigma - \mu) \tan \phi' \right]$$

Faktor keamanan dihitung berdasar rumus :

$$FK = \left(\frac{\sum \frac{1}{m(c' + (W - \mu) \tan \phi')}}}{W \sin \alpha} \right)$$

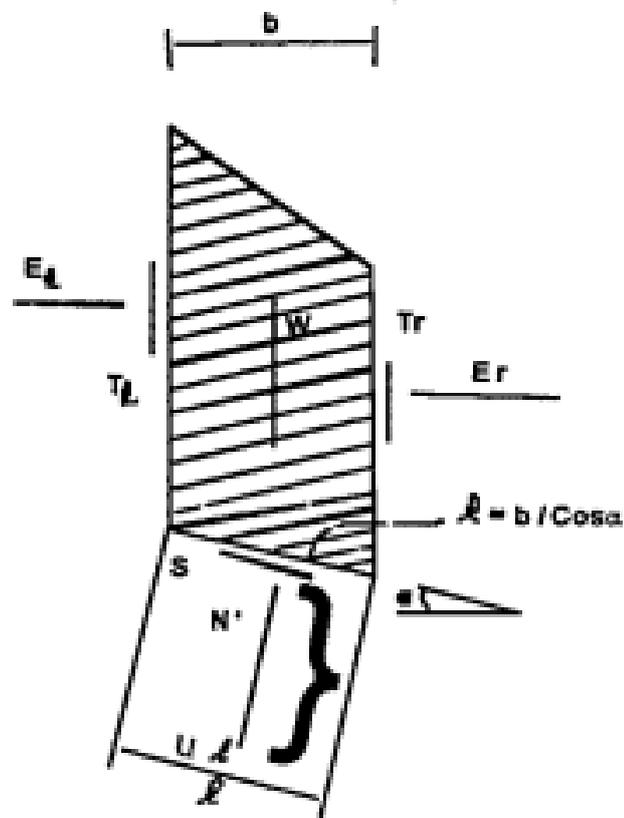
Harga m dapat ditentukan dari Gambar 2.4. Metode Bishop menggunakan pendekatan trial and error dalam penyelesaian untuk mencari faktor keamanan yang tepat. Gambar 2.3 yang disebutkan dapat digunakan sebagai panduan untuk mempercepat perhitungan faktor keamanan.

Namun, perlu diingat bahwa dalam beberapa kasus, terutama ketika sudut negatif pada lereng paling bawah mendekati 30° , metode Bishop dapat menghasilkan faktor keamanan yang terlalu besar dan tidak sesuai dengan kondisi sebenarnya. Hal ini terjadi ketika lingkaran longsor sangat dalam atau pusat rotasi yang diandalkan berada dekat puncak lereng.

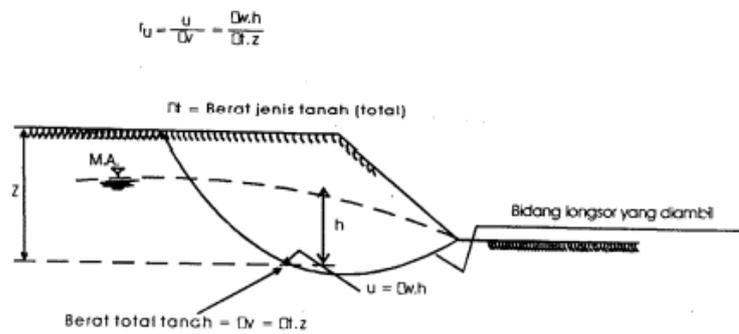
Perbedaan antara faktor keamanan yang diperoleh menggunakan metode Bishop dan metode Fellenius dapat terjadi karena perbedaan dalam pendekatan dan asumsi yang digunakan dalam kedua metode tersebut.

Penting untuk memahami batasan dan asumsi yang terkait dengan metode yang digunakan dalam analisis stabilitas lereng. Dalam kasus-kasus tertentu, perlu

dilakukan analisis tambahan atau menggunakan metode yang lebih sesuai untuk memperoleh hasil yang lebih akurat dan representatif dari faktor keamanan.



Gambar 2.3 Sistem Gaya Pada Suatu Elemen Menurut Bishop



Gambar 2.4 Harga m_α Untuk Persamaan Bishop

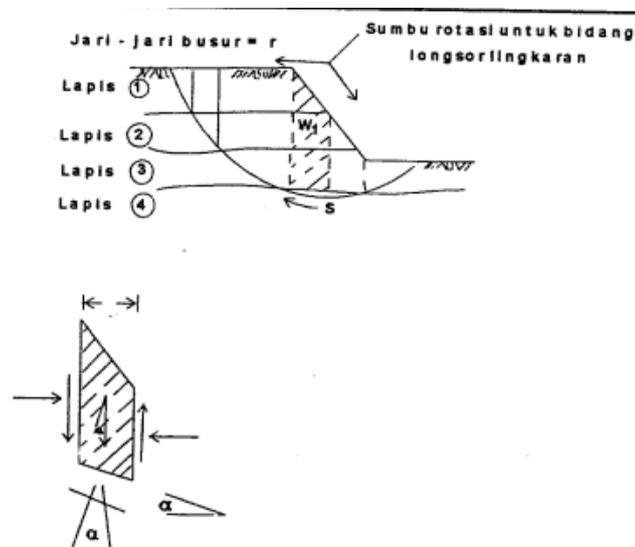
2.4.2 Metode Fellenius

Metode Fellenius digunakan dalam analisis stabilitas lereng dengan mempertimbangkan kondisi isotropis, non-isotropis, dan lapisan-lapisan tanah. Metode ini membagi massa tanah yang bergerak menjadi beberapa elemen vertikal. Lebar elemen tidak harus sama dan dapat diatur sedemikian rupa sehingga lengkung busur di dasar elemen dapat dianggap sebagai garis lurus.

Metode Fellenius menggunakan pendekatan analitis untuk menentukan faktor keamanan dengan mempertimbangkan tegangan geser dan kekuatan geser tanah di dalam elemen-elemen vertikal. Metode ini dapat memberikan estimasi faktor keamanan yang akurat dengan memperhitungkan karakteristik tanah secara lebih detail, termasuk kekakuan tanah dan kondisi lapisan-lapisan yang berbeda.

Namun, penting untuk mencatat bahwa metode ini juga memiliki batasan dan asumsi tertentu, seperti asumsi keadaan tegangan yang seimbang dan sifat tanah yang homogen di dalam elemen-elemen vertikal. Dalam beberapa kasus, analisis yang lebih kompleks atau penggunaan metode numerik seperti metode elemen hingga dapat diperlukan untuk memperoleh hasil yang lebih akurat.

Pilihan metode analisis stabilitas lereng tergantung pada karakteristik lereng, data yang tersedia, dan tujuan analisis.



Gambar 2.5 Sistem Gaya Pada Cara Fellenius

Berat “total” tanah / batuan pada suatu elemen (W_1) termasuk beban luar yang bekerja pada permukaan lereng (Gambar 2.5). W_1 diuraikan dalam

komponen tegak lurus dan tangensial pada dasar elemen. Dengan cara ini, pengaruh gaya T dan E yang bekerja di samping elemen diabaikan. Faktor keamanan adalah perbandingan momen penahan longsor dengan penyebab longsor. Momen tahanan geser pada bidang longsor adalah :

$$M_{penahan} = R \cdot r$$

dimana R adalah gaya geser dan r adalah jari-jari bidang longsor.

Tahanan geser pada dasar tiap elemen adalah :

$$R = S \cdot 1 = 1 (c' + \sigma \tan \phi') ; \sigma = \frac{W_1 \cos \alpha}{1}$$

Momen penahan yang ada sebesar :

$$M_{penahan} = r (c' 1 + W_1 \cos \alpha \tan \phi')$$

Komponen tangensial W_1 bekerja sebagai penyebab longsor menimbulkan momen penyebab :

$$M_{penyebab} = (W_1 \sin \alpha) \cdot r$$

Faktor keamanan dari lereng menjadi :

$$FK = \frac{\Sigma(c' 1 + W_1 \cos \alpha \tan \phi')}{\Sigma W_1 \sin \alpha}$$

Jika lereng terendam air atau jika muka air tanah di atas kaki lereng, maka tekanan air pori akan bekerja pada dasar elemen yang ada dibawah air tersebut. Dalam hal ini tahanan geser harus diperhitungkan yang efektif sedangkan gaya penyebabnya tetap diperhitungkan secara total, sehingga rumusnya menjadi :

$$FK = \left(\frac{\Sigma [(c' 1 + (W_1 \cos \alpha - \mu) \tan \phi')]}{\Sigma W_1 \sin \alpha} \right)$$

μ = tekanan air pori didasar bidang longsor

2.4.3 Metode Janbu

Metode analisis stabilitas lereng yang dikembangkan oleh Janbu pada tahun 1954 memungkinkan perhitungan faktor keamanan (F) yang terkait dengan gaya-gaya yang bekerja pada bidang longsor. Metode ini dapat diterapkan untuk berbagai bentuk bidang longsor.

Dalam metode Janbu, beberapa besaran yang dicari antara lain:

1. Faktor keamanan (F): Faktor keamanan menggambarkan perbandingan antara momen penahan (T) dengan momen yang menyebabkan longsor (N, E, dan S). Faktor keamanan yang lebih

besar dari 1 menunjukkan bahwa lereng dalam kondisi stabil, sedangkan faktor keamanan yang lebih kecil dari 1 menunjukkan adanya potensi longsor.

2. Gaya T (momen penahan): Gaya T merupakan momen yang dihasilkan oleh tahanan geser pada bidang longsor. Gaya ini dapat dihitung berdasarkan kekuatan geser tanah atau batuan dan luas permukaan bidang longsor.
3. Gaya N (gaya normal): Gaya N merupakan gaya normal yang bekerja pada bidang longsor. Gaya ini tergantung pada berat total tanah atau batuan yang ada di atas bidang longsor.
4. Gaya E (gaya eksternal): Gaya E meliputi beban eksternal yang bekerja pada permukaan lereng, seperti beban struktur atau beban lainnya.
5. Gaya S (gaya seismik): Gaya S adalah gaya yang terkait dengan aktivitas seismik atau gempa bumi yang dapat mempengaruhi stabilitas lereng.

Dalam metode Janbu, dilakukan perhitungan dan analisis terhadap gaya-gaya tersebut untuk memperoleh faktor keamanan (F) yang mencerminkan kondisi stabilitas lereng. Metode ini membantu dalam memahami tingkat kestabilan lereng dan dapat digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas serta membantu dalam pengambilan keputusan terkait rekayasa geoteknik dan mitigasi risiko longsor.

Berdasarkan keseimbangan gaya vertical:

$$N \cos \theta = W + \Delta S - T \sin \theta$$

$$N = (W + \Delta S) \sec \theta - T \tan \theta$$

Jumlah gaya-gaya tegak lurus maupun tangensial terhadap bidang dasar irisan adalah nol. Sehingga persamaannya adalah:

$$S = y \frac{dE}{dx} - \frac{d}{dx} (Ey_t) \quad (1)$$

$$\Delta N = (\Delta W - \Delta S) \cos \theta + \Delta E \sin \theta \quad (2)$$

$$\Delta T = (\Delta W + \Delta S) \sin \theta - \Delta E \cos \theta \quad (3)$$

Kriteria longsor MOHR – COULOMB adalah:

$$\Delta T = \frac{C \Delta x \sec \theta + \Delta N (\tan \theta)}{F} \quad (4)$$

Dengan menggabungkan persamaan (2), (3), (4) dan memisalkan $x = 0$,

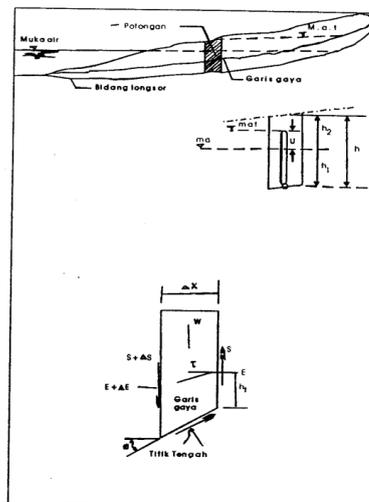
$$\frac{dE}{dx} \left(1 + \frac{\tan \phi}{F} \frac{dy}{dx} \right) + \frac{dS}{dx} \left(\frac{\tan \phi}{F} - \frac{dy}{dx} \right) = - \frac{c}{F} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] + \frac{dW}{dx} \left(\frac{\tan \phi}{F} - \frac{dy}{dx} \right) \quad (14)$$

Persamaan (1) dan (4) merupakan dua persamaan diferensial, yang digunakan untuk menentukan E , S , y_t . Untuk melengkapi sistem persamaan tersebut, dimisalkan:

$$S = \lambda f(x) E$$

Dimana $f(x)$ adalah suatu fungsi dari x , dan $\lambda =$ konstanta.

λ dan f dapat dipecahkan dengan persamaan (1) dan (4). $f(x)$ dimisalkan linier dengan menentukan suatu angka tertentu dapat ditentukan harga λ yang memenuhi persamaan-persamaan tersebut.



Gambar 2.6 Sistem Gaya Pada Irisan dengan Metoda Janbu

2.5 Metode Analisis Stabilitas Lereng dengan Grafik

2.5.1 Metode Cousin

Dalam evaluasi stabilitas jangka panjang suatu lereng, penting untuk memperhitungkan tegangan efektif dan tegangan air pori yang bekerja pada bidang longsor. Pengaruh tegangan air pori dapat diungkapkan melalui

perbandingan tekanan pori (r_u), yang merupakan perbandingan antara tekanan air pori dan beban tanah total pada kedalaman tertentu dalam massa tanah.

Grafik yang dibuat oleh Cousins pada tahun 1978 sering digunakan dalam praktik untuk memperhitungkan pengaruh air pori pada stabilitas lereng. Grafik tersebut didasarkan pada metode lingkaran geser (*friction circle method*), yang juga digunakan dalam grafik Taylor.

Grafik Cousins (Gambar 2.7 hingga 2.15) memungkinkan kita untuk memperkirakan faktor keamanan (F) berdasarkan tegangan efektif dan tekanan pori. Dalam analisis lingkaran geser, digunakan konsep lingkaran geser untuk menentukan faktor keamanan. Lingkaran geser direpresentasikan oleh hubungan antara tegangan normal (σ) dan tegangan geser (τ) pada bidang longsor. Grafik Cousins membantu dalam menentukan posisi lingkaran geser dan memperkirakan faktor keamanan dengan mempertimbangkan kondisi tegangan efektif dan tekanan pori.

Dengan menggunakan grafik Cousins, kita dapat memperoleh informasi yang penting mengenai stabilitas lereng berdasarkan kondisi tegangan tanah dan tekanan pori

Angka kestabilan Cousins didefinisikan sebagai:

$$N = \frac{H_{ada}(FK)}{c'} \quad (1)$$

Cousins juga menggunakan parameter $c\phi$ pada kelompok tanda yang berhubungan dengan sifat tanah dan tinggi lereng, dimana:

$$c\phi = \frac{H_{ada}\phi'}{c'} \quad (2)$$

faktor keamanan D diperlihatkan pada grafik-grafik dan dapat digunakan untuk mempelajari longsor dengan bidang longsor dalam (*base failure*)

$$D = \frac{V}{H}$$

Dimana:

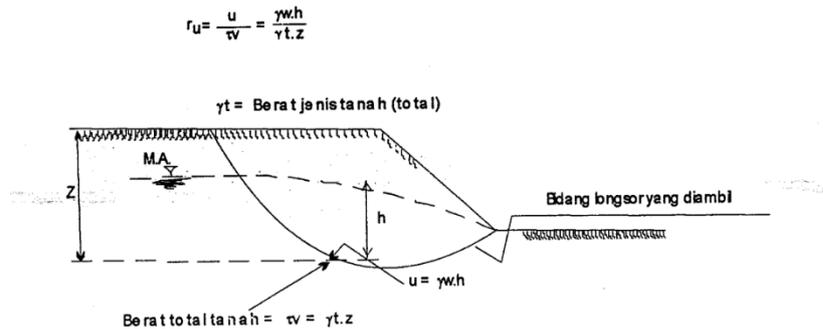
V = Jarak vertical dari atas lereng ke titik terbawah pada bidang longsor

H = tinggi lereng

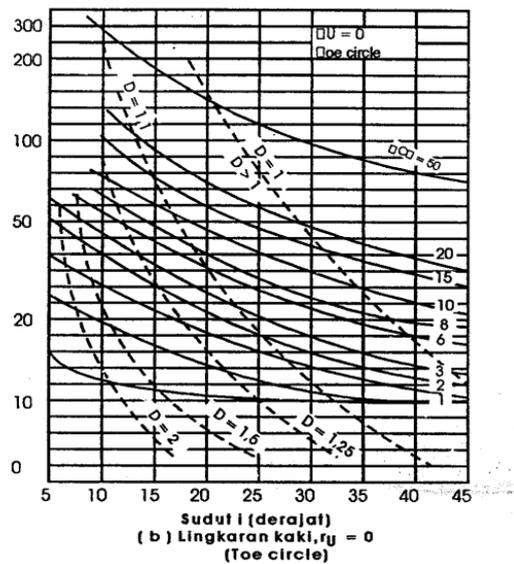
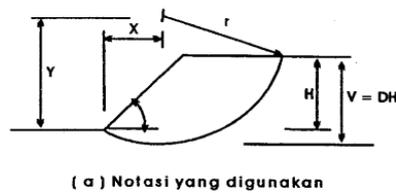
Bila lereng terkena pengaruh aliran air (*seepage*), tekanan air pori atau nilai perbandingan tekanan air pori akan berubah besarnya sepanjang bidang

longsor tersebut. Harga rata-rata yang menguntungkan untuk r_u harus digunakan jika grafik-grafik dipakai. Nilai r_u rata-rata ditetapkan untuk digunakan dalam perhitungan berdasarkan Gambar 2.7.

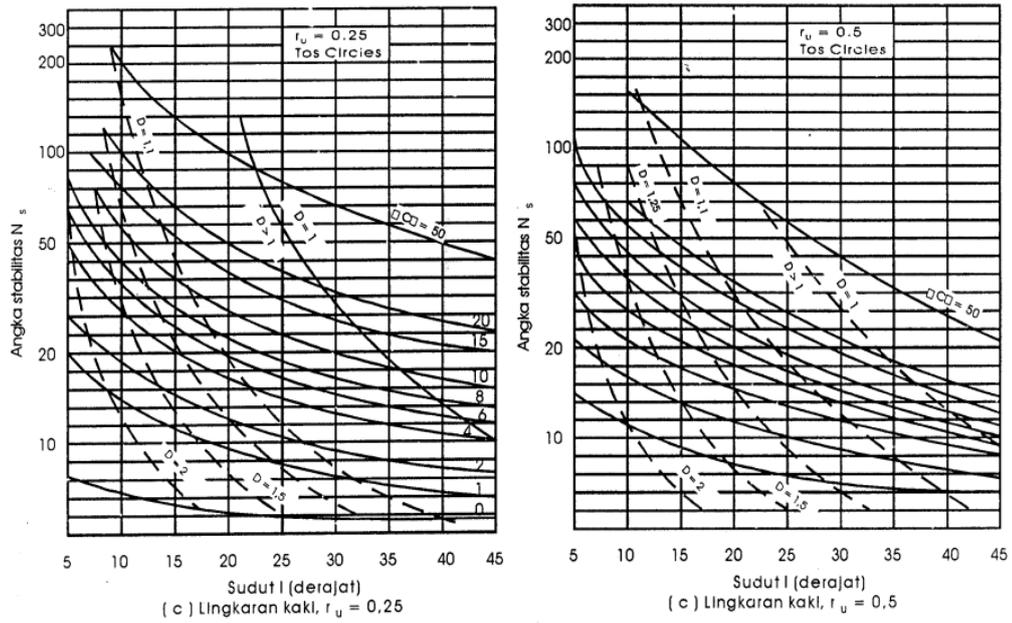
Menggunakan nilai r_u D dan c dapat diketahui dengan mencari X dan Y dari r_1 r_u (X/H) tan l dan (Y/H) tan l yang dapat dilihat pada Gambar 2.11 s/d 2.15



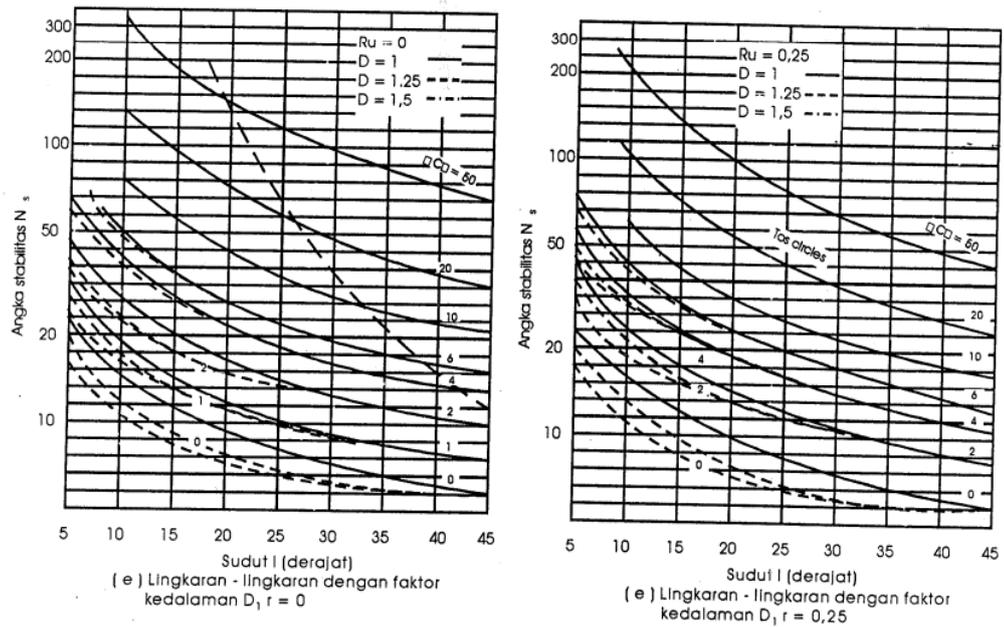
Gambar 2.7 Definisi Dari Tanda-tanda Yang Digunakan Untuk Perhitungan r_u



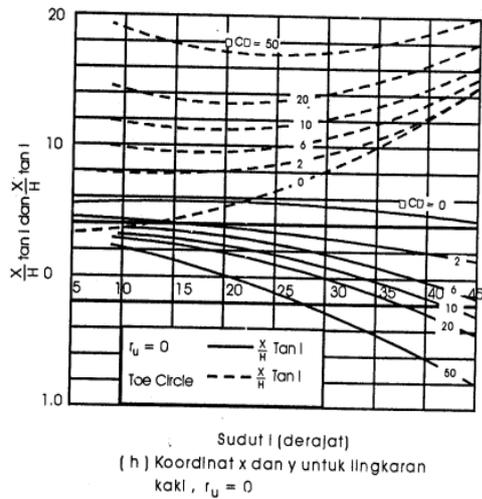
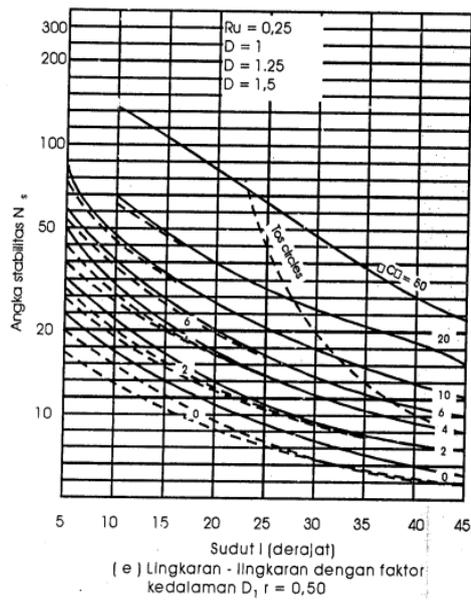
Gambar 2.8 Grafik Cousins Untuk Angka Stabilitas dan Perletakan Lingkaran-lingkaran Kritis (lanjutan) – 1



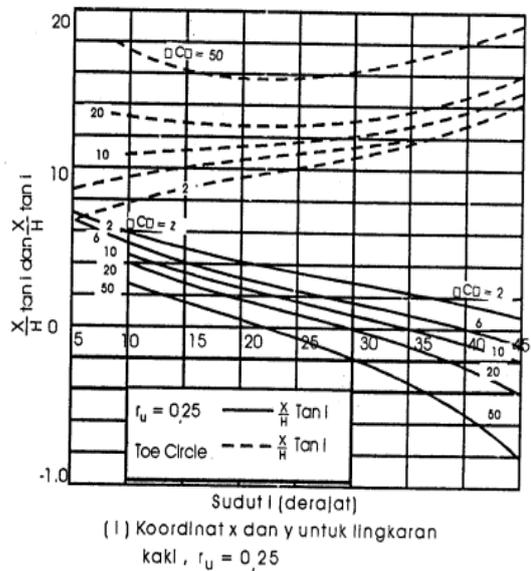
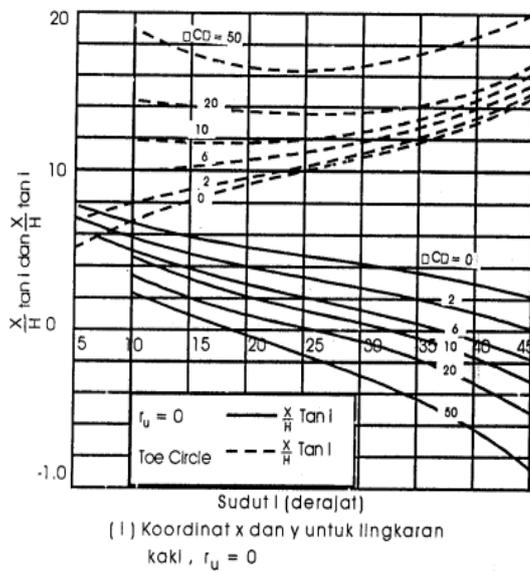
Gambar 2.9 Grafik Cousins Untuk Angka Stabilitas dan Perletakan Lingkaran-lingkaran Kritis – 2



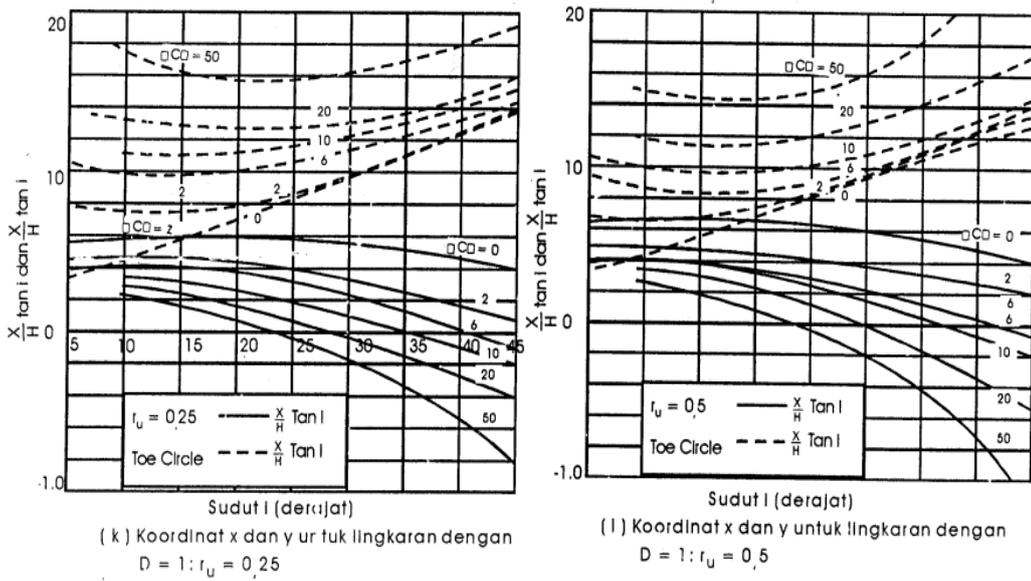
Gambar 2.10 Grafik Cousins Untuk Angka Stabilitas dan Perletakan Lingkaran-lingkaran Kritis (lanjutan) – 3



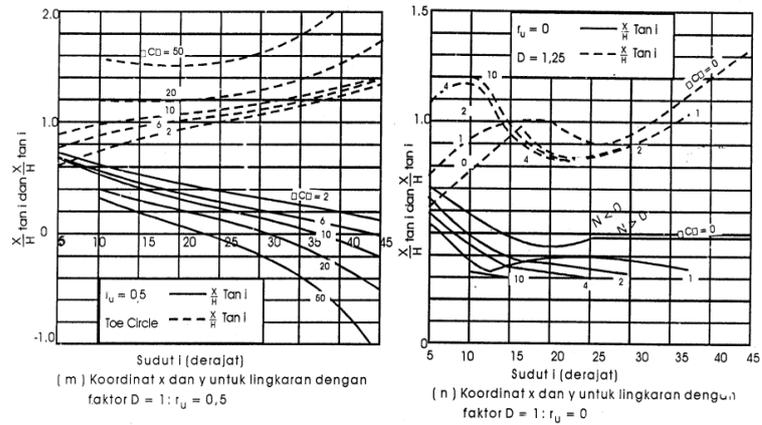
Gambar 2.11 Grafik Cousins Untuk Angka Stabilitas dan Perletakan Lingkaran-lingkaran Kritis (lanjutan) – 4



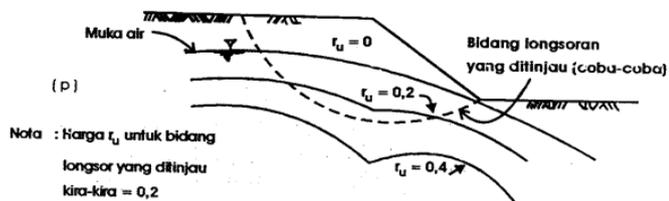
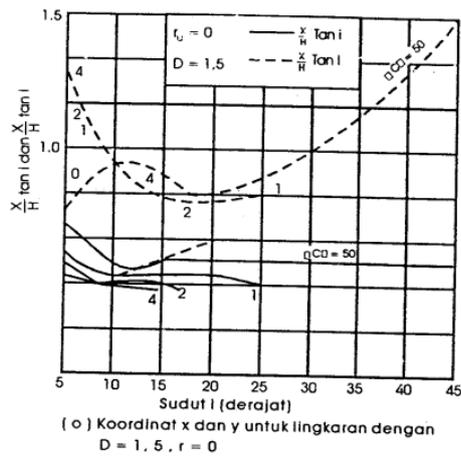
Gambar 2.12 Grafik Cousins Untuk Angka Stabilitas dan Perletakan Lingkaran-lingkaran Kritis (lanjutan) – 5



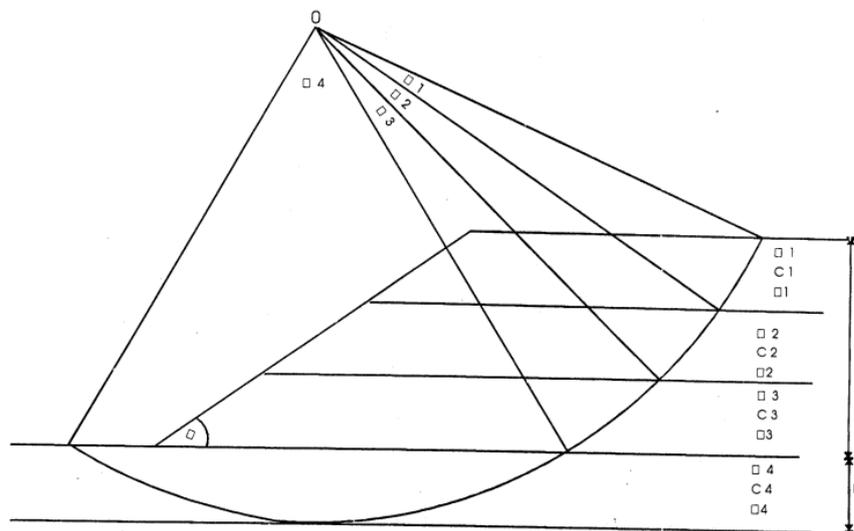
Gambar 2.13 Grafik Cousins Untuk Angka Stabilitas dan Perletakan Lingkaran-lingkaran Kritis (lanjutan) – 6



Gambar 2.14 Grafik Cousins Untuk Angka Stabilitas dan Perletakan Lingkaran-lingkaran Kritis (lanjutan) – 7



Gambar 2.15 Grafik Cousins Untuk Angka Stabilitas dan Perletakan Lingkaran-lingkaran Kritis (lanjutan) – 8



Gambar 2.16 Lereng Yang Terdiri Atas Empat Lapisan

2.5.2 Metode Janbu

- a. Pada kondisi tanah jenuh air dengan $\phi = 0$ dan $c \neq 0$, Metode analisis stabilitas lereng dengan menggunakan grafik metode Janbu dapat digunakan. Langkah-langkah penggunaan grafik stabilitas pada kondisi ini adalah sebagai berikut:
1. Tentukan parameter desain dan karakteristik tanah, termasuk sudut geser dalam (ϕ), kohesi (c), berat volume tanah (γ), tinggi lereng (h), dan kedalaman bidang longsor (D).
 2. Tentukan kemiringan lereng yang akan dianalisis. Kemiringan lereng ini dapat ditentukan berdasarkan kondisi lapangan atau desain yang diinginkan.
 3. Jika tanah pada lereng terdiri dari lapisan-lapisan yang berbeda, maka lapisan-lapisan tersebut dapat disederhanakan menjadi satu lapisan dengan mengambil nilai rata-rata dari parameter ϕ dan c . Hal ini dilakukan dengan menggunakan harga "weighted average" dari ϕ dan c serta harga rata-rata dari parameter-parameter lainnya.
 4. Gunakan grafik stabilitas metode Janbu yang sesuai dengan kemiringan lereng dan karakteristik tanah yang telah ditentukan. Pada grafik tersebut, tentukan nilai faktor keamanan (F) berdasarkan perbandingan antara gaya-gaya penyebab longsor dan gaya-gaya penahan. Interpretasikan nilai faktor keamanan yang didapatkan dari grafik. Jika nilai $F > 1$, berarti stabilitas lereng terpenuhi. Namun, jika nilai $F < 1$, berarti stabilitas lereng tidak terpenuhi dan perlu dilakukan langkah-langkah mitigasi untuk menjaga stabilitas lereng.

Penggunaan grafik dengan metode Janbu pada kondisi tanah jenuh air dengan $\phi = 0$, $c \neq 0$ memungkinkan untuk melakukan analisis yang lebih cepat dan praktis dalam mengevaluasi stabilitas lereng. Namun, penting untuk memahami dengan baik karakteristik tanah dan memperhatikan asumsi-asumsi yang digunakan dalam metode ini agar hasil analisis dapat menggambarkan kondisi lapangan dengan akurat. dengan menggunakan persamaan:

$$\tan(\phi_{\text{rata}}) = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i \tan \phi_i}{\sum_{i=1}^n \theta_i} \quad (1)$$

$$C_{rata} = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i C_i}{\sum_{i=1}^n \theta_i} \quad (2)$$

$$\gamma_{rata} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i}{n} \quad (3)$$

Hitung faktor kedalaman d menggunakan persamaan:

$$d = \frac{D}{H} \quad (4)$$

dimana:

d = faktor kedalaman

D = kedalaman (m)

H = tinggi (m)

Hitung faktor P_d menggunakan persamaan:

$$P_d = \frac{\gamma_{rata} H + q - \gamma_w H_w}{U_q U_w U_t} \quad (5)$$

dimana:

γ_{rata} = berat volume rata-rata (ton/m³)

H = tinggi lereng dari dasar (m)

q = beban merata (ton/m³)

H_w = tinggi air diluar lereng (m)

U_q = faktor kondisi beban merata (lihat Gambar 2.18)

U_w = faktor koreksi beban perendaman (Gambar 2.18)

U_t = faktor koreksi retakan susut (lihat Gambar 13)

Bila tidak ada beban merata, $U_q = 1$; bila tidak ada perendaman $U_w = 1$ dan bila tidak ada retakan susut $U_t = 1$.

- Menggunakan grafik dalam Gambar 18, dicari angka stabilitas N_o yang tergantung pada harga \square dan d
- Hitung faktor keamanan FK, menggunakan persamaan:

$$FK = - \frac{N_o C_{rata}}{P_d} \quad (6)$$

dimana :

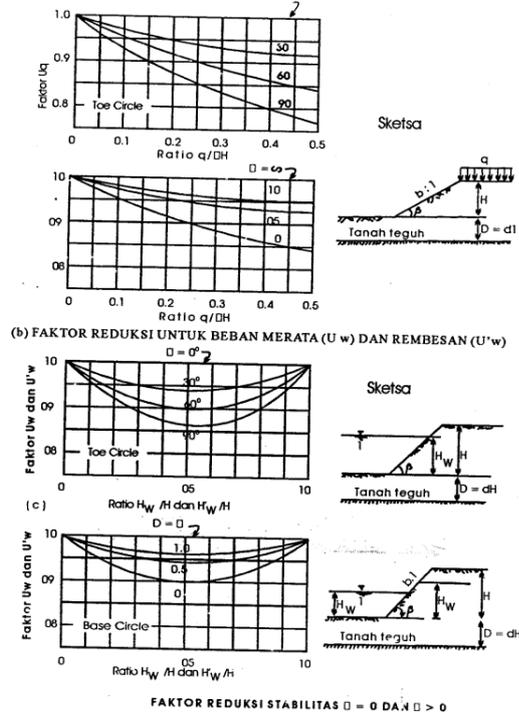
FK = faktor keamanan

N_o = angka stabilitas

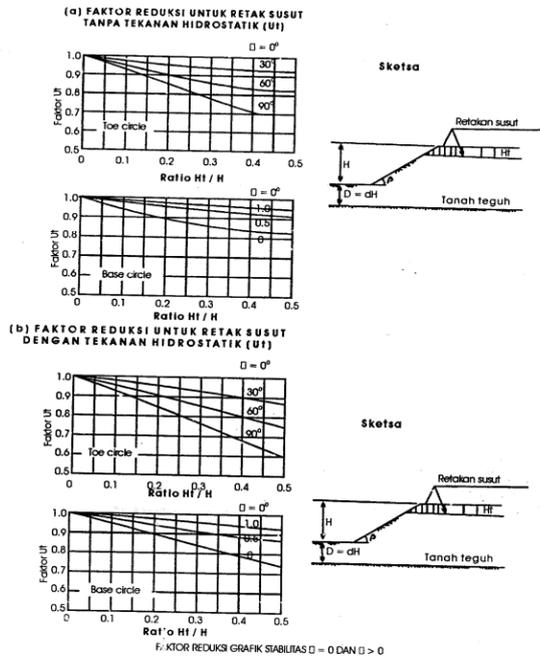
C_{rata} = harga kohesi rata-rata (ton/m³)

P_d = faktor

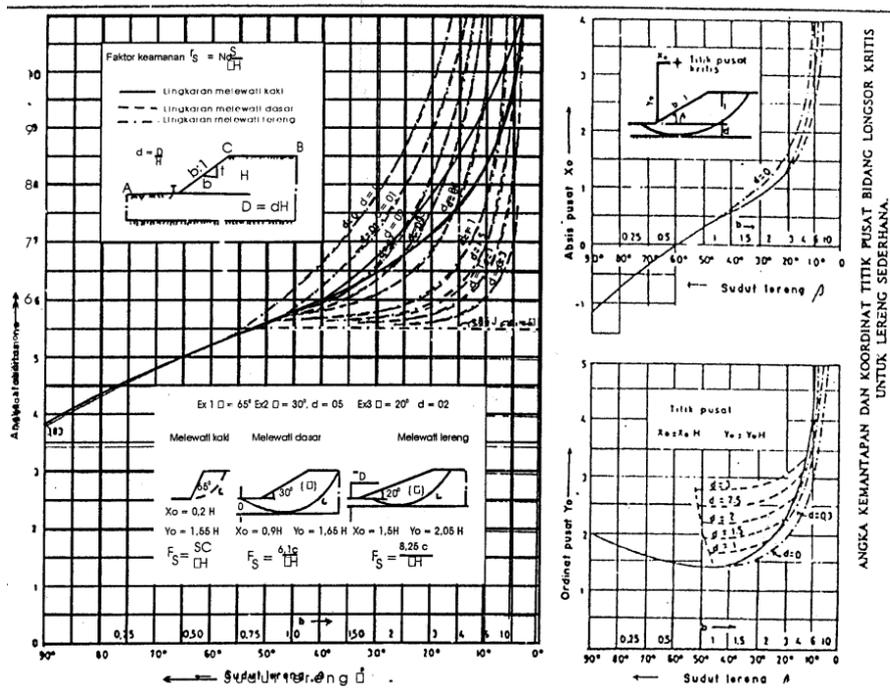
Tentukan titik tangkap lingkaran kritis (bidang longsor) menggunakan grafik dalam Gambar 14. Titik tangkap dinyatakan dalam X_0 dan Y_0



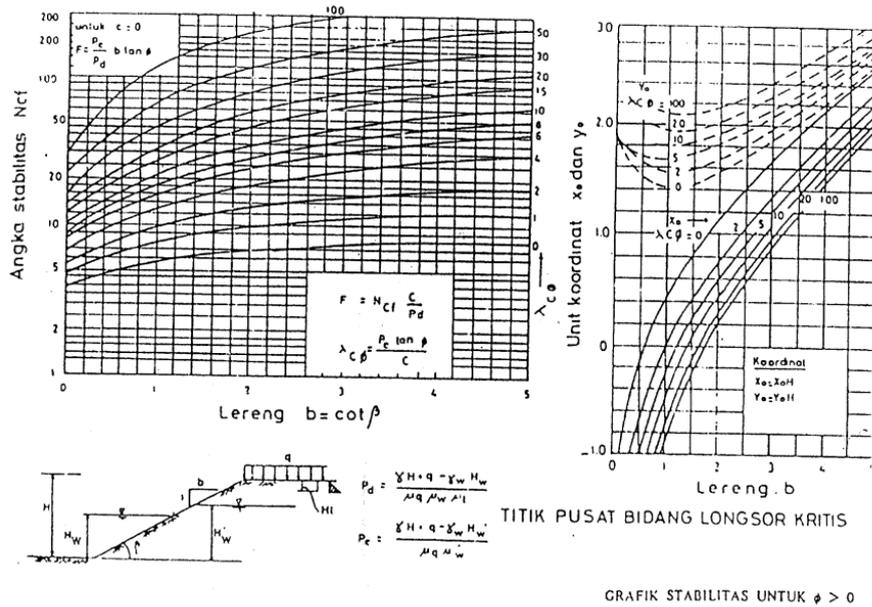
Gambar 2.17 Faktor Reduksi Stabilitas $\phi = 0$ dan $\phi > 0$



Gambar 2.18 Faktor Reduksi Grafik Stabilitas $\phi = 0$ dan $\phi > 0$



Gambar 2.19 Angka Kemantapan dan Koordinat Titik Pusat Bidang Longsor Kritis Untuk Lereng Sederhana



Gambar 2.20 Grafik Stabilitas Untuk $\phi > 0$

- b. Kondisi Tanah yang Mempunyai harga $\Phi > 0$ dan $c > 0$. Bagian ini terutama membahas mengenai kemantapan lereng untuk tanah lempung yang

mempunyai parameter $\Phi > 0$ dan $c > 0$, dan peninjauan dapat dilakukan terhadap lereng terendam sebagian, retakan susut, dan gaya-gaya luar lainnya.

Langkah-langkah penggunaan grafik:

1. Tentukan parameter desain setiap lapisan tanah yaitu Φ , c , γ , h dan D .
2. Tentukan kemiringan lereng
3. Tanah berlapis-lapis disederhanakan menjadi satu lapisan. Caranya sama untuk tanah jenuh air ($\Phi = 0$, $c \neq 0$) dengan menggunakan persamaan.
4. Perkiraan letak bidang longsoran

Untuk lereng sederhana dengan $\Phi > 0$ bidang longsoran kritis melewati kaki lereng bila tanah dasarnya akan melewati tanah dasar, menyinggung lapisan yang kuat.

5. Hitung faktor P_d menggunakan persamaan (5)

$$P_d = \frac{\gamma_{rata} H + q - \gamma_w H_w}{U_q U_w U_t}$$

6. Hitung faktor P_e menggunakan persamaan

$$P_e = \frac{\gamma_{rata} H + q - \gamma_w H_w}{U_q U_w} \quad (7)$$

Dimana:

H_w = tinggi air dalam lereng (m)

U_w = faktor koreksi rembesan

Bila tidak ada beban merata, $u_q = 1$; bila tidak ada rembesan $u_w = 1$

7. Hitung parameter tak berdimensi $\Lambda_{c\phi}$ menggunakan persamaan

$$\Lambda_{c\phi} = \frac{P_e \tan(\phi_{rata})}{c_{rata}} \quad (8)$$

Dimana;

$\tan(\phi_{rata})$ = harga rata dari $\tan \phi$

c_{rata} = harga kohesi rata-rata (ton/m^2)

Bila $c_{rata} = 0$ maka $\lambda_{c\phi}$ menjadi tak terhingga

Dalam hal ini langkah 7 diloncat.

8. Menggunakan grafik dalam gambar 2.19 cari angka kemantapan N_{cf} yang tergantung pada sudut kemiringan α dan $\lambda_{c\phi}$
9. Hitung faktor keamanan, FK menggunakan persamaan:

$$FK = N_{cf} \frac{c_{rata}}{P_d} \quad (\text{untuk } c > 0) \quad (25)$$

$$FK = \frac{P_e}{P_d} b \tan \phi_{rata} \quad (\text{untuk } c = 0) \quad (26)$$

dimana: $b = \cot \alpha$

10. Tentukan titik tangkap lingkaran kritis (bidang longsoran) menggunakan grafik dalam Gambar 2.19 dan dinyatakan dalam X_o dan Y_o
11. Bila lereng terdiri atas banyak lapisan maka perhitungan perlu ditinjau beberapa lingkaran kritis yang menyinggung batas-batas lapisan.

2.5.3 Metode Duncan & Buchignani

Analisis Duncan & Buchignani untuk lereng tak terbatas mencakup dua kondisi, yaitu:

1. Lereng dari material tak berkoheksi dengan bidang longsoran kritis dangkal
2. Lereng dari tanah residual dengan lapisan tanah tipis terletak diatas lapisan tanah lebih kuat dan bidang longsornya melewati bidang datar sejajar lereng, lihat Gambar 2.21.

A. Langkah-langkah dalam penggunaan grafik stabilitas untuk analisa tegangan efektif

Tentukan ratio tekanan air pori r_u menggunakan persamaan:

$$r_u = \frac{X}{T} \frac{\gamma w}{\gamma} \cos^2 \alpha \quad (\text{untuk rembesan sejajar lereng}) \quad (1)$$

$$r_u = \frac{\gamma w}{\gamma} \frac{1}{1 + \tan \alpha \tan \theta} \quad (\text{untuk rembesan memotong lereng}) \quad (2)$$

dimana:

x = Jarak dari bidang longsor ke garis rembesan diukur normal terhadap lereng (m)

T = jarak dari bidang longsor ke permukaan lereng, diukur normal terhadap permukaan lereng

γ_w = berat volume air (ton/m^3)

α = sudut kemiringan lereng

θ = sudut garis muka air bebas dengan bidang horizontal

Tekanan parameter A menggunakan grafik dalam Gambar 2.21 yang tergantung pada r_u dan $\cot \alpha = b$.

Tentukan parameter B menggunakan grafik dalam Gambar 2.21 yang tergantung pada $\cot \alpha$

Hitung faktor keamanan, FK menggunakan persamaan:

$$FK = A \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} + B \frac{c'}{\gamma H} \quad (3)$$

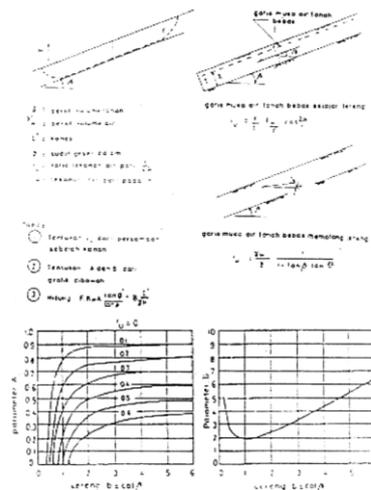
dimana:

ϕ' = sudut geser dalam menggunakan tegangan efektif (derajat)

c' = kohesi dalam tegangan efektif (ton/m^2)

α = sudut kemiringan lereng

H = kedalaman bidang longsor diukur vertical dari permukaan lereng



Gambar 2.21 Angka Kemantapan Untuk Lereng Tak Terhingga

B. Langkah penggunaan grafik stabilitas untuk analisa tegangan total

Tentukan parameter B menggunakan grafik stabilitas untuk analisa tegangan total

Hitung faktor keamanan FK menggunakan persamaan:

$$FK = A \frac{\tan \phi}{\tan} + B \frac{c}{\gamma H} \quad (4)$$

dimana:

ϕ = sudut geser dalam menggunakan tegangan total

c = kohesi dalam tegangan total

2.6 Sifat Mekanis Tanah yang Digunakan Pada Analisis Plaxis

Menurut Setiawan (2019) parameter-parameter yang digunakan pada permodelan Mohr Coulomb atau input data sifat mekanis tanah pada Plaxis adalah sebagai berikut:

1. Berat Volume (γ)

Pada program Plaxis, berat volume tanah yang dibutuhkan dalam perhitungan terbagi ke dalam dua jenis yaitu berat volume tanah jenuh dan berat volume kering. Parameter ini akan dipergunakan untuk mendapatkan tegangan confining pada kedalaman tertentu pada kondisi jenuh maupun kondisi Kering. Berat volume tanah merupakan perbandingan berat tanah terhadap volume dari tanah tersebut.

2. Koefisien Permeabilitas (K)

Koefisien permeabilitas dari tanah akan dipergunakan untuk menghitung kecepatan pengurangan tegangan air pori eksese selama proses pengeluaran air dari pori-pori tanah. Parameter ini pada Analisa undrained akan mengontrol besarnya penurunan terhadap waktu. Harga koefisien rembesan (k) untuk tiap-tiap tanah adalah berbeda. Menurut Craig (1989) dalam Satindra (2018) menyatakan bahwa nilai koefisien permeabilitas tanah dapat ditentukan berdasarkan jenis tanahnya seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2.1 Nilai Koefisien Permeabilitas Tanah

Jenis Tanah	K	
	m/detik	m/hari
Kerikil bersih	$1 - 10^{-1}$	86400 - 8640
Pasir bersih dan campuran pasir kerikil	$10^{-1} - 10^{-4}$	8640 - 8,64

Pasir sangat halus, lanau dan lempung-lanau berlapis	$10^{-4} - 10^{-7}$	8,64 - 0,00864
Lempung tak bercelah dan lempung lanau (>20% lempung)	$10^{-7} - 10^{-10}$	0,00864 - 0,00000864
Lempung yang mengalami pengawetan dan bercelah	$10^{-1} - 10^{-7}$	8640 - 0,00000864

3. Angka Poisson

Angka Poisson merupakan harga perbandingan antara regangan lateral dengan tegangan aksial yang digunakan untuk menghubungkan besar Modulus Elastisitas (E) dengan Modulus Geser (G). Menurut Das (1995), hubungan antara angka Poisson dengan jenis tanah dari konsistensi tanahnya dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut ini.

Tabel 2.2 Hubungan Angka Poisson dengan Jenis Tanah dan Konsistensi

Jenis Tanah	Angka Poisson
Pasir Lepas	0,20 - 0,40
Pasir agak padat	0,25 - 0,40
Pasir padat	0,30 - 0,45
Pasir berlanau	0,20 - 0,40
Lempung lembek	0,15 - 0,25
Lempung agak kaku	0,20 - 0,50

4. Modulus Elastisitas (E)

Modulus Elastisitas (E) atau bisa disebut Modulus Young merupakan perbandingan antara tegangan yang terjadi terhadap regangan pada pengujian Triaxial Test. Menurut Das (1995), nilai modulus elastisitas tanah juga dapat ditentukan berdasarkan jenis tanahnya yang ditunjukkan pada Tabel 2.3 berikut ini.

Tabel 2.3 Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas

Jenis Tanah	E	
	psi	kN/m ²
Lempung lembek	250-500	1380-3450
Lempung keras	850-2000	586-13800
Pasir lepas	1500-4000	10350-27600
Pasir padat	5000-10000	34500-69000

5. Kohesi (c)

Parameter ini di dalam program Plaxis bersama dengan sudut geser dalam tanah akan menjadi masukan untuk menghitung kekuatan tanah. Ketika dilakukan perhitungan konstruksi akan memunculkan peringatan (warning) kepada pengguna apabila tanah telah mengalami keruntuhan (failure) ketika dilaksanakan perhitungan. Kohesi memiliki dimensi yang sama dengan tegangan, kohesi akan cenderung meningkat sesuai dengan kedalaman yang ditinjau. Nilai kohesi dapat diperoleh dari beberapa jenis pengujian antara lain adalah pengujian triaxial dan unconfined compression test.

6. Sudut Geser Dalam (Φ)

Sudut geser dalam adalah sudut yang dibentuk bersamaan dengan kohesi untuk menentukan daya tahan tanah akibat tekanan lateral tanah. Nilai sudut geser dalam didapatkan dari pengujian triaxial test dan direct shear test. Perkiraan nilai sudut geser dalam dapat ditentukan tergantung pada jenis tanah yang dapat dilihat pada Tabel 2.4 berikut ini.

Tabel 2.4 Hubungan Antara Sudut Geser Dalam dengan Jenis Tanah

Jenis Tanah	Sudut Geser Dalam
Kerikil Kepasiran	35-40
Kerikil Kerakal	35-40
Pasir Padat	35-40
Pasir Lepas	30
Lempung	25-30
Lanau	20-25

7. Void Ratio (e)

Void Ratio atau angka pori adalah rasio atau perbandingan antara volume pori yang terdapat diantara butir butir tanah dan volume dari tanah itu sendiri. Hubungan antara angka pori, kelembaban dan berat volume tanah kering dapat dilihat pada Tabel 2.6 berikut ini.

Tabel 2.5 Hubungan Atara Angka Pori, Kelembaban dan Berat Volume Tanah Kering

<i>Type of soil</i>	<i>Void Ration (e)</i>	<i>Natural Moisture content in a saturated state (%)</i>	<i>Dry unit weight (γ_d) kN/m²</i>
<i>Loose uniform sand</i>	0,8	30	14,5
<i>Dense uniform sand</i>	0,45	16	18
<i>Loose angular-grained silty sand</i>	0,65	25	16
<i>Dense angular-grained silty sand</i>	0,4	15	19
<i>Stiff clay</i>	0,6	21	17
<i>Soft clay</i>	0,9 - 1,4	30 – 50	11,5 – 14,5
<i>Loess</i>	0,9	25	13,5
<i>Soft organic clay</i>	2,5 - 3,2	90 – 120	6 – 8
<i>Glacial till</i>	0,3	10	21

2.7 Aplikasi Plaxis

Plaxis adalah sebuah paket program yang disusun berdasarkan metode elemen hingga yang telah dikembangkan secara khusus untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas dalam bidang rekayasa geoteknik. Prosedur pembuatan model secara grafis yang mudah memungkinkan pembuatan suatu model elemen hingga yang rumit dapat dilakukan dengan cepat, sedangkan berbagai fasilitas yang tersedia dapat digunakan untuk menampilkan hasil komputasi secara mendetil. Proses perhitungannya sendiri sepenuhnya berjalan secara otomatis dan didasarkan pada prosedur numerik yang handal. Konsep ini memungkinkan para pemula untuk dapat menggunakan paket program ini hanya dengan mengikuti beberapa jam pelatihan saja.

Plaxis 2D adalah program elemen hingga dua-dimensi, yang dikembangkan untuk analisis deformasi, stabilitas dan aliran air tanah dalam rekayasa geoteknik. Plaxis 2D adalah bagian dari rangkaian produk-produk PLAXIS, paket program elemen hingga yang digunakan di seluruh dunia untuk desain dan rekayasa geoteknik.

Plaxis 2D adalah paket elemen hingga ditujukan untuk analisis dua dimensi deformasi dan stabilitas dalam rekayasa geoteknik. Hal ini dilengkapi dengan fitur untuk menangani berbagai aspek struktur geoteknik dan proses konstruksi menggunakan prosedur komputasi yang kuat dan secara teoritis suara.

Dengan Plaxis 2D geometri model dapat dengan mudah didefinisikan dalam mode tanah dan struktur, setelah model padat independen secara otomatis dapat dipotong dan menyatu. Modus konstruksi dipentaskan memungkinkan untuk simulasi proses konstruksi dan penggalian dengan mengaktifkan dan menonaktifkan cluster tanah dan obyek struktural. Perhitungan kernel memungkinkan simulasi realistis dari linear, waktu perilaku non tergantung dan anisotropik tanah dan / atau rock. Karena tanah merupakan bahan multi-fase, prosedur khusus memungkinkan untuk perhitungan yang berhubungan dengan tekanan hidrostatik pori hidrostatik dan non dalam tanah. Output terdiri dari rangkaian lengkap dari alat visualisasi untuk memeriksa rincian model tanah-struktur 2D bawah tanah.

2.8 Aplikasi SLOPE/W

SLOPE/W memang merupakan program digunakan untuk melakukan analisis stabilitas lereng, baik itu lereng tanah maupun batuan, termasuk dalam kondisi galian dan timbunan.

SLOPE/W memiliki kemampuan untuk memodelkan kondisi-kondisi yang kompleks dalam analisis stabilitas lereng, seperti lapisan tanah yang kompleks, kondisi tekanan air pori yang tidak beraturan, berbagai model kuat geser tanah seperti Mohr-Coloumb dan anisotropik, parameter kuat geser pada kondisi tidak jenuh, pendekatan bentuk bidang gelincir dengan atau tanpa tension crack, beban merata, beban gempa, dan juga perkuatan dengan struktur.

Untuk melakukan analisis stabilitas lereng menggunakan model kuat geser Mohr-Coloumb dalam SLOPE/W, input yang diperlukan adalah:

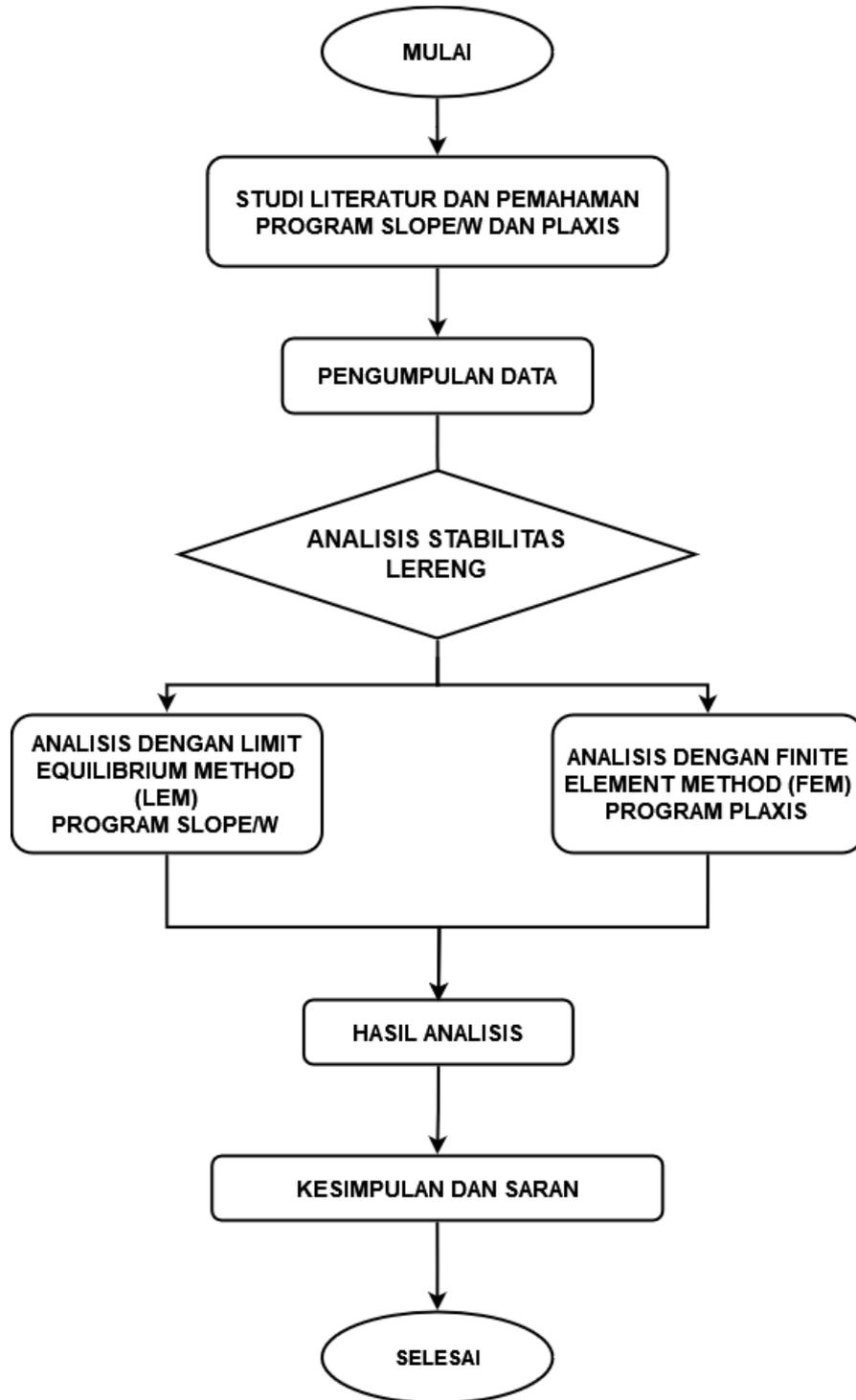
1. Kohesi (Kn/m^3): Parameter kohesi menggambarkan kekuatan material dalam mengatasi gaya-gaya yang bekerja pada lereng. Nilai kohesi dinyatakan dalam satuan tekanan per satuan volume (Kn/m^3).
2. Phi: Phi merupakan sudut geser dalam model kuat geser Mohr-Coloumb yang menggambarkan sifat geser material tanah. Nilai phi dinyatakan dalam satuan sudut.
3. Berat Isi Tanah (Kn/m^3): Parameter berat isi tanah digunakan untuk menggambarkan berat volume tanah per satuan volume. Nilai berat isi tanah dinyatakan dalam satuan tekanan per satuan volume (Kn/m^3).

Dengan menginputkan nilai-nilai tersebut, SLOPE/W akan melakukan analisis stabilitas lereng dan memberikan hasil mengenai faktor keamanan dan pergerakan potensial pada lereng yang dianalisis.

SLOPE/W merupakan alat yang sangat berguna bagi insinyur geoteknik dalam mengevaluasi stabilitas lereng dan mengambil langkah-langkah yang diperlukan untuk meminimalkan risiko keruntuhan lereng.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

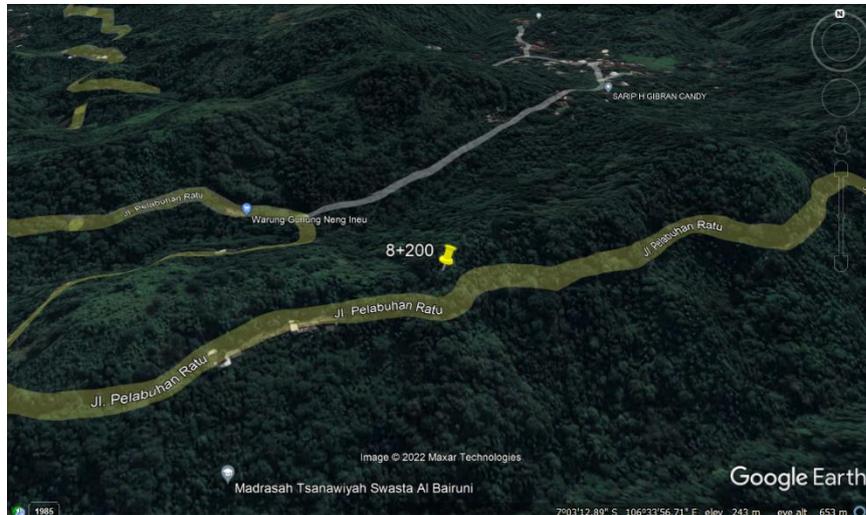
3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

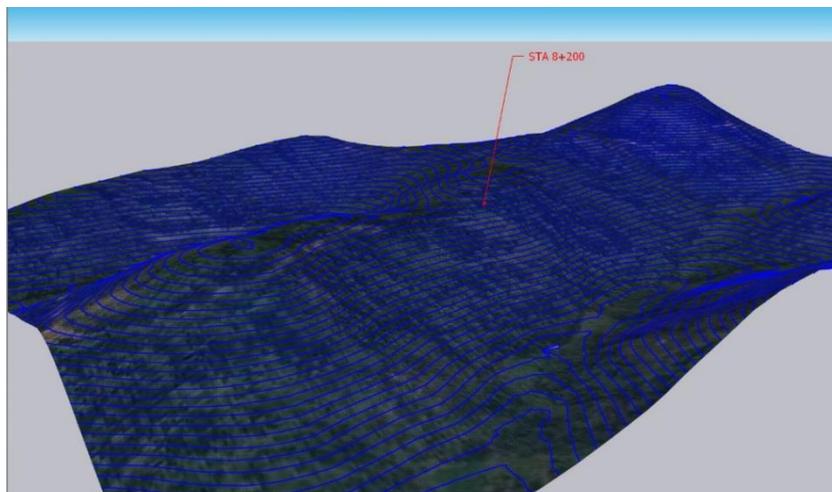
3.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di STA 8+200 Ruas Jalan Bagbagan, Jampangkulon, Kabupaten Sukabumi, Provinsi Jawa Barat.

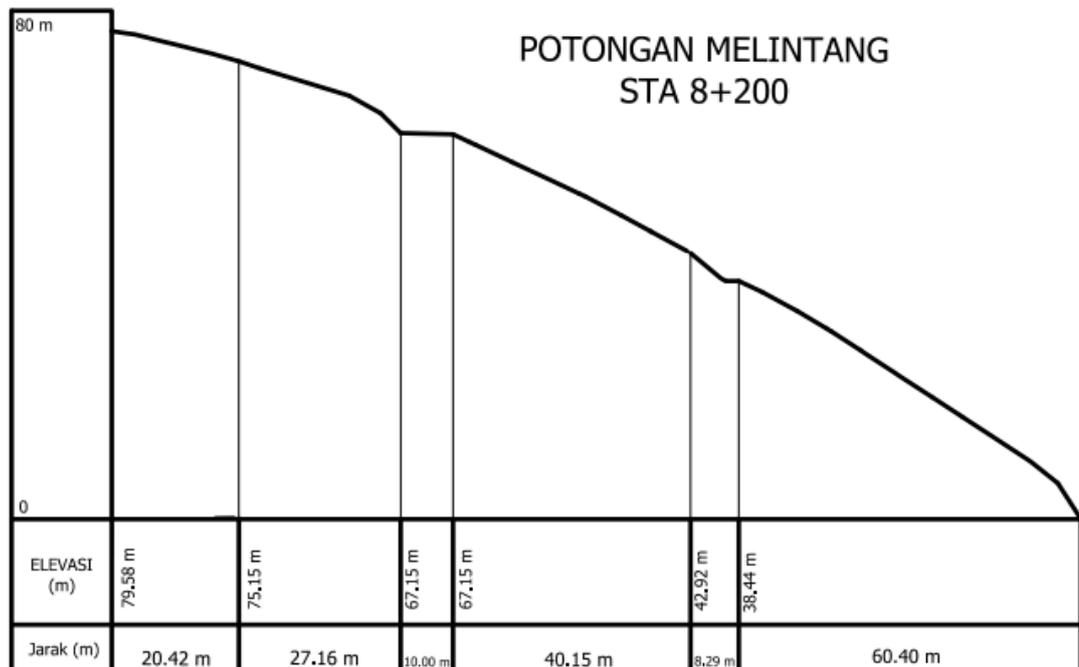


Gambar 3.2 Lokasi Penelitian

Berikut kondisi topografi di ruas jalan Bagbagan – Jampang Kulon STA 8+400.



Gambar 3.3 Kondisi Topografi



Gambar 3.4 Potongan Melintang STA 8+200

3.3 Tahapan Penelitian

Untuk mencapai maksud dan tujuan dari penelitian ini, dilakukan beberapa tahapan penelitian yang dianggap perlu dan secara garis besar diuraikan sebagai berikut :

1. Melakukan studi literatur terhadap buku teks dan jurnal-jurnal yang terkait dengan stabilitas lereng, permasalahan pada lereng, metode yang digunakan, program untuk menganalisis stabilitas lereng dan penanganan lereng.
2. Peninjauan langsung ke lokasi penelitian dan menentukan lokasi pengambilan data yang dibutuhkan
3. Mengambil data-data dari PT. KARYA UTAMA CITRAMANDIRI seperti :
 - Data Borlog
 - Data Parameter Tanah
4. Menganalisis stabilitas lereng dengan menggunakan metode dan program berdasarkan data yang ada.

5. Menganalisis stabilitas lereng terhadap hasil yang didapat dari program perhitungan dan penanganan yang akan digunakan serta membuat kesimpulan.

3.4 Persiapan Penelitian

Pada suatu penelitian, terdapat tahapan persiapan penelitian yaitu berupa pendalaman konsep materi terhadap tugas akhir yang ditinjau dan mempersiapkan hal-hal yang diperlukan sebelum tahapan pengumpulan dan pengolahan data. Adapun persiapan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur, merupakan tahapan awal yang dilakukan untuk memperoleh dasar teori mengenai tinjauan tugas akhir,
2. Studi kasus, merupakan tahapan untuk mengidentifikasi masalah yang terjadi di lokasi yang akan ditinjau.
3. Pengumpulan data, merupakan tahapan untuk mengumpulkan data dan informasi yang dapat membantu dalam pelaksanaan pengerjaan tugas akhir

3.5 Data Penelitian

3.5.1 Data Borlog

BORLOG																
Project : PENYELIDIKAN TANAH Location : PENYELIDIKAN TANAH (KM 8+200) Boring No. : BH1 Date tested : 25-28 AGUSTUS 2022 Koordinat : X: 673154 Y: 922051 Z:					Depth of boring : 30.00 m Ground Surface Level : - Ground Water Level : LOOSE Tested by : ARIY Checked by : MASBUDIIN											
Depth (meter)	Drilling Method (meter)	Groundwater Level (meter)	Core recovery (%)	RQD	Classification	GRAPH OF SPT - N					Sample type	Soil / Rock Description	Sampling Type : Piston (P), Spt, boring, Open Tube	Remarks		
						0	10	20	30	40					50	60
0	0.00															
0.50																
1.00																
1.50																
2.00																
2.50						40						25	Lerasi pasir berlempung, Abu-abu, Keras	N1=15/15, N2=18/15, N3=22/15		
3.00																
3.50																
4.00																
4.50						28										
5.00																
5.50																
6.00						>60										
6.50																
7.00																
7.50																
8.00																
8.50						>60										
9.00																
9.50																
10.00						>60										
10.50																
11.00																
11.50																
12.00																
12.50						>60										
13.00																
13.50																
14.00																
14.50						>60										
15.00																
15.50																
16.00						>60										
16.50																
17.00																
17.50																
18.00						>60										
18.50																
19.00																
19.50																
20.00						>60										
20.50																
21.00																
21.50																
22.00						>60										
22.50																
23.00																
23.50																
24.00						>60										
24.50																
25.00																
25.50																
26.00						>60										
26.50																
27.00																
27.50																
28.00						>60										
28.50																
29.00																
29.50																
30.00						>60										
30.50																

Gambar 3.5 Data Borlog BH1

BORLOG																
Project : PENYELIDIKAN TANAH Location : PENYELIDIKAN TANAH (KM 8+200) Boring No. : BH2 Date tested : 21-24 AGUSTUS 2022 Koordinat : X: 673154 Y: 9220062					Z:					Depth of boring : 30.00 m Ground Surface Level : - Ground Water Level : LOOSE Tested by : ARIF Checked by : MASBURLIDIN						
Depth (meter)	Drilling Method	Casing	Groundwater Level	Core recovery %	RqD	Classification	GRAPH OF SPT - N					Sample type	Soil / Rock Description	Sampling Type : Petan (P), Spt, boring, Open Tube	Remarks	
							0	10	20	30	40					50
0.00																
0.50																
1.00																
1.50																
2.00																
2.50							10									
3.00																
3.50																
4.00																
4.50							17									
5.00																
5.50																
6.00																
6.50							>60									
7.00																
7.50																
8.00																
8.50							>60									
9.00																
9.50																
10.00																
10.50							>60									
11.00																
11.50																
12.00																
12.50							>60									
13.00																
13.50																
14.00																
14.50							>60									
15.00																
15.50																
16.00																
16.50							>60									
17.00																
17.50																
18.00																
18.50							>60									
19.00																
19.50																
20.00																
20.50							>60									
21.00																
21.50																
22.00																
22.50							>60									
23.00																
23.50																
24.00																
24.50							>60									
25.00																
25.50																
26.00																
26.50							>60									
27.00																
27.50																
28.00																
28.50							>60									
29.00																
29.50																
30.00																
30.50							>60									

Gambar 3.6 Data Borlog BH2

3.5.2 Data Parameter Tanah

Project : LONGSORAN JABAR DD-3		Check by : Sri.W	
Location :		Date : Sep. 2022	
Bor location : KM 8 + 200		No. Bor : BH 2	
Laboratory Test Resume			
No. Sample		UDS 1	
Depth		1,50 - 2,00	
Index Properties		symbol	unit
1.	Density	γ	tim ³
2.	Water content	w	%
3.	Specific of gravity	Gs	-
	Void ratio	e	-
	Porosity	n	-
	Degree of saturation	Sr	%
4.	Plastic limit	PL	%
	Liquid limit	LL	%
	Plasticity index	PI	%
5.	Grain size		
	Gravel	G	%
	Sand	S	%
	Silt	M	%
	Clay	C	%
6.	Soil Classification USCS		CL
Engineering properties			
6.	Unconfined	q _u	kg/cm ²
	Compression Test	q _u '	kg/cm ²
		S _i	-
		c _u	kg/cm ²
7.	Triaxial - UU Test	σ	22.284
		c	0.063
8.	Triaxial - CU Test	σ	
		c	kg/cm ²
9.	Direct Shear Test	σ	
		c	kg/cm ²
10.	Consolidation Test	Cc	-
		C _v	cm ² /sec
11.	Permeability	k	cm/sec

Gambar 3.7 Data Parameter Tanah

3.6 Metode Analisis Stabilitas Lereng dengan Komputasi

3.6.1 Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) PLAXIS

Program ini memungkinkan pengguna untuk membuat model elemen hingga yang kompleks dan menyediakan hasil perhitungan secara detail. Dalam Plaxis, prosedur input data yang sederhana memungkinkan pengguna untuk memasukkan parameter-parameter kekuatan geser tanah yang diperlukan. Parameter-parameter ini kemudian secara otomatis direduksi hingga terjadi kelongsoran. Dengan demikian, Plaxis dapat digunakan untuk menganalisis

stabilitas lereng dan mendapatkan hasil terkait faktor keamanan dan pergerakan potensial pada lereng yang dianalisis.

Keunggulan Plaxis terletak pada kemampuannya dalam memodelkan dan menganalisis berbagai kondisi dan situasi geoteknik yang kompleks, termasuk perubahan deformasi, perpindahan tanah, dan stabilitas lereng. Program ini juga menyediakan berbagai alat visualisasi yang membantu dalam memahami dan menganalisis hasil perhitungan.

Dengan menggunakan Plaxis, insinyur sipil dan geoteknik dapat melakukan evaluasi yang komprehensif terhadap kinerja geoteknik suatu proyek dan mengambil keputusan yang tepat untuk memastikan stabilitas dan keamanan konstruksi. Faktor aman (SF) stabilitas lereng menjadi:

$$\Sigma M_{sf} = \tan \varphi_{input} / \tan \varphi_{reduksi} = c_{input} / c_{reduksi}$$
$$SF = \frac{\text{Kekuatan geser yang tersedia}}{\text{Kekuatan geser saat longsor}} = \text{Nilai } \Sigma M_{sf} \text{ pada saat longsor}$$

dengan:

c_{input} = kohesi tanah (kN/m²)

φ_{input} = sudut geser dalam tanah (°)

$c_{reduksi}$ = kohesi tanah tereduksi (kN/m²)

$\varphi_{reduksi}$ = sudut geser dalam tereduksi (°)

3.6.2 Metode Keseimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method*) SLOPE/W

SLOPE/W memiliki kemampuan untuk menganalisis masalah stabilitas lereng secara baik dalam skala yang sederhana maupun kompleks. Program ini menggunakan metode kesetimbangan batas (Limit Equilibrium) yang memiliki delapan metode yang dapat dipilih untuk menganalisis berbagai permukaan lereng yang miring.

Dengan menggunakan SLOPE/W, pengguna dapat memodelkan dan menganalisis stabilitas lereng dengan memasukkan data geoteknis yang relevan, seperti parameter-parameter kekuatan geser tanah. Program ini kemudian menghitung faktor keamanan lereng dengan mempertimbangkan gaya-gaya penahan dan pendorong yang bekerja pada lereng.

SLOPE/W, sebagai bagian dari Geostudio, memberikan pengguna keleluasaan dalam memilih metode kesetimbangan yang sesuai dengan kondisi

lereng yang akan dianalisis. Dengan demikian, program ini dapat digunakan oleh insinyur geoteknik untuk melakukan evaluasi stabilitas lereng dengan lebih efisien dan akurat.

3.7 Parameter Masukan Program Plaxis

Untuk menghitung stabilitas lereng menggunakan program Plaxis, beberapa informasi atau parameter input yang diperlukan meliputi:

1. Karakteristik Fisik Tanah

Parameter seperti berat volume tanah, indeks plastis, kohesi, dan sudut geser dalam tanah diperlukan sebagai input dalam program. Data ini dapat diperoleh dari pengujian laboratorium atau pengukuran lapangan yang menggambarkan sifat mekanis tanah yang relevan untuk analisis stabilitas lereng.

2. Modulus Elastisitas dan Angka Poisson

Parameter ini tidak dapat diukur secara langsung melalui pengujian, tetapi diperoleh melalui rumus korelasi atau pendekatan empiris. Modulus elastisitas dan angka Poisson digunakan untuk memodelkan respons deformasi tanah dalam analisis stabilitas lereng.

3. Jenis Elemen dan Mesh

Program Plaxis menggunakan elemen segitiga plan strain dengan 15 node pada setiap elemen sebagai elemen dasar untuk analisis. Mesh atau jaringan elemen digunakan untuk membagi wilayah analisis menjadi elemen-elemen yang lebih kecil dan membentuk grid. Pemilihan dan penyusunan mesh harus dilakukan dengan hati-hati untuk mencerminkan geometri dan karakteristik tanah dengan akurat.

4. Model Mohr-Coulomb

Model kekuatan tanah yang sering digunakan dalam analisis stabilitas lereng menggunakan program Plaxis adalah model Mohr-Coulomb. Model ini memperhitungkan kohesi dan sudut geser dalam tanah untuk menggambarkan perilaku geseran tanah yang terjadi dalam lereng.

Dengan memasukkan informasi dan parameter ini ke dalam program Plaxis dan melakukan analisis yang tepat, pengguna dapat menghitung stabilitas lereng,

mendapatkan nilai faktor keamanan, dan memahami perilaku deformasi tanah dalam kondisi tertentu.

3.8 Paramater Masukan Program SLOPE/W

Parameter-parameter input/informasi yang dibutuhkan untuk menghitung angka stabilitas lereng dengan program Slope/W meliputi:

1. Sifat Fisik Tanah

Parameter-parameter seperti berat volume tanah, indeks plastis, kohesi, dan sudut geser dalam tanah diperlukan sebagai input dalam program. Data ini dapat diperoleh dari hasil pengujian laboratorium atau pengukuran lapangan yang menggambarkan karakteristik mekanis tanah yang relevan untuk analisis stabilitas lereng.

2. Safety Factor (Faktor Keamanan)

Nilai faktor keamanan (SF) digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi stabilitas lereng. Nilai SF ini biasanya didapatkan dari hasil analisis sebelumnya atau diperhitungkan berdasarkan persyaratan perancangan dan tingkat risiko yang dapat diterima.

3. Gaya-Gaya yang Bekerja pada Potongan Kritis Lereng

Informasi mengenai gaya-gaya yang bekerja pada potongan kritis lereng perlu diketahui untuk menghitung faktor keamanan. Gaya-gaya ini meliputi berat sendiri tanah, beban tambahan (seperti beban struktur atau beban hidrostatis), dan tekanan air pori yang dapat mempengaruhi stabilitas lereng.

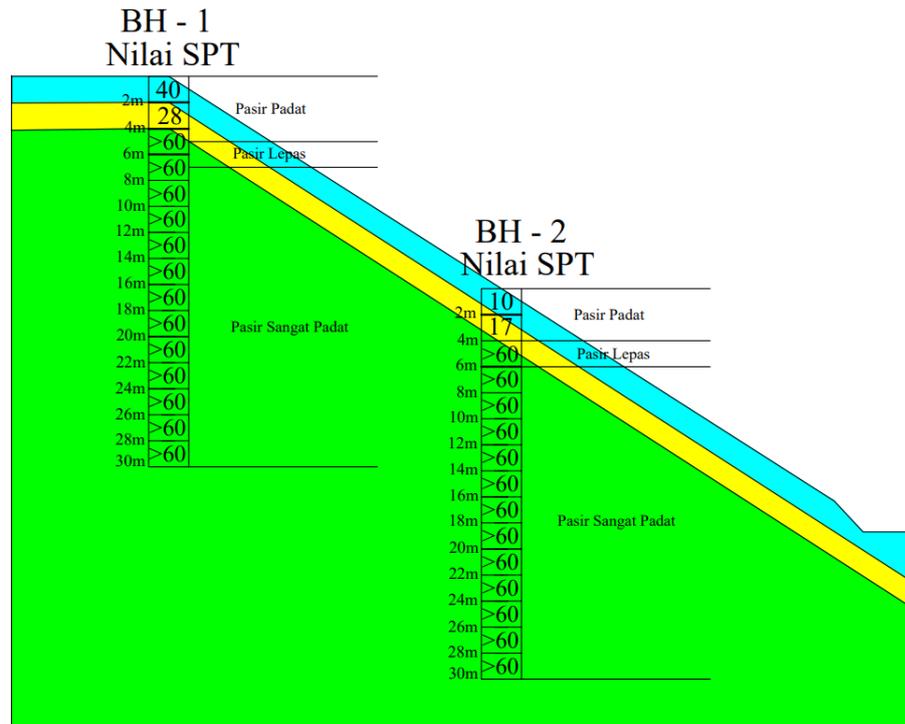
Setelah parameter-parameter ini dimasukkan ke dalam program Slope/W, program akan melakukan perhitungan dan memberikan hasil dalam bentuk angka stabilitas lereng, seperti faktor keamanan (safety factor). Dengan menganalisis hasil ini, pengguna dapat mengevaluasi stabilitas lereng dan melakukan tindakan perbaikan jika diperlukan.

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Kasus

Nilai dari parameter-parameter yang digunakan pada analisa dengan bantuan program Plaxis dan Geoslope berdasarkan data-data berikut ini :



Gambar 4.1 Titik Uji Bor

Tabel 4.1 Stratifikasi Tanah BH1

BH1			
No	Kedalaman (m)	Jenis Tanah	Parameter Tanah
1	0-3	Pasir Lepas	$\gamma_{unsat} = 18,$ $\gamma_{unsat} = 20,$ $E' = 3,$ $\nu = 0,3,$ $\phi = 33,$ $C'_{ref} = 1$
2	3-5	Pasir Padat	$\gamma_{unsat} = 18,$ $\gamma_{unsat} = 22,$

			$E' = 3,$ $\nu = 0,3,$ $\varphi = 37,$ $C'_{ref} = 1$
3	5-30	Pasir Sangat Padat	$\gamma_{unsat} = 26,$ $\gamma_{sat} = 30,$ $E' = 3,$ $\nu = 0,3,$ $\varphi = 41,$ $C'_{ref} = 1$

Tabel 4.2 Stratifikasi Tanah BH2

BH2			
No	Kedalaman (m)	Jenis Tanah	Parameter Tanah
1	0-2,5	Pasir Lepas	$\gamma_{unsat} = 18,$ $\gamma_{sat} = 22,$ $E' = 3,$ $\nu = 0,3,$ $\varphi = 37,$ $C'_{ref} = 1$
2	2,5-5	Pasir Padat	$\gamma_{unsat} = 18,$ $\gamma_{sat} = 20,$ $E' = 3,$ $\nu = 0,3,$ $\varphi = 33,$ $C'_{ref} = 1$
3	5-30	Pasir Sangat Padat	$\gamma_{unsat} = 26,$ $\gamma_{sat} = 30,$ $E' = 3,$ $\nu = 0,3,$ $\varphi = 41,$ $C'_{ref} = 1$

Tabel 4.3 Tabel Klasifikasi Jalan

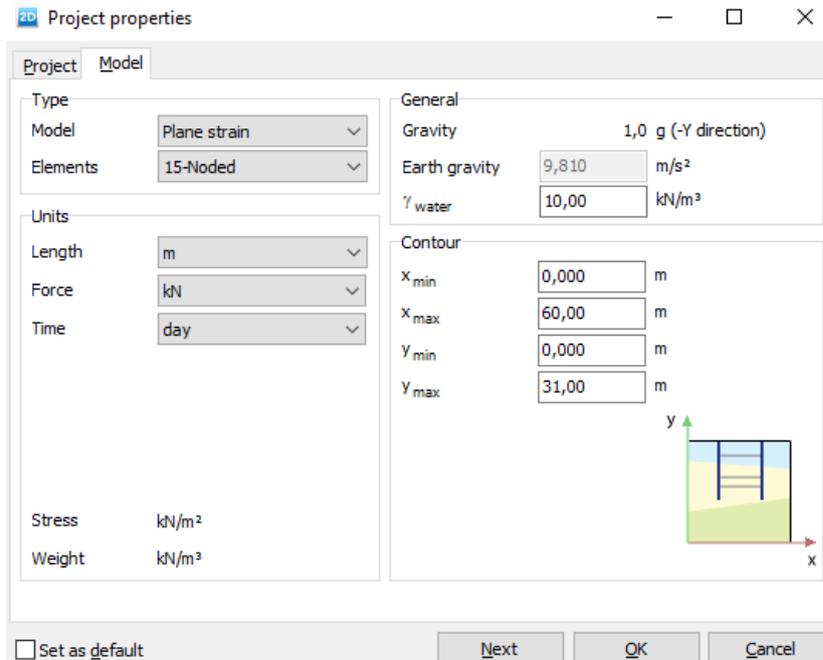
Kelas Jalan	Fungsi Jalan	Ukuran Kendaraan Bermotor	MST
Kelas I	Jalan Arteri Jalan Kolektor	Lebar ≤ 2.500 mm Panjang ≤ 18.000 mm Tinggi ≤ 4.200 mm	10 Ton
Kelas II	Jalan Arteri Jalan Kolektor Jalan Lokal <i>Jalan Lingkungan</i>	Lebar ≤ 2.500 mm Panjang ≤ 12.000 mm Tinggi ≤ 4.200 mm	8 Ton
Kelas III	Jalan Arteri Jalan Kolektor Jalan Lokal <i>Jalan Lingkungan</i>	Lebar ≤ 2.100 mm Panjang ≤ 9.000 mm Tinggi ≤ 3.500 mm	8 Ton
Kelas Khusus	Jalan Arteri	Lebar > 2.500 mm Panjang > 18.000 mm Tinggi ≤ 4.200 mm	> 10 Ton

4.2 Analisis Stabilitas Lereng dengan Plaxis (*Finite Element Method*)

Perhitungan stabilitas lereng dengan metode FEM dengan bantuan Plaxis memiliki tahapan-tahapan yang harus dilalui, yaitu :

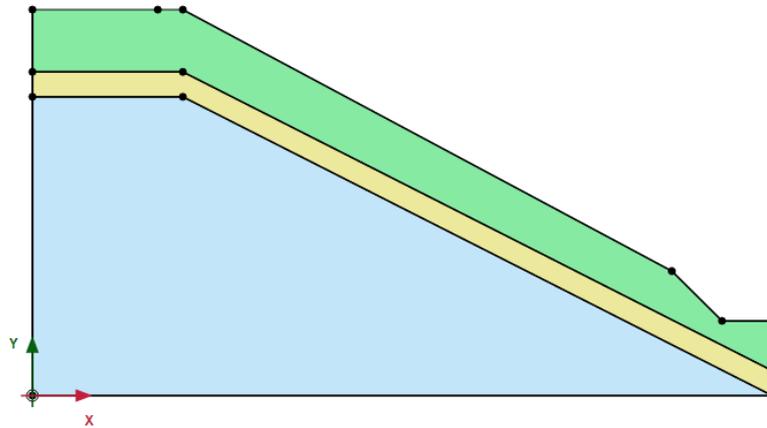
4.2.1 Program Input

1. Penentuan satuan ukuran (Panjang, Gaya) yang digunakan, pemilihan model metode perhitungan elemen hingga dan tipe elemen yang digunakan, yaitu plane strain dan triangular 15 Node, serta penentuan satuan ukuran (Panjang, Gaya) yang digunakan yaitu m, kN.



Gambar 4.2 Penentuan General Model dan Satuan yang Digunakan

2. Pemodelan struktur lereng secara geometri



Gambar 4.3 Geometri Lereng

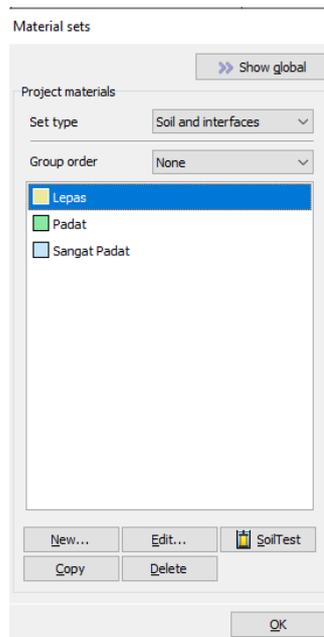
Keterangan :

Warna Kuning : Pasir Lepas

Warna Hijau : Pasir Padat

Warna Biru : Pasir Sangat Padat

3. Menentukan properti material yang akan digunakan, dengan memasukan nilai parameter tanah *undrained* pada kotak *material properties* dengan tipe material *undrained*.



Gambar 4.4 Material Sets

Pasir Lepas :

Soil - Mohr-Coulomb - Lepas

General Parameters Groundwater Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		Lepas
Material model		Mohr-Coulomb
Drainage type		Undrained (A)
Colour		RGB 236, 232, 156
Comments		
General properties		
γ_{unsat}	kN/m ³	18,00
γ_{sat}	kN/m ³	20,00
Advanced		
Void ratio		
Dilatancy cut-off		<input type="checkbox"/>
e_{inc}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0

Gambar 4.5 General Pasir Lepas

Soil - Mohr-Coulomb - Lepas

General Parameters Groundwater Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Stiffness		
E'	kN/m ²	3,000
ν' (ν_u)		0,3000
Alternatives		
G	kN/m ²	1,154
E_{oed}	kN/m ²	-4,038
Strength		
c'_{ref}	kN/m ²	1,000
ϕ' (ϕ_h)	°	33,00
ψ (ψ_s)	°	0,000
Advanced		
Set to default values		<input checked="" type="checkbox"/>
Stiffness		
E'_{inc}	kN/m ² /m	0,000
γ_{ref}	m	0,000
Strength		
c'_{inc}	kN/m ² /m	0,000
γ_{ref}	m	0,000
Tension cut-off		<input checked="" type="checkbox"/>
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9783
ν_u		0,4950

Gambar 4.6 Parameter Pasir Lepas

Pasir Padat :

Soil - Mohr-Coulomb - Padat

General Parameters Groundwater Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		Padat
Material model		Mohr-Coulomb
Drainage type		Undrained (A)
Colour		RGB 134, 234, 162
Comments		
General properties		
Y_{unsat}	kN/m ³	18,00
Y_{sat}	kN/m ³	22,00
Advanced		
Void ratio		
Dilatancy cut-off		<input type="checkbox"/>
e_{init}		0,5000
e_{min}		0,000
e_{max}		999,0

Gambar 4.7 General Pasir Padat

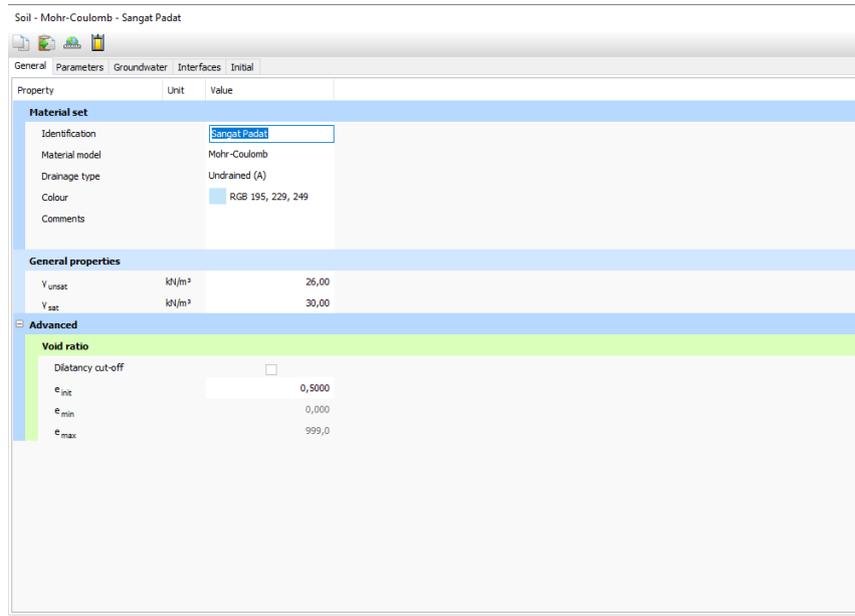
Soil - Mohr-Coulomb - Padat

General Parameters Groundwater Interfaces Initial

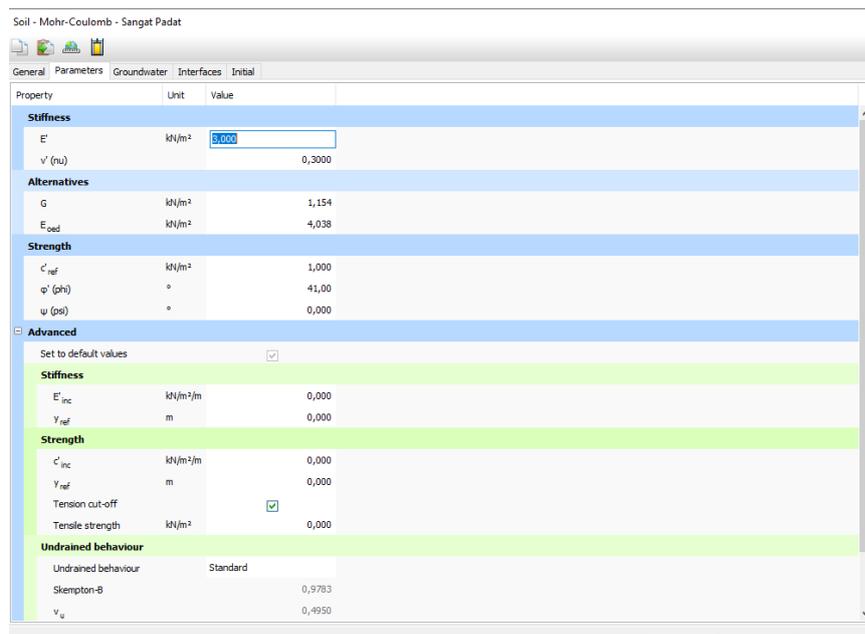
Property	Unit	Value
Stiffness		
E'	kN/m ²	8,000
ν' (ν_u)		0,3000
Alternatives		
G	kN/m ²	1,154
E_{oed}	kN/m ²	4,038
Strength		
c'_{ref}	kN/m ²	1,000
ϕ' (ϕ_i)	°	37,00
ψ (ψ_i)	°	0,000
Advanced		
Set to default values		<input checked="" type="checkbox"/>
Stiffness		
E'_{inc}	kN/m ² /m	0,000
Y_{ref}	m	0,000
Strength		
c'_{inc}	kN/m ² /m	0,000
Y_{ref}	m	0,000
Tension cut-off		<input checked="" type="checkbox"/>
Tensile strength	kN/m ²	0,000
Undrained behaviour		
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0,9783
V_u		0,4950

Gambar 4.8 Parameter Pasir Padat

Pasir Sangat Padat :

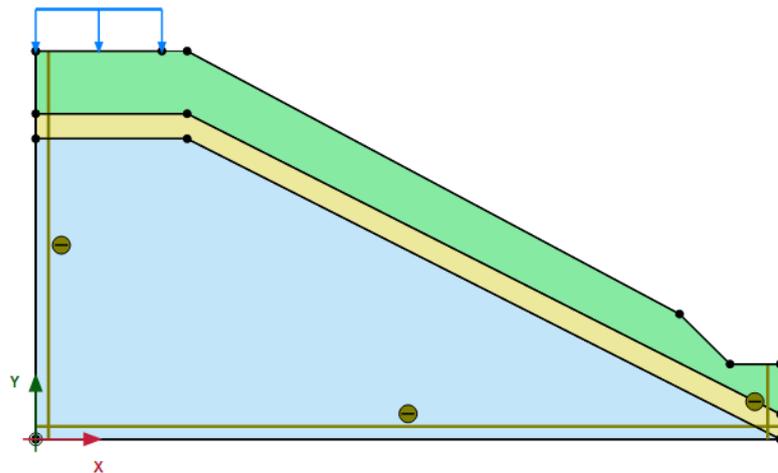


Gambar 4.9 General Pasir Sangat Padat



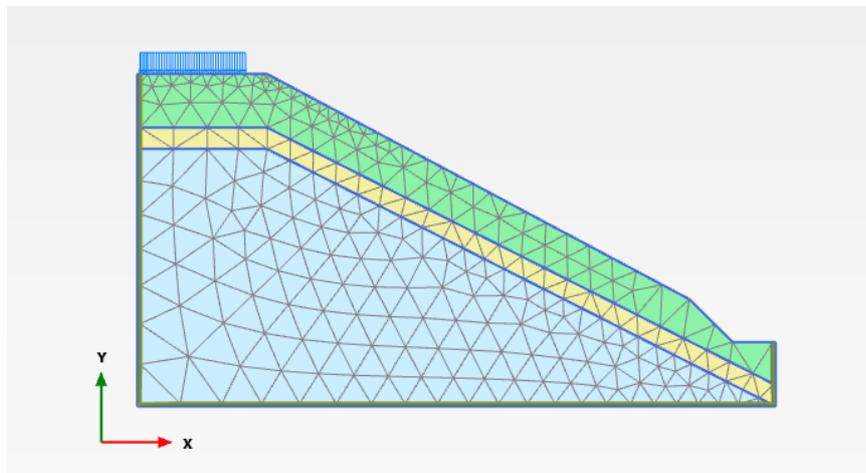
Gambar 4.10 Parameter Pasir Sangat Padat

4. *Boundary Conditions (Standar Fixities)*, secara default program plaxis akan menganggap kondisi pasir sangat padat (sisi bawah) sebagai perletakan jepit horizontal ($u_x = 0$) sedangkan perletakan vertikal sebagai perletakan rol



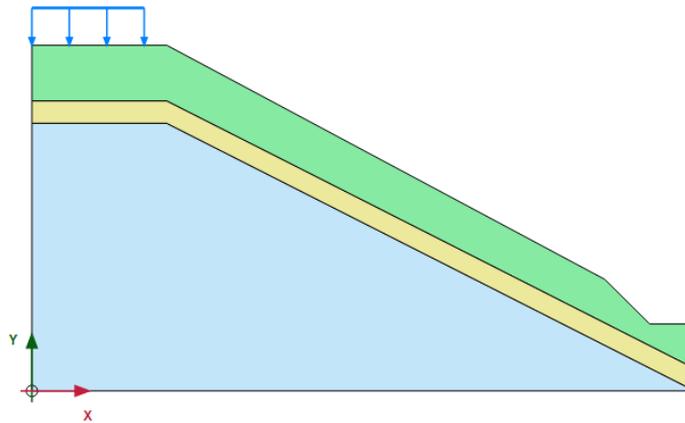
Gambar 4.11 Boundary Conditions (Standard Fixities)

5. *Mesh Generation*, adalah proses diskritasi permodelan struktur menjadi elemen-elemen yang lebih kecil yang dikerjakan secara otomatis oleh Plaxis dengan menekan toolbar “mesh generation”. Mesh yang digunakan adalah medium, dengan jumlah 450 elemen dan 3750 titik.



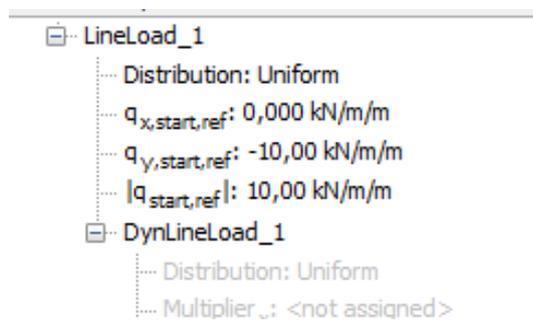
Gambar 4.12 Mesh Generation

6. *Initial Condition*, menentukan kondisi awal pada pemodelan lereng pada Plaxis. Permukaan tanah membentuk garis bidang sesuai lereng alami yang ditinjau, beserta input beban perkerasan



Gambar 4.13 Initial Condition

7. Beban perkerasan jalan di STA 8+200 Ruas Jalan Bagbagan, Jampangkulon, Sukabumi menggunakan kelas II, Arteri, Kolektor, Lokal, Lingkungan yaitu sebesar 80 kN/m lalu dibagi lebar jalan 8 meter menjadi 10 kN/m² dan menggunakan kelas I, Arteri, Kolektor yaitu sebesar 100 kN//m lalu dibagi lebar jalan 8 meter menjadi 12,5 kN/m².



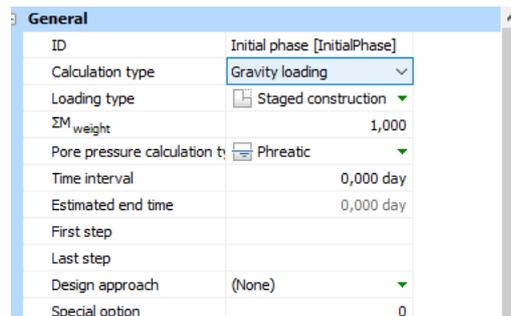
Gambar 4.14 Input Nilai Beban Jalan Kelas II



Gambar 4.15 Input Nilai Beban Jalan Kelas I

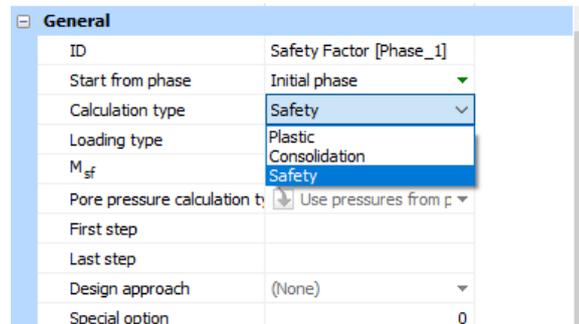
4.2.2 Program Calculations

1. *Initial Phase*, pada tahap ini kondisi lereng berada pada tahap awal, perhitungannya menggunakan metode *gravity loading*, karena untuk menghitung lereng menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*)



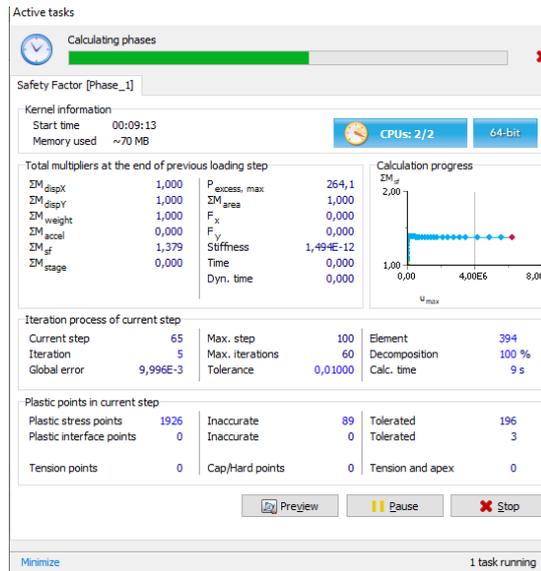
Gambar 4.16 Calculation Type, Gravity Loading

2. Membuat Phase 1 (*Safety Factor*) pada kasus untuk mendapatkan hasil dari faktor keamanan lereng yang ditinjau dari phase awal yaitu Initial Phase, pilih tipe perhitungan menjadi safety.

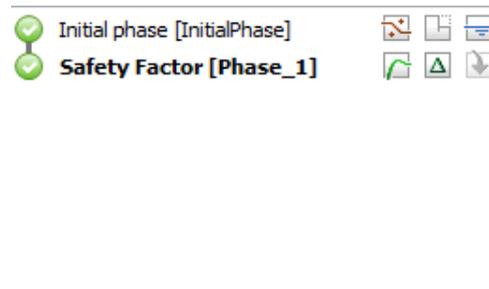


Gambar 4.17 Calculation Type, Safety

3. Proses perhitungan, memulai proses perhitungan dengan perhitungan setiap phase pada Plaxis hingga mendapatkan hasil.



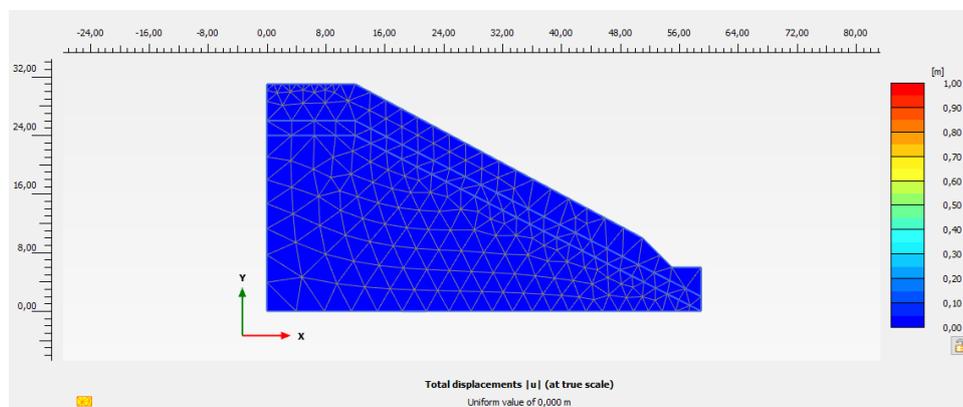
Gambar 4.18 Tahap Perhitungan



Gambar 4.19 Hasil Calculation

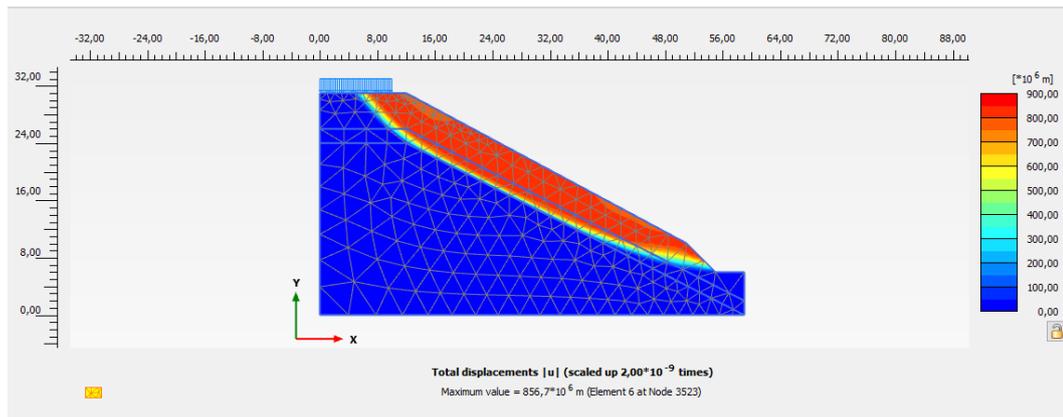
4.2.3 Program Output

1. *Calculation Info*, untuk mendapatkan nilai faktor keamanan lereng. Setelah menetapkan phase-phase perhitungan, maka akan didapatkan nilai safety factor pada phase terakhir



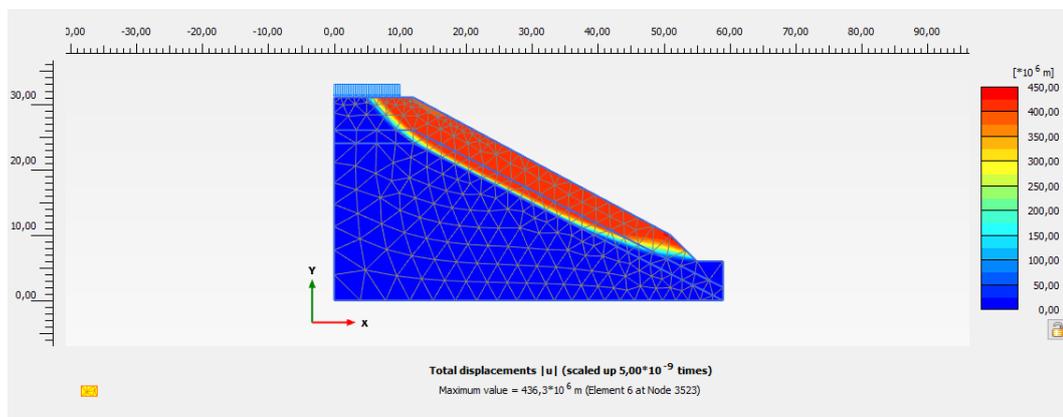
Gambar 4.20 Deformasi Pada Saat Initial Phase

2. Faktor Keamanan dan Bentuk Busur Kelongsoran, dengan menggunakan *type* perhitungan *phi-c reduction*, kita dapat mengetahui faktor keamanan lereng dengan memilih *total incremental* dan melihat nilai Msf (nilai faktor keamanan) dan dengan tampilan *shading* untuk memperlihatkan busur kelongsoran yang terjadi.



ΣM_{sf} - Reached safety fact 1,388

Gambar 4.21 Bentuk Busur Kelongsoran + Beban Kelas II 10 kN/m² (SF : 1.388)



ΣM_{sf} - Reached safety fact 1,387

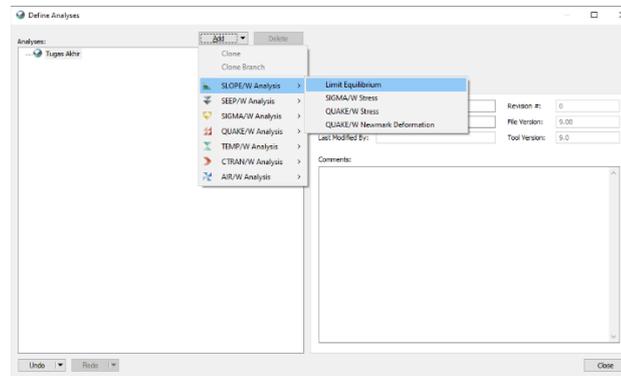
Gambar 4.22 Bentuk Busur Kelongsoran + Beban Kelas I 12,5 kN/m² (SF : 1.387)

4.3 Analisis Stabilitas Lereng dengan SLOPE/W (*Limit Equilibrium Method*)

Perhitungan stabilitas lereng dengan metode LEM dengan bantuan SLOPE/W memiliki tahapan-tahapan yang harus dilalui, yaitu :

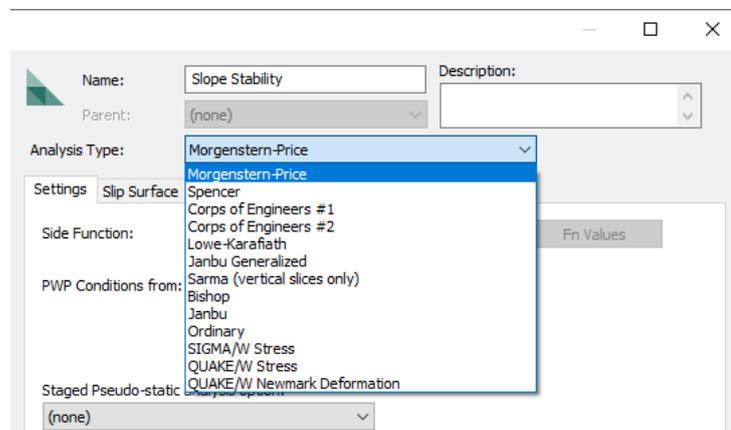
4.3.1 Input

1. Pemilihan metode analisis yang digunakan untuk menghitung faktor keamanan lereng STA 8+200 Ruas Jalan Bagbagan, Jampang Kulon, Sukabumi. Metode yang digunakan yaitu *Limit Equilibrium*.



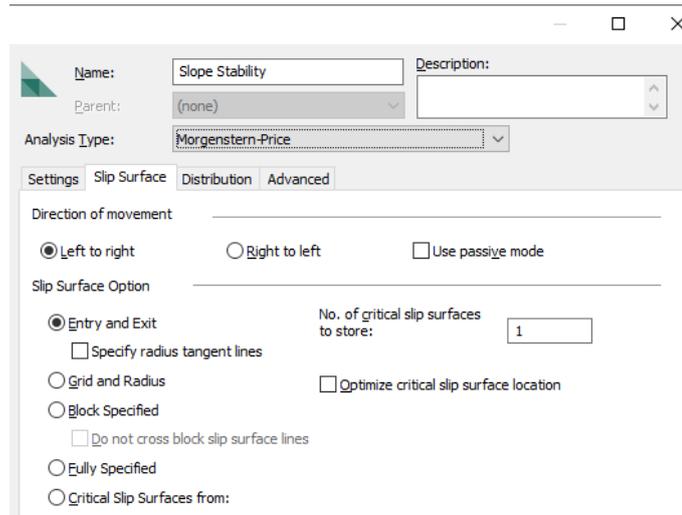
Gambar 4.23 Metode Analisa yang Digunakan

2. Pemilihan tipe analisis yang digunakan yaitu *Morgenstern-Price* karena dalam tipe ini gaya tahan (*moment equilibrium*) dan gaya dorong (*force equilibrium*) diperhitungkan.



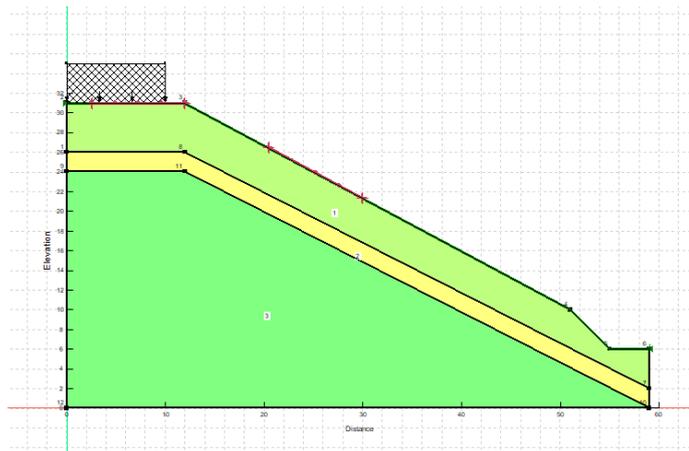
Gambar 4.24 Tipe Analisis Morgenstern-Price

3. Pemilihan tipe longsor (*slip & surface*) yang digunakan yaitu tipe *Entry & Exit* karena lebih praktis, dan longsor didefinisikan dari kanan ke kiri.



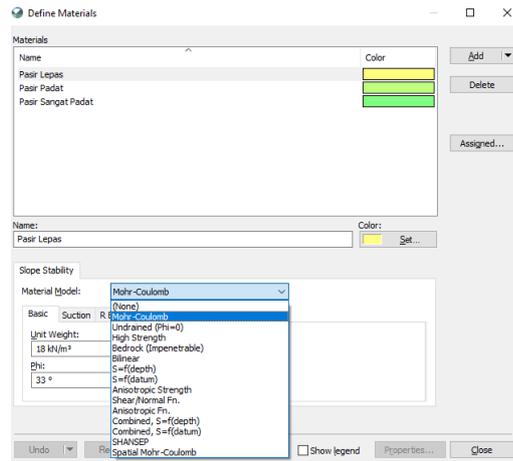
Gambar 4.25 Tipe Slip Surface

4. Pemodelan struktur dengan menggambar pemodelan lereng secara geometri.



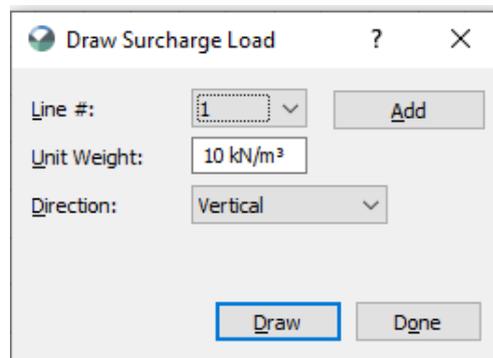
Gambar 4.26 Geometri Lereng

5. Menentukan properti tanah dipilih *strength* model *Mohr-Coulomb*, untuk analisa tegangan total dan tegangan efektif dan lapisan tanah keras dipilih *strength* model *Bedrock*.

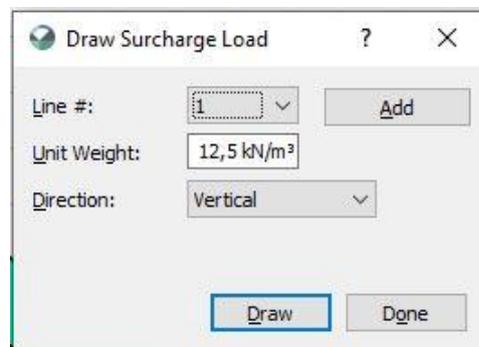


Gambar 4.27 Soil Properties

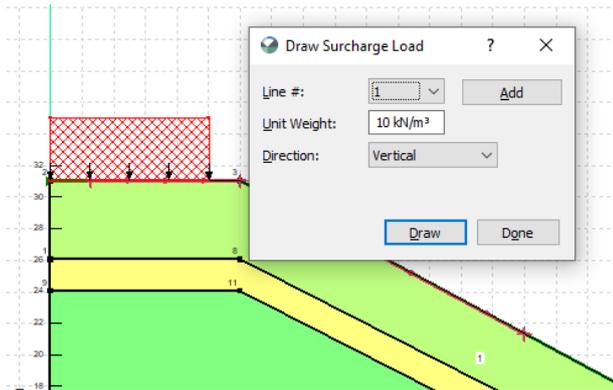
- Menentukan beban yang bekerja, beban perkerasan yang digunakan yaitu jalan kelas II Arteri, Kolektor, Lokal, Lingkungan yaitu sebesar 80 kN lalu dibagi lebar jalan 8 meter menjadi 10 kN/m² dan menggunakan kelas I, Arteri, Kolektor yaitu sebesar 100 kN//m lalu dibagi lebar jalan 8 meter menjadi 12,5 kN/m².



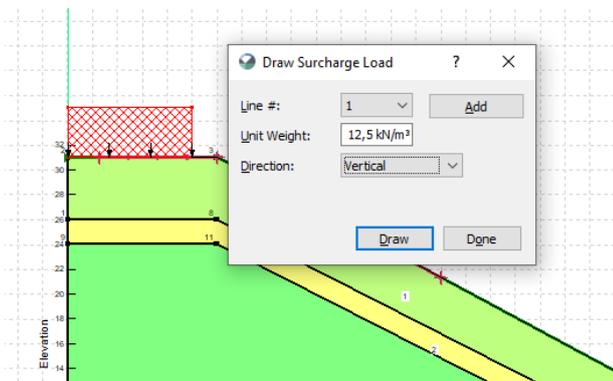
Gambar 4.28 Input Beban Perkerasan Kelas II



Gambar 4.29 Input Beban Perkerasan Kelas I

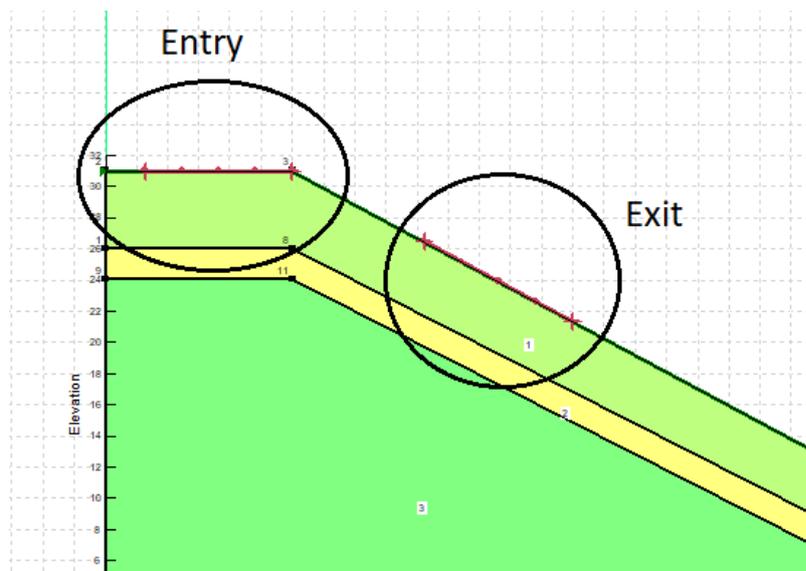


Gambar 4.30 Menggambar Garis Beban Perkerasan Kelas II



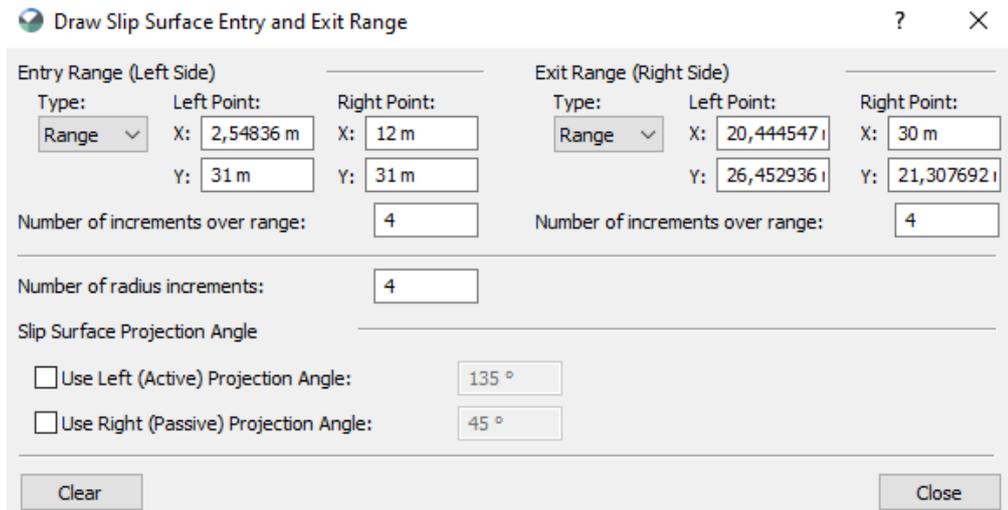
Gambar 4.31 Menggambar Garis Beban Perkerasan Kelas I

7. Menentukan *Slip Surface* menggunakan tipe *Entry & Exit*.



Gambar 4.32 *Slip Surface Entry & Exit*

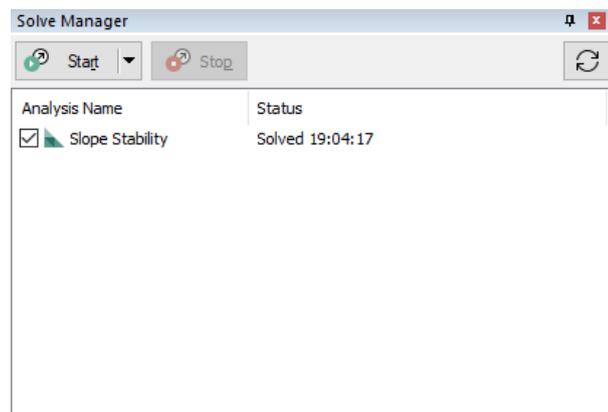
8. Menentukan titik longsor yang akan ditinjau, untuk longsor *Entry* & *Exit* didefinisikan masing-masing menjadi 4 titik.



Gambar 4.33 Jumlah Titik Increment

4.3.2 Solving The Problem

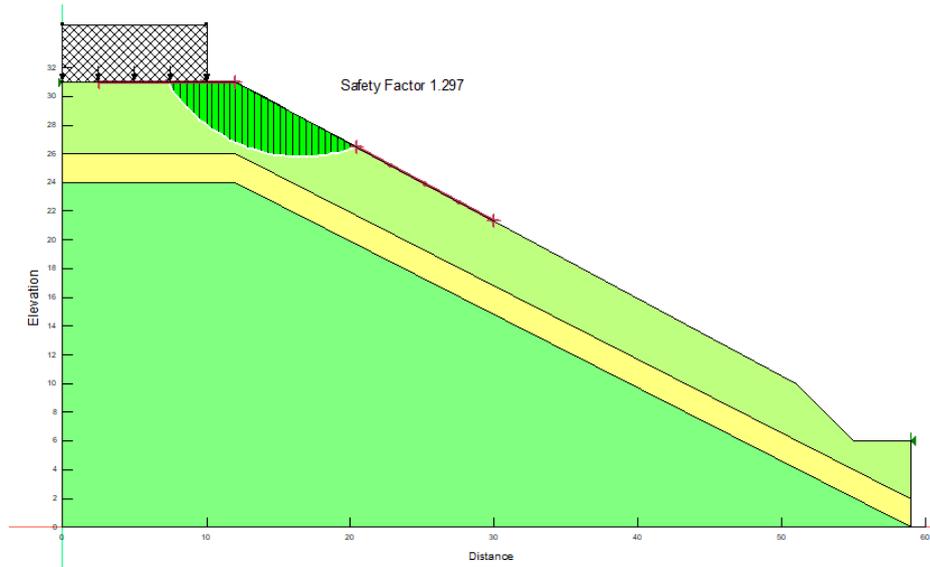
Setelah mendefinisikan bidang longsor, selanjutnya memulai tahapan untuk menghitung analisis, klik *Start* dan hitungan pun dimulai dengan menggunakan tipe analisis *Morgenstern-Price* dan tipe longsor *Slip-Surface*.



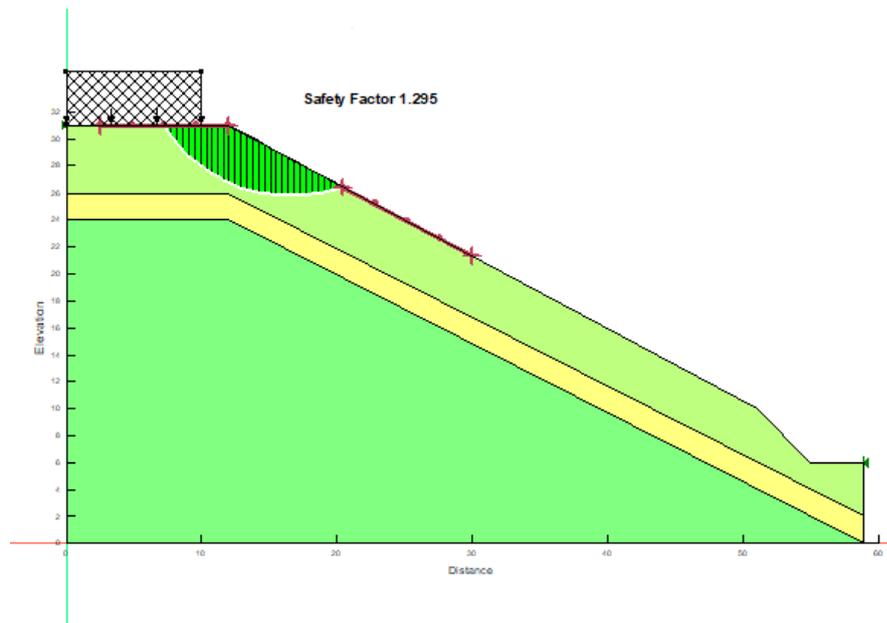
Gambar 4.34 Solving The Problem

4.3.3 Result

Hasil dari analisis yang telah dilakukan pada SLOPE/W menggunakan metode LEM dengan tipe analisa *Morgenstern-Price* dan tipe longsor *Slip-Surface*



Gambar 4.35 Result + Beban Kelas II 10 kN/m² (SF : 1.297)



Gambar 4.36 Result + Beban Kelas I 12,5 kN/m² (SF : 1.295)

4.4 Hasil Analisa Plaxis dan SLOPE/W

- Pada Plaxis, kondisi lereng STA 8+200 Ruas Jalan Bagbagan, Jampang Kulon, Sukabumi dengan kondisi beban perkerasan kelas II sebesar 10 kN/m² mendapatkan nilai *safety factor* 1.388 dan dengan kondisi beban perkerasan kelas I sebesar 12,5 kN/m² mendapatkan nilai *safety factor* 1,387.
- Pada SLOPE/W, kondisi lereng STA 8+200 Ruas Jalan Bagbagan, Jampang Kulon, Sukabumi beban perkerasan kelas II sebesar 10

kN/m² mendapatkan nilai *safety factor* 1.297 dan dengan kondisi beban perkerasan kelas I sebesar 12,5 kN/m² mendapatkan nilai *safety factor* 1,295.

Tabel 4.4 Hasil Analisis Lereng STA 8+200

Lereng STA+200				
No		SF	Beban Jalan	Lebar Jalan
1	Analisis menggunakan Plaxis (FEM)	1.388	10 kN/m²	8 meter
	Analisis menggunakan Plaxis (FEM)	1.387	12,5 kN/m²	8 meter
2	Analisis menggunakan SLOPE/W (LEM)	1.297	10 kN/m²	8 meter
	Analisis menggunakan SLOPE/W (LEM)	1.295	12,5 kN/m²	8 meter

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pada skripsi ini telah dianalisa perbandingan antara *Finite Element Method* dan *Limit Equilibrium Method* terhadap nilai keamanan suatu lereng. Penulis mencoba membandingkan hasil analisis kedalam dua program yaitu Plaxis dan SLOPE/W. Hasil analisa yang telah didapat dengan bantuan program Plaxis dibandingkan dengan SLOPE/W yang penulis dapatkan sehingga menjadi kesimpulan dari analisa lereng STA 8+200 Ruas Jalan Bagbagan, Jampang Kulon, Sukabumi antara lain :

- Nilai faktor keamanan dengan menggunakan *Finite Element Method* pada Plaxis yaitu 1.388 dengan beban 10 kN/m² dan 1,387 dengan beban 12,5 kN/m².
- Nilai faktor keamanan dengan menggunakan *Limit Equilibrium Method* pada SLOPE/W yaitu 1.297 dengan beban 10 kN/m² dan 1,295 dengan beban 12,5 kN/m².
- Hasil Perbandingan dengan menggunakan dua metode pada dua program yang berbeda menghasilkan nilai faktor keamanan sebesar 8%

5.2 Saran

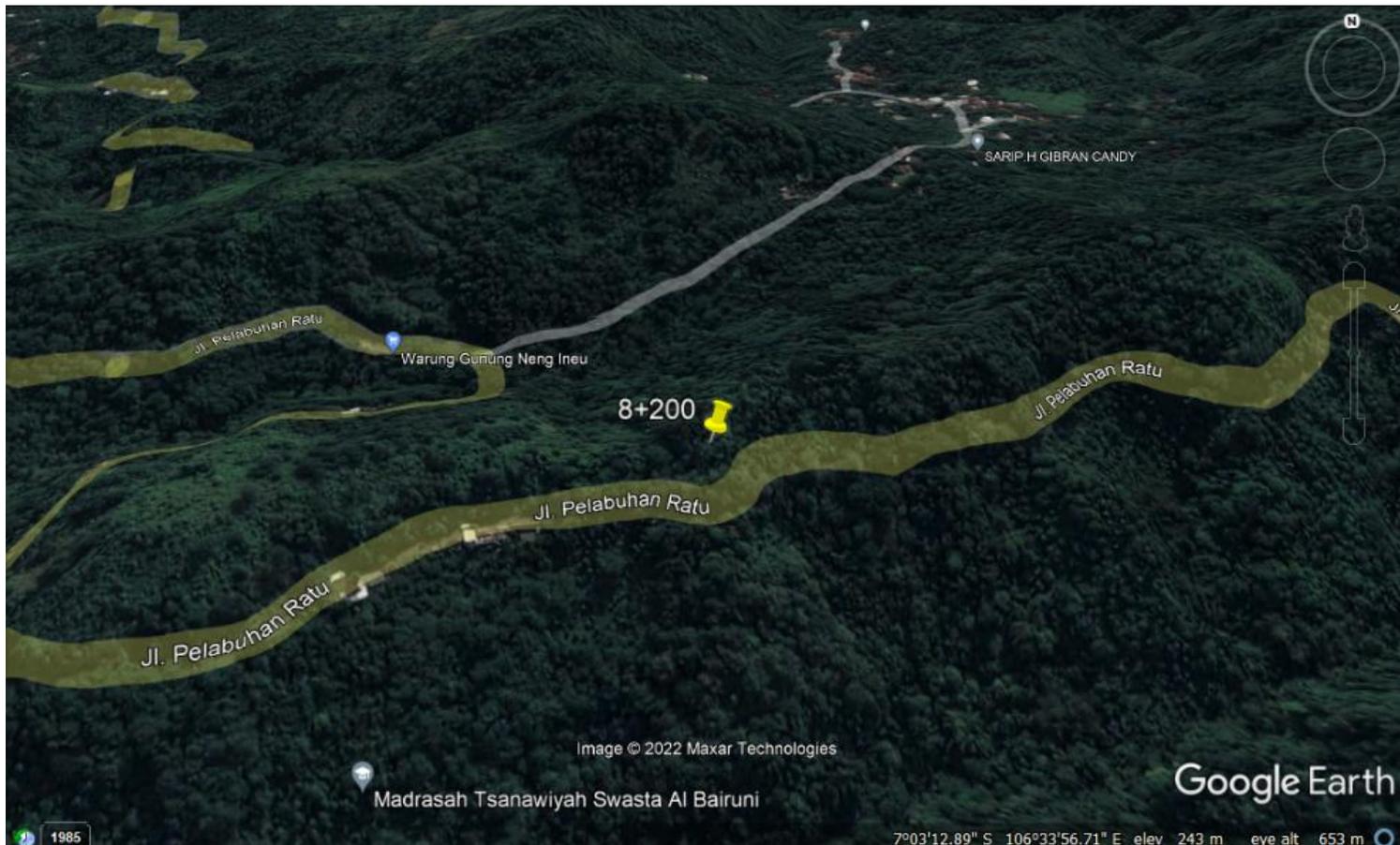
Dengan analisa yang telah dilakukan dengan bantuan program Plaxis dan dibandingkan dengan SLOPE/W, saran yang dapat penulis berikan untuk penelitian selanjutnya, yaitu :

- Dengan hasil nilai factor keamanan lereng menggunakan dua metode yaitu FEM dan LEM pada aplikasi Plaxis dan SLOPE/W, perlu dilakukannya penelitian untuk perkuatan lereng tersebut agar nilai factor keamanannya mencapai >1.5 (aman)
- Untuk penelitian selanjutnya, mencari nilai faktor keamanan dengan metode FEM dapat juga menggunakan aplikasi SLOPE/W tidak selalu menggunakan Plaxis

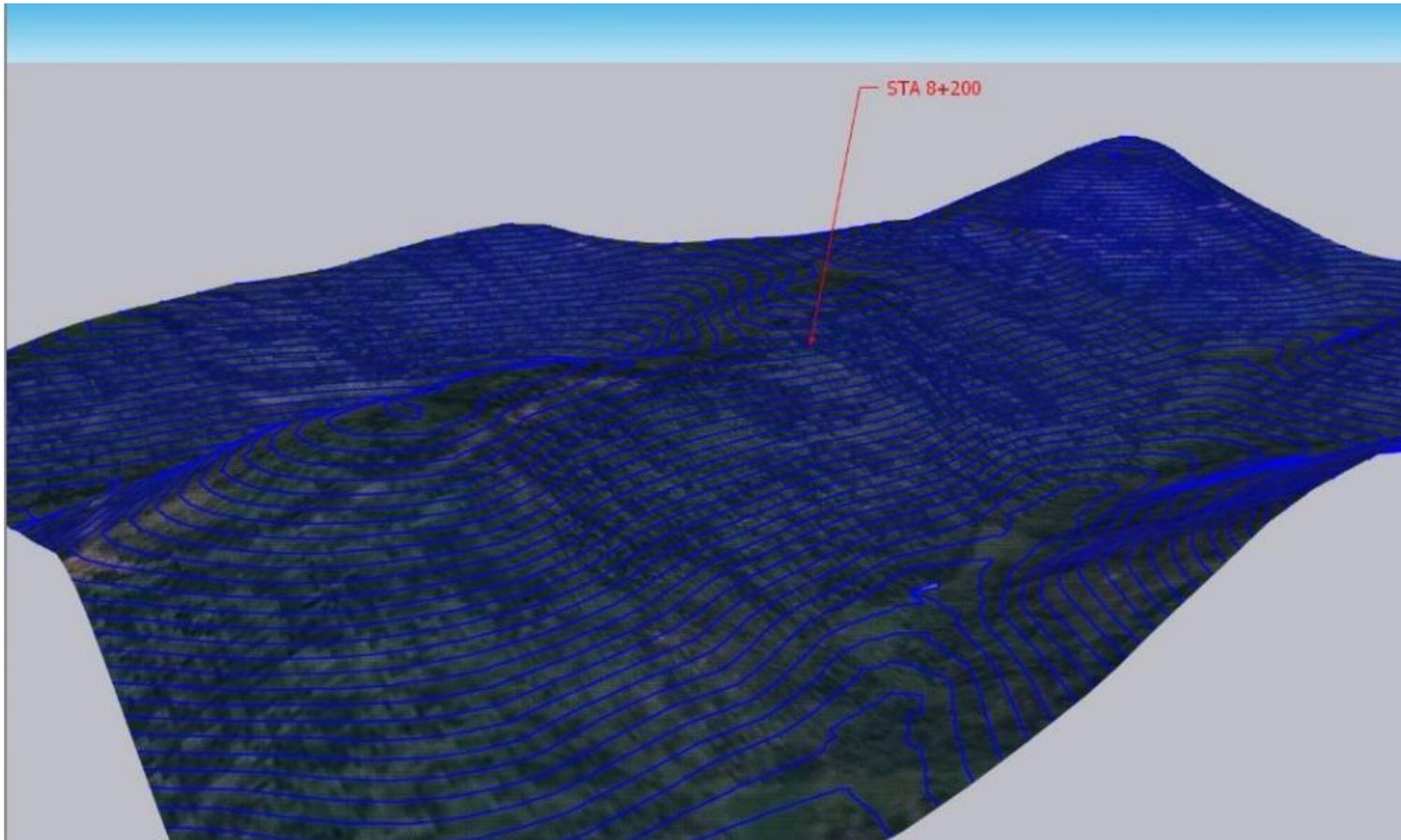
DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Nasional. (2017). SNI 8460-2017. *Persyaratan Perancangan Geoteknik, 8460*, 207.
- Departemen Pekerjaan Umum. (2005). *Manual-Penanganan-Lereng-Jalan-Buku-I- Petunjuk-Umum.Pdf*.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik. Penerbit Erlangga*, 1–300.
- Novotný, J. (2013). Varnes Landslide Classification (1978). *Charles University in Prague, Faculty of Science, Czech Republic, November*, 25 p. URL <http://www.geology.cz/projekt681900/vyuk>.
http://www.geology.cz/projekt681900/vyukove-materialy/2_Varnes_landslide_classification.pdf
- Suwarso Putra, T., Wirya Ardana, M., & Aryati, M. (2010). Analisis Stabilitas Lereng Pada Badan Jalan Dan Perencanaan Perkuatan Dinding Penahan Tanah. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 14(1), 36–42.
- Turangan, V. G. M. P. A. ., & Sompie, O. B. . (2014). Analisis Kestabilan Lereng Dengan Metode Fellenius. *Jurnal Sipil Statik*, 2(1), 37–46.
- Siregar, C. A., Ashidik, F. A. S., & Garnida, H. (2021). Perbandingan Stabilitas Lereng Antara Metode Keseimbangan Batas (LEM) Dan Metode Elemen Hingga (FEM) Studi Kasus: Kereta Api Cepat Indonesia Cina (KCIC) Walini, Kabupaten Bandung Barat. *Seminar Nasional Ketekniksipilan, Infrastruktur Dan Industri Jasa Konstruksi (KIIJK)*, 1(1), 335–343.

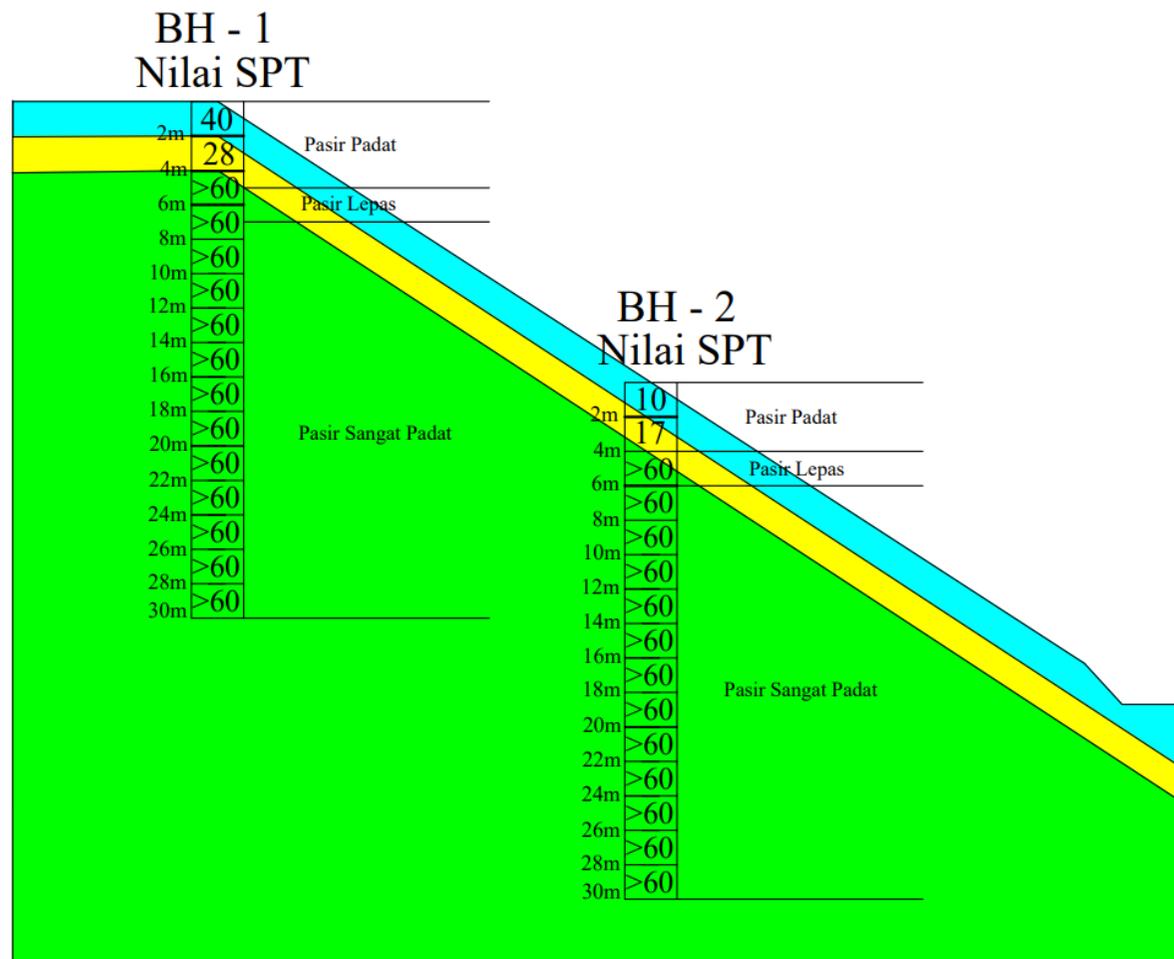
LAMPIRAN



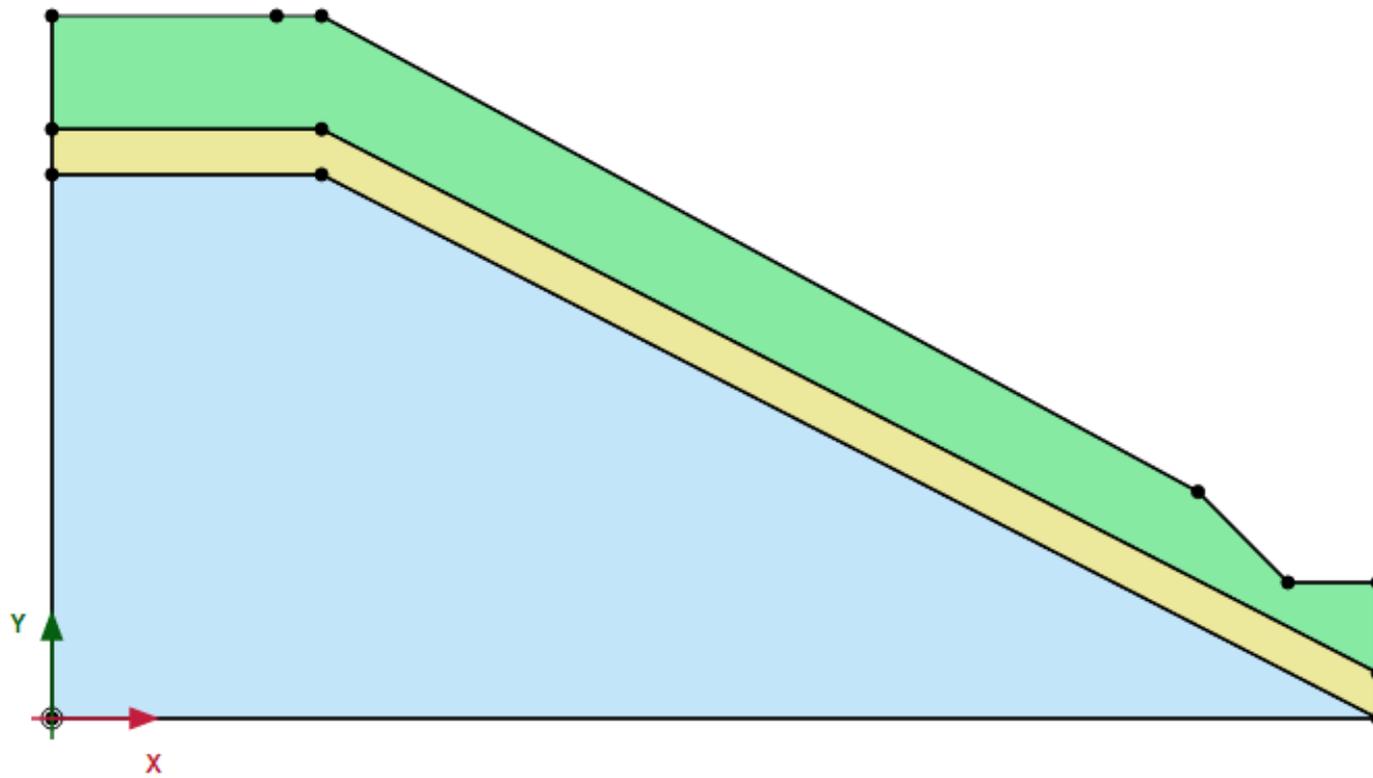
Peta Lokasi Penelitian Tanah STA 8+200 (Ruas Jalan Bagbagan, Jampangkulon)



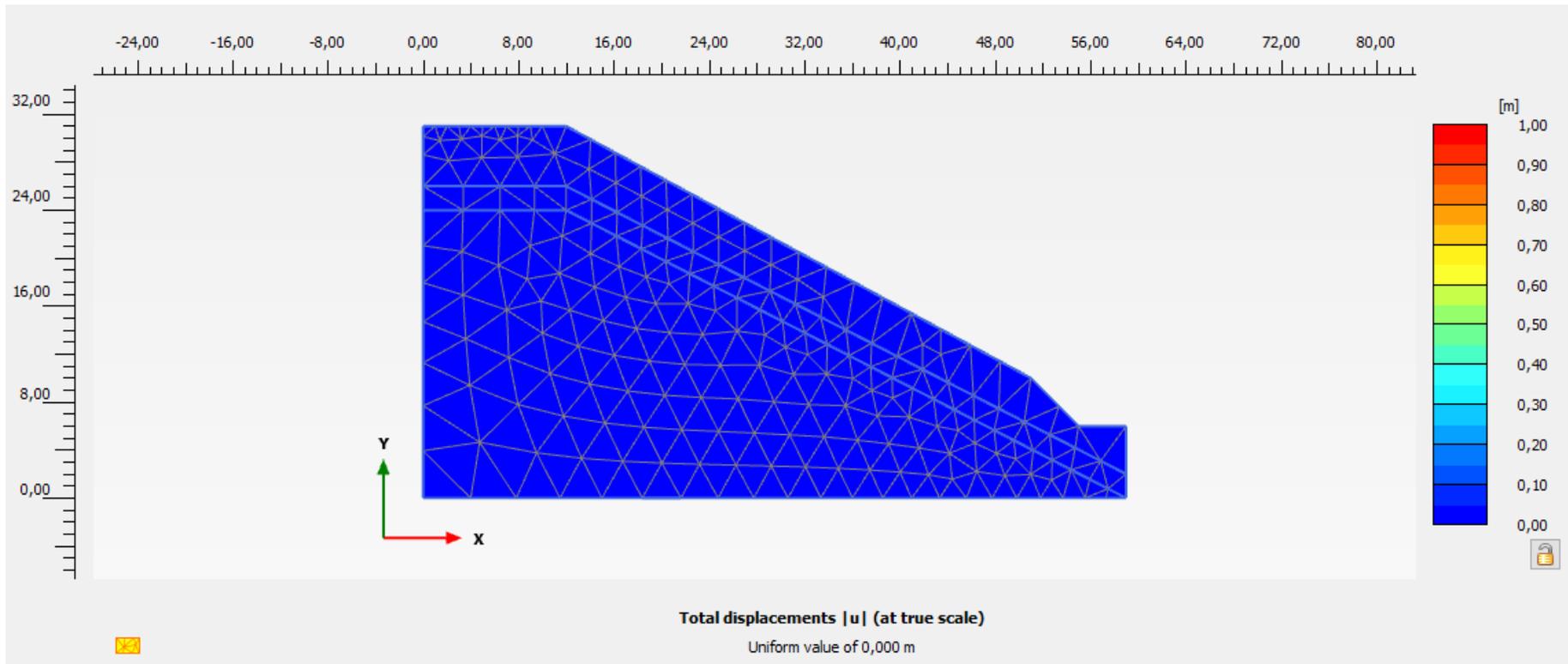
Topografi Lokasi Penelitian Tanah STA 8+200 (Ruas Jalan Bagbagan, Jampangkulon)



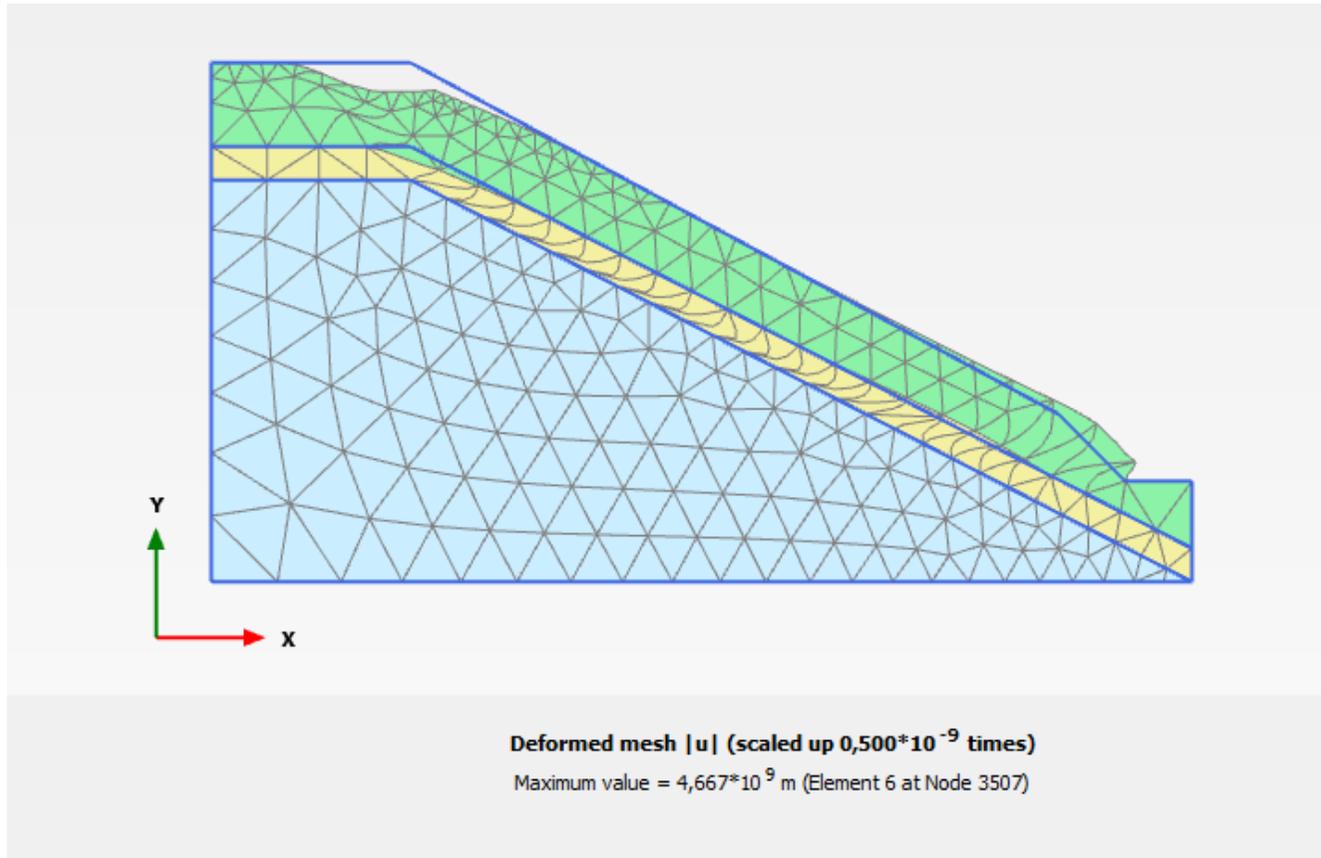
Gambar 1 Titik Uji Bor



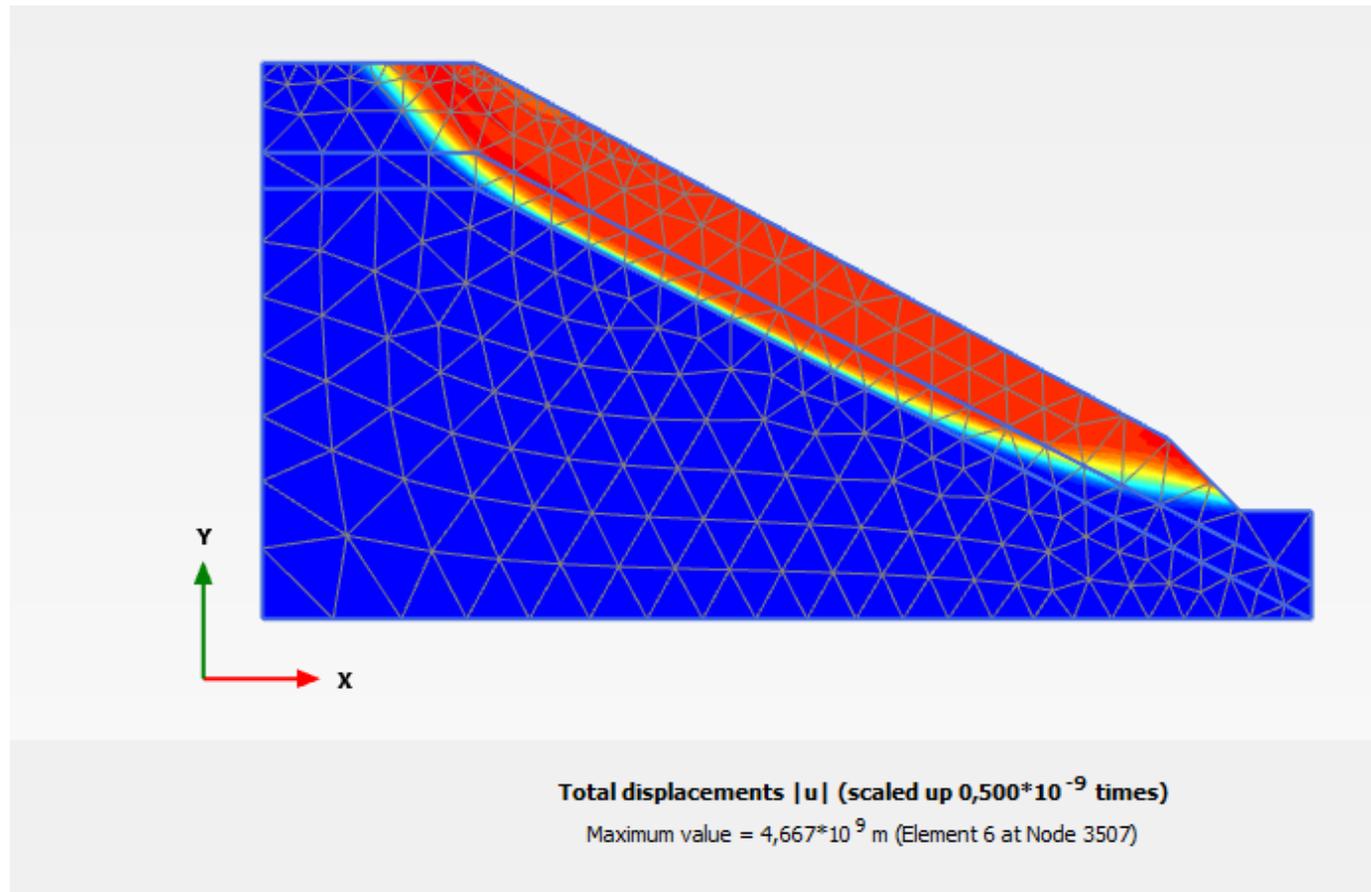
Gambar 2 Kondisi Awal pada PLAXIS



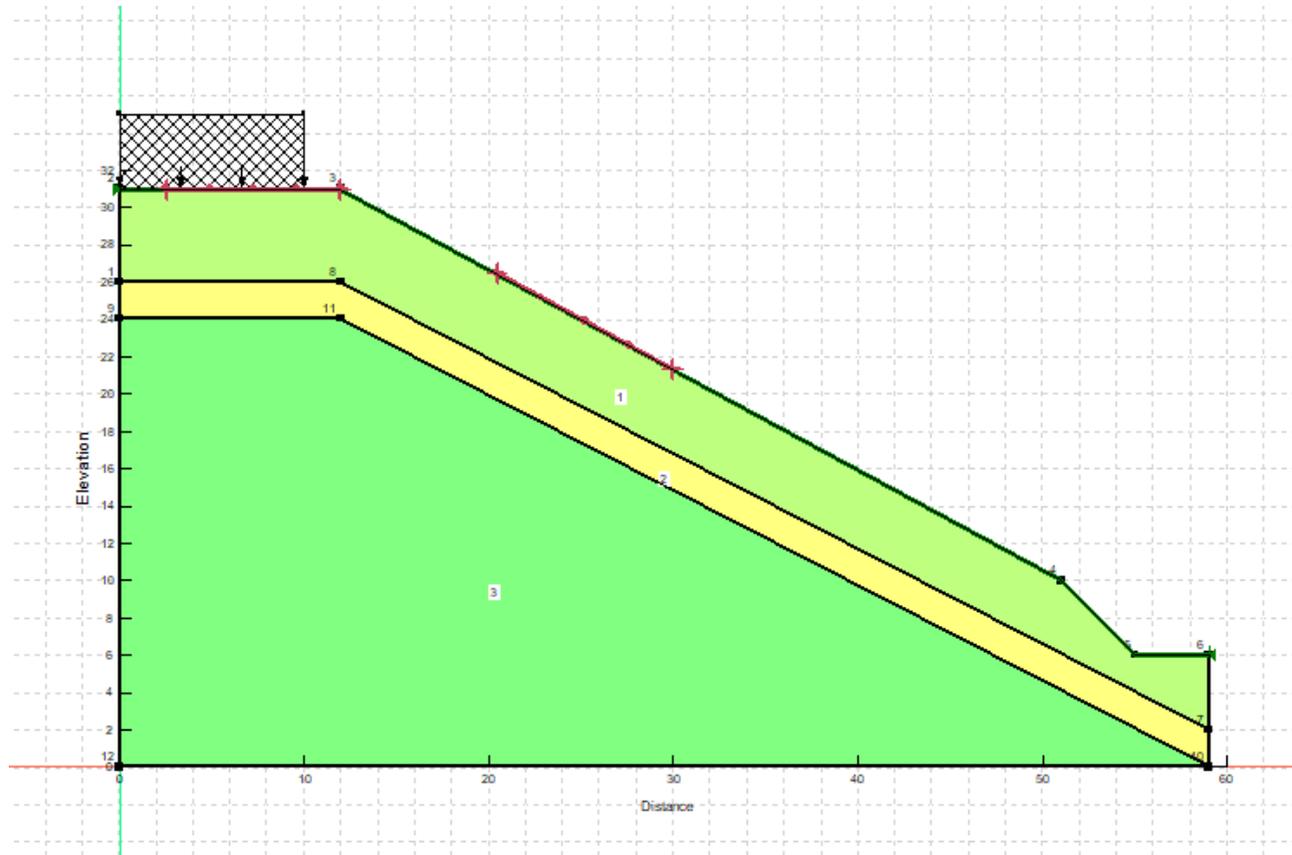
Gambar 3 Deformasi pada Tahap Initial Phase PLAXIS



Gambar 4 Deformasi pada Tahap Safety Phase



Gambar 5 Bentuk Busur Kelongsoran pada PLAXIS



Gambar 6 Kondisi Awal pada SLOPE/W

Project : LONGSORAN JABAR DD-3		Check by : Sri.W	
Location :		Date : Sep. 2022	
Bor location : KM 8 + 200		No. Bor : BH 2	
Laboratory Test Resume			
No. Sample		UDS 1	
Depth		1.50 - 2.00	
Index Properties	symbol	unit	
1. Density	γ	t/m ³	1.778
2. Water content	w	%	24.35
3. Specific of gravity	Gs	-	2.71
Void ratio	e	-	0.90
Porosity	n	-	0.47
Degree of saturation	Sr	%	73.69
4. Plastic limit	PL	%	21.47
Liquid limit	LL	%	37.30
Plasticity index	PI	%	15.82
5. Grain size			
Gravel	G	%	0.40
Sand	S	%	65.57
Silt	M	%	29.54
Clay	C	%	4.49
6. Soil Classification USCS			CL
Engineering properties			
6. Unconfined	q _u	kg/cm ²	
Compression Test	q _u *	kg/cm ²	
	S _t	-	
	c _u	kg/cm ²	
7. Triaxial - UU Test	σ_1	°	22.284
	c	kg/cm ²	0.063
8. Triaxial - CU Test	σ_1	°	
	c	kg/cm ²	
9. Direct Shear Test	σ_1	°	
	c	kg/cm ²	
10. Consolidation Test	Cc	-	0.245
	C _v	cm ² /sec	1.528E-03
11. Permeability	k	cm/sec	

Gambar 7 Resume Uji Laboratorium

RESULT OF ATTERBERG LIMIT							
Project (Garis/daur) : PENYELIDIKAN TANAH KMP Type of sample (jenis sampel) : DS 1 No. of sample (no. sampel) : BH 1 Depth (kedalaman) : 1.50 - 2.00 m Date of (tanggal) : - Sample accepted (diambil/diterima) : - Sample tested (diambil/diuj) : - Test finished (diambil/diakhiri) : Sept 2022		Location (tempat) : STA 0+200 (Bagbagan-J.Kulon) Natural water content = W_n (Under Air Sat) : 19.06 % Specific gravity (berat jenis) = G_s : 2.6705 Type of soil (jenis Tanah) : Color (warna) : Coklat tua Catatan : tanah disaring/tidak disaring					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
Test number (no. uji)		1	2	3	4		
Container number (no. Gelas)		AA2	FR21	G7	KG20	DS5	KK54
Number of Blows (jumlah ketukan)		41	32	20	12	-	-
Weight of container + wet soil = W_1 (gram)	(Beras Gelas + Tanah Basah)	36.42	39.59	41.86	36.40	31.32	30.49
Weight of container + dry soil = W_2 (gram)	(Beras Gelas + Tanah Kering)	32.84	34.19	35.59	31.09	28.57	27.88
Weight of water = $W_1 - W_2 = W_3$ (gram)	(Beras Air)	3.58	5.40	6.27	5.31	2.75	2.61
Weight of container = W_4 (gram)	(Beras Gelas)	21.43	18.04	18.45	17.65	18.84	18.15
Weight of dry soil = $W_2 - W_4 = W_5$ (gram)	(Beras Tanah Kering)	11.41	16.15	17.14	13.44	9.73	9.73
Water content = $(W_3/W_5) \times 100 = w$ (%)	(Under air)	31.38	33.44	36.58	39.51	28.26	26.82
Average (rata-rata)						27.54	
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 83-1987-1998)					
		SOIL TYPE (SNI 83-1987-1998)					
		SHRINKAGE LIMIT (SNI 83-86-1984-85)					
		LIQUID LIMIT (SNI 83-1987-1998)					
		PLASTIC LIMIT (SNI 83-1984-1998)					
		PLASTICITY INDEX (SNI 83-1984-1998)					
		LIQUID INDEX (SNI 8					

Project : LONGSORAN JABAR DD-3
 Location :
 Bor location : KM 8 + 200

Check by : Sri.W
 Date : Sep. 2022
 No. Bor : BH 2

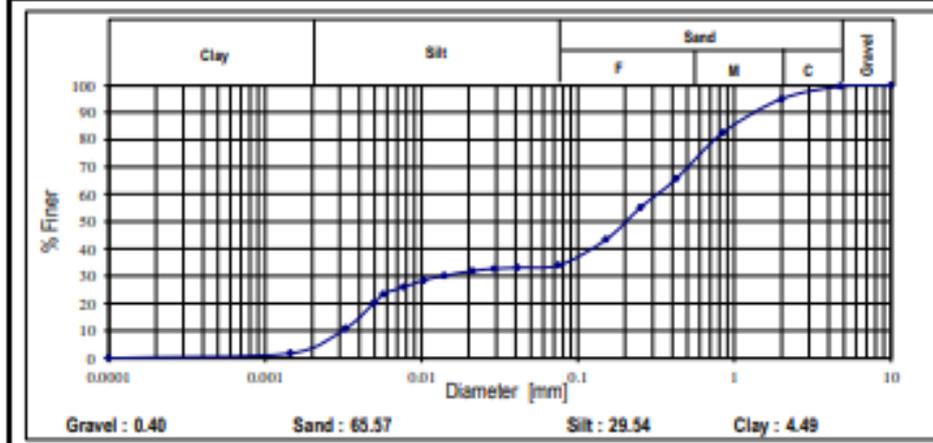
Grain Size Analysis

No. Sample : UDS 1 1,50 - 2,00 Sieve $W_{total} = 100$ gram

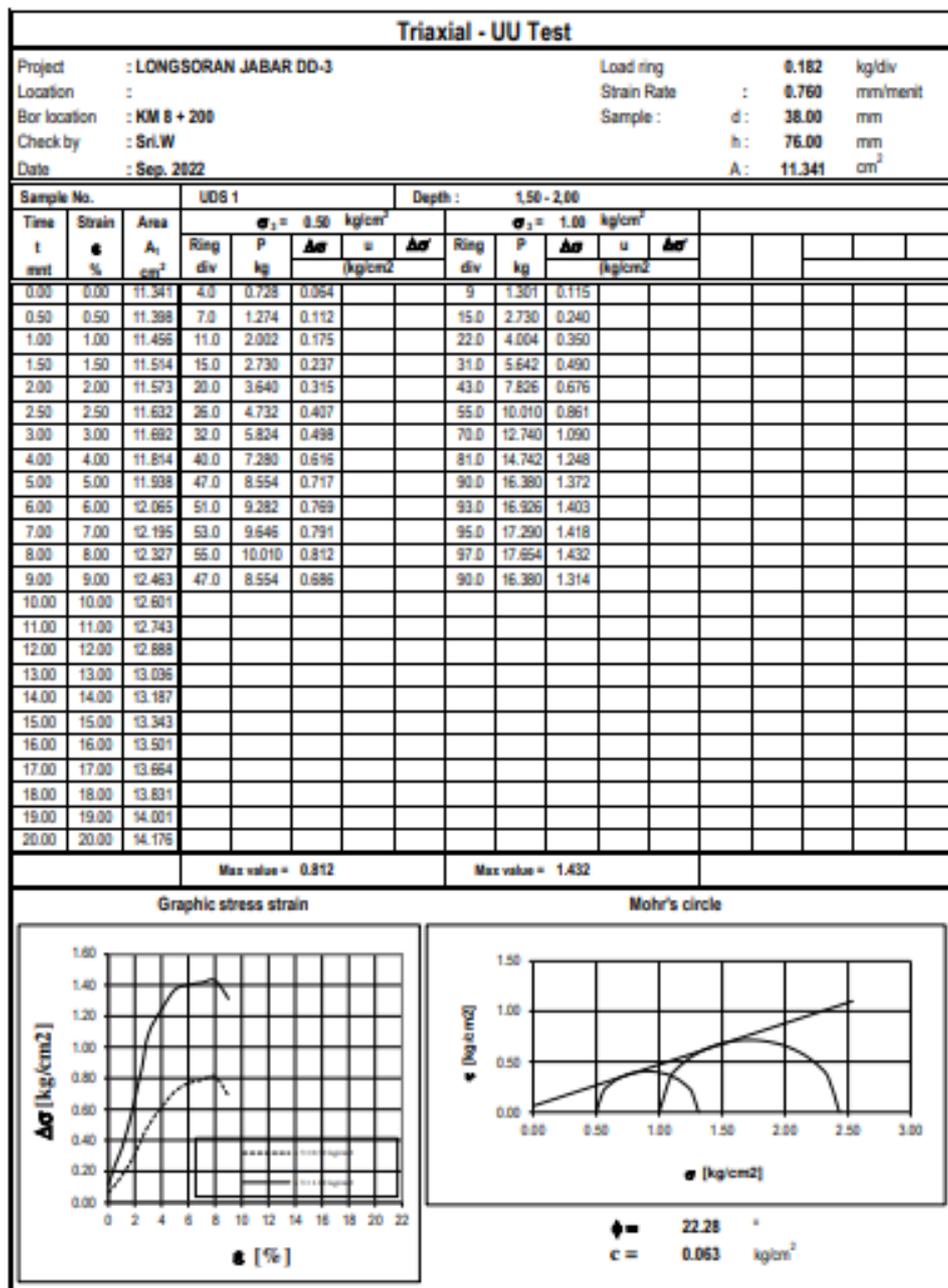
Sieve No.	Diameter [mm]	Wt. retained [gram]	% Retained	% passing
4	4.750	0.40	0.40	99.60
10	2.000	4.60	4.60	95.00
20	0.840	12.42	12.42	82.58
40	0.425	16.75	16.75	65.83
60	0.250	10.63	10.63	55.20
100	0.150	11.79	11.79	43.41
200	0.075	9.38	9.38	34.03
		65.97	65.97	

No. Sample : UDS 1 1,50 - 2,00 Hydrometer $W_s = 64.28$

Date	Time	Rh	T	C	Rh + C	Zr	M	D	N	N'
	0	40.5	26	0	40.5	5.131	0.0124	0.0000	99.85	33.98
	0.25	40	26	0	40.0	5.265	0.0124	0.0569	98.62	33.56
	0.5	39.5	26	0	39.5	5.399	0.0124	0.0407	97.38	33.14
	1	39	26	0	39.0	5.534	0.0124	0.0291	96.15	32.72
	2	38	26	0	38.0	5.802	0.0124	0.0211	93.69	31.88
	5	36	26	0	36.0	6.339	0.0124	0.0140	88.76	30.20
	10	34	26	0	34.0	6.877	0.0124	0.0103	83.83	28.53
	20	31	26	0	31.0	7.682	0.0124	0.0077	76.43	26.01
	40	28	26	0	28.0	8.488	0.0124	0.0057	69.03	23.49
	60	24	26	0	24.0	9.563	0.0124	0.0049	59.17	20.14
	180	13	26	0	13.0	12.517	0.0124	0.0033	32.05	10.91
	1140	2	26	0	2.0	15.472	0.0124	0.0014	4.93	1.68



Gambar 10 Hasil Grain Size Analysis



Gambar 11 Hasil Uji Triaxial