

TUGAS AKHIR

ANALISIS STABILITAS DAN PENURUNAN TANGGUL LAUT DENGAN PENGGUNAAN MATRAS BAMBU PADA JALAN TOL SEMARANG – DEMAK (*STABILITY AND SETTLEMENT ANALYSIS OF COASTAL EMBANKMENT WITH BAMBOO MATTRESS REINFORCEMENT ON SEMARANG-DEMAK TOLL ROAD*)

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



HASNA SYAFA SALSABILA

21511123

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

2025

TUGAS AKHIR

ANALISIS STABILITAS DAN PENURUNAN TANGGUL LAUT DENGAN PENGGUNAAN MATRAS BAMBU PADA JALAN TOL SEMARANG – DEMAK

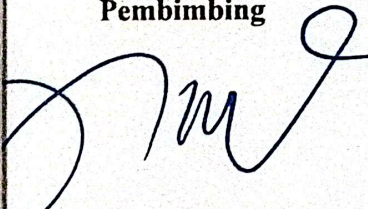
Disusun Oleh

Hasna Syafa Salsabila
21511123

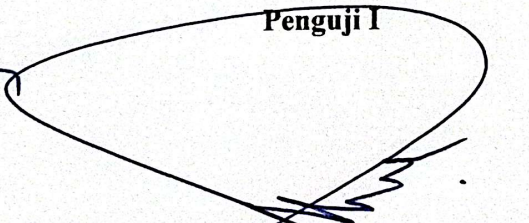
Telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal 6 November 2025
Oleh Dewan Penguji

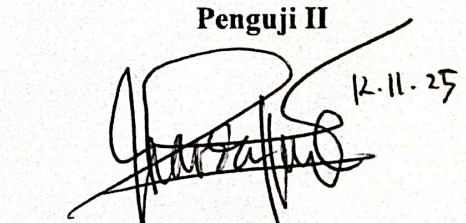
Pembimbing


Nur Amalina, S.T., M.Eng.
215111305

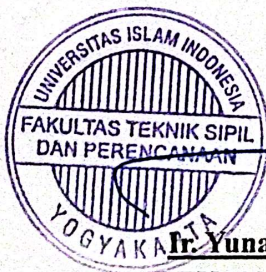
Penguji I


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

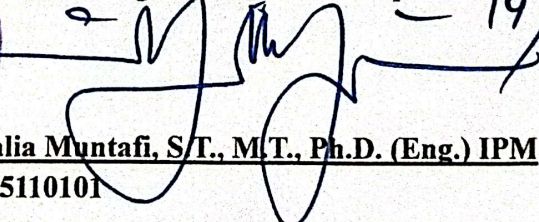
Penguji II


Astriana Hardawati, S.T., M.Eng.
NIK: 165111301

Mengesahkan,



Ketua Program Studi Teknik Sipil


Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. (Eng.) IPM
NIK: 095110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

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

Yogyakarta, 6 November 2025

Yang membuat pernyataan,



Hasna Syafa Salsabila

(21511123)

TUGAS AKHIR INI DIPERSEMBAHKAN UNTUK MAMA
YANG CANTIK JELITA, YANG PALING KAKAK CINTAI DAN
KAKAK SAYANGI SEPENUH HATI

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul *Analisis Stabilitas dan Penurunan Tanggul Laut dengan Penggunaan Matras Bambu pada Jalan Tol Semarang – Demak*. Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat strata satu di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

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

1. Ibu Anisa Nur Amalina, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir dan Dosen Pembimbing Akademik yang selalu membantu penulis, selalu memberikan bimbingan, masukan, dan nasihat dalam penyusunan Tugas Akhir ini,
2. Ibu Dr. Hanindya Kusuma Artati, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji 1,
3. Ibu Astriana Hardawati, S.T., M.Eng. selaku Dosen Penguji 2,
4. Mama tercinta, mama Atiek Luthfia Cahyani, mama terbaik yang selalu ada setiap waktu, selalu memberikan semangat, dan motivasi kepada penulis untuk dapat segera menyelesaikan Tugas Akhir,
5. Bapak Fahmi Amrusi selaku pihak BBPJT Jateng – DIY yang selalu menyediakan data pendukung Tugas Akhir ini,
6. Adik penulis, Irfan Ahmad Fauzi, yang selalu menjadi hiburan penulis dan selalu menyemangati dalam penyusunan Tugas Akhir,
7. Ayah penulis, Ayah Haryadi, yang juga selalu memberikan semangat dalam menyelesaikan Tugas Akhir,
8. Sahabat penulis, Sahla, VAHA, teman-teman penulis di Teknik Sipil UII, dan lainnya, yang juga memberikan semangat dalam penyusunan Tugas Akhir,

9. Mas Azmi Aufa Itikhar, yang membantu penulis dalam pengoperasian program PLAXIS 2D hingga selesainya Tugas Akhir ini.

Akhirnya Penulis berharap agar Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang membaca.

Yogyakarta, 6 November 2025

Penulis



Hasna Syafa Salsabila

21511123

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
HALAMAN DEDIKASI	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
ABSTRACT	xv
ABSTRAK	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Umum	6
2.2 Analisis Stabilitas Lereng	6
2.3 Penurunan Tanah Lunak	7
2.4 Pengaruh Penggunaan Matras Bambu terhadap Jenis Tanah Lunak	9
2.5 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu	13
2.6 Perbandingan Penelitian Terdahulu	14
BAB III LANDASAN TEORI	23
3.1 Definisi dan Sistem Klasifikasi Tanah	23
3.2 Parameter Pengujian Tanah	25
3.2.1 Kadar Air	25

3.2.2 Berat Volume Tanah	25
3.2.3 Berat Jenis Tanah	27
3.2.4 Kuat Geser Tanah	27
3.2.5 Koefisien Permeabilitas Tanah	29
3.2.6 Sudut Dilatasi (ψ)	30
3.2.7 Poisson Ratio (μ)	30
3.2.8 Angka Pori dan Porositas	31
3.3 Konsolidasi dan Penurunan	31
3.3.1 Parameter Konsolidasi	32
3.3.2 Penurunan Konsolidasi	37
3.4 Stabilitas Lereng	40
3.4.1 Kelongsoran Lereng	40
3.4.2 Pengaruh Longsor	40
3.4.3 Jenis Kelongsoran Tanah	42
3.4.4 Parameter Stabilitas Lereng	44
3.4.5 Teori Stabilitas Lereng	44
3.5 Perkuatan Tanah	46
3.5.1 Perkuatan Tanah dengan Geosintetik	47
3.6 Bambu	49
3.6.1 Sifat Mekanika Bambu	50
3.6.2 Keunggulan Bambu sebagai Bahan Konstruksi	52
3.7 Cerucuk	52
3.7.1 Tujuan Penggunaan Cerucuk	52
3.7.2 Daya Dukung Cerucuk pada Tanah Lunak	52
3.7.3 Kegagalan Geser pada Cerucuk	54
3.8 Pembebanan Lalu Lintas	55
3.9 <i>PLAXIS</i>	55
BAB IV METODE PENELITIAN	57
4.1 Tinjauan Umum	57
4.2 Data Penelitian	57
4.3 Lokasi Penelitian	58

4.4	Tahap Penelitian	58
4.5	Analisis Data	59
4.5.1	Data Original Desain (DED)	59
4.5.3	Data Parameter Tanah	60
4.5.4	Data Parameter Geotekstil	61
4.5.5	Data Parameter Bambu	61
4.5.6	Data Beban Lalu Lintas	62
4.5.7	Data <i>Prevabricated Vertical Drain</i> (PVD)	62
4.6	Analisis Data Menggunakan <i>PLAXIS</i>	62
4.6.1	<i>Plaxis Input</i>	63
4.6.2	<i>Plaxis Calculation</i>	64
4.6.3	<i>Plaxis Output</i>	64
4.7	Bagan Alir Penelitian	65
BAB V PEMBAHASAN		68
5.1	Deskripsi Umum	68
5.2	Kebutuhan Data Analisis	68
5.3	Analisis Stabilitas dan Penurunan pada Timbunan Jalan Tanpa Perkuatan	70
5.3.1	Analisis Menggunakan Program PLAXIS V.21	70
5.3.2	Perhitungan Faktor Keamanan dengan Metode Fellenius	74
5.4	Analisis Timbunan Jalan dengan Perkuatan Matras Bambu dan Cerucuk	78
5.4.1	Analisis Timbunan Jalan Sesuai Original Desain (DED) dengan Program PLAXIS V.21	78
5.4.2	Perhitungan Daya Dukung Cerucuk secara Manual	82
5.5	Alternatif Desain Baru untuk Timbunan Jalan dengan Perkuatan Matras Bambu, Geotekstil, dan Cerucuk	84
5.5.1	Parameter Tanah Uji	Error! Bookmark not defined.
5.5.2	Analisis Desain Baru dengan Program PLAXIS V.21	88
5.6	Perbandingan Hasil Analisis Timbunan dengan Perkuatan Desain Baru dengan Desain Original	91

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	94
6.1 Kesimpulan	94
6.2 Saran	95
DAFTAR PUSTAKA	97
LAMPIRAN	100

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Saat Ini	14
Tabel 3.1 Hubungan N-SPT dengan Konsistensi Tanah Lempung	24
Tabel 3.2 Koefisien Permeabilitas Tanah	29
Tabel 3.3 Poisson Ratio (ν)	30
Tabel 3.4 Nilai Faktor Keamanan Lereng	46
Tabel 4.1 Parameter Tanah	60
Tabel 4.2 Data Parameter Geotekstil	61
Tabel 4.3 Data Parameter Bambu	61
Tabel 4.4 Beban Lalu Lintas untuk Analisa Stabilitas	62
Tabel 5.1 Ketinggian Struktur Tanah Timbunan	70
Tabel 5.2 Perhitungan Setiap Irisan Timbunan Lereng	77
Tabel 5.3 Parameter Tanah Analisis Desain Terbaru	87
Tabel 5.4 Rekapitulasi Nilai Faktor Keamanan	91
Tabel 5.5 Rekapitulasi Nilai Penurunan	92

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Diagram Fase Tanah	26
Gambar 3.2	Grafik Keruntuhan Mohr-Coulomb	28
Gambar 3.3	Indeks Pemampatan pada Grafik $e - \log \sigma'$	35
Gambar 3.4	Indeks Pemampatan Kembali pada Grafik $e - \log \sigma'$	37
Gambar 3.5	Kondisi Lereng Akibat Pengaruh Rangkak	42
Gambar 3.6	Bentuk Longsoran Rotasi	43
Gambar 3.7	Bentuk Longsoran Translasi	44
Gambar 3.8	Geotekstil Anyam	47
Gambar 3.9	Geotekstil Nir-anyam	48
Gambar 3.10	Material Bambu yang Digunakan	51
Gambar 4.1	Peta Lokasi Penelitian	58
Gambar 4.2	Geometri Potongan Melintang Original Desain (DED)	59
Gambar 4.3	Bagan Alir Penelitian	67
Gambar 5.1	Desain Cerucuk Bambu	69
Gambar 5.2	Desain Geometri Jalan	70
Gambar 5.3	Desain Pemodelan Timbunan Tanpa Perkuatan	71
Gambar 5.4	Jaringan Elemen Timbunan Jalan Tanpa Perkuatan	71
Gambar 5.5	Tabel Susunan Phases Timbunan Tanpa Perkuatan	72
Gambar 5.6	Bentuk Total Displacement Timbunan Tanpa Perkuatan	73
Gambar 5.7	Hasil Kalkulasi Faktor Keamanan Timbunan Tanpa Perkuatan	73
Gambar 5.8	Bentuk Geometri Lereng pada Irisan Metode Fellenius	74
Gambar 5.9	Desain Pemodelan Timbunan Jalan dengan Perkuatan Sesuai Original Desain (DED)	79
Gambar 5.10	Jaringan Elemen Timbunan Jalan dengan Perkuatan Matras Bambu, Cerucuk, dan Geotekstil	79
Gambar 5.11	Tabel Susunan Phases Timbunan dengan Perkuatan sesuai Original Desain (DED)	80

Gambar 5.12	Bentuk Total Displacement Timbunan dengan Perkuatan sesuai Original Desain (DED)	81
Gambar 5.13	Hasil Kalkulasi Faktor Keamanan Timbunan dengan Perkuatan sesuai Original Desain (DED)	81
Gambar 5.14	Desain Pemodelan Timbunan Jalan dengan Perkuatan pada Desain Baru	88
Gambar 5.15	Jaringan Elemen Timbunan Jalan dengan Perkuatan Matras Bambu, Cerucuk, dan Geotekstil pada Desain Baru	89
Gambar 5.16	Tabel Susunan Phases Timbunan dengan Perkuatan pada Desain Baru	89
Gambar 5.17	Bentuk Total Displacement Timbunan pada Desain Baru	90
Gambar 5.18	Hasil Kalkulasi Faktor Keamanan untuk Desain Baru dengan Perkuatan	90
Gambar 5.19	Grafik Penurunan Timbunan Jalan	92

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 Data Hasil Pengujian Laboratorium	101
--	-----

ABSTRACT

The Semarang–Demak Toll Road was constructed as a sea dike as well as a transportation infrastructure along the northern coast of Central Java. The subsoil conditions, which are dominated by very soft clay, pose a high risk of slope instability and significant consolidation settlement on the 14.3-meter-high embankment. This study was conducted to analyze the stability and settlement behavior of the sea dike with and without bamboo mat reinforcement.

Numerical analysis was carried out using PLAXIS 2D software with an undrained soil model approach. Soil parameters were obtained from laboratory test results and empirical correlations to represent field conditions accurately. Simulations were performed on several design variations, including the embankment without reinforcement, the initial design (DED), and a modified design with a combination of bamboo mattress, bamboo piles, geotextile, and *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) reinforcements, to evaluate their influence on the stability and deformation of the embankment.

The results of the stability and settlement analysis show that the design without reinforcement and the initial DED design produced a *Safety Factor* (SF) of only 1.00, indicating an unsafe condition against failure. After modification with combined reinforcements, the SF increased to 1.864, exceeding the required safety limit ($SF > 1.3$). The total deformation of the embankment was reduced from 3,100 m (unreinforced) and 7,550 m (initial design) to 0,7013 m with the complex reinforcement design. Thus, the application of bamboo mat reinforcement is proven to be effective in enhancing stability and reducing settlement of the sea dike embankment, offering an economical and environmentally friendly solution for infrastructure development on soft soil.

Keywords: Sea Dike, Settlement, Slope Stability, Bamboo Mattress, PLAXIS 2D

ABSTRAK

Jalan Tol Semarang – Demak dibangun sebagai tanggul laut sekaligus infrastruktur transportasi di wilayah pantai utara Jawa Tengah. Kondisi tanah yang didominasi oleh lempung sangat lunak menimbulkan potensi ketidakstabilan lereng dan penurunan konsolidasi yang besar pada timbunan setinggi 14,3 meter. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui stabilitas dan penurunan tanggul laut dengan dan tanpa perkuatan matras bambu.

Analisis numerik dilakukan dengan menggunakan program PLAXIS 2D dengan pendekatan model tanah *undrained*. Parameter tanah diperoleh dari hasil uji laboratorium dengan korelasi empiris untuk memperoleh nilai yang sesuai dengan kondisi lapangan. Simulasi dilakukan pada beberapa variasi desain, yaitu timbunan jalan tanpa perkuatan, desain awal (DED), serta desain dengan kombinasi perkuatan berupa matras bambu, cerucuk, geotekstil, dan *Prevabrication Vertical Drain* (PVD) untuk mengetahui pengaruh terhadap stabilitas dan deformasi timbunan.

Hasil dari analisis stabilitas dan penurunan yang dilakukan, diketahui bahwa pada desain tanpa perkuatan dan desain awal (DED), nilai *Safety Factor* (SF) hanya mencapai 1,00, sehingga tergolong tidak aman terhadap kelongsoran. Setelah dilakukan modifikasi desain sesuai kebutuhan lapangan dengan penambahan perkuatan berupa matras bambu, cerucuk, geotekstil, dan PVD, nilai SF meningkat hingga 1,864 yang telah melampaui batas aman yang disyaratkan ($SF > 1,3$). Dari total deformasi yang dialami timbunan, penurunan tanpa perkuatan dan desain awal mencapai 3,100 meter dan 7,550 meter. Sedangkan desain dengan perkuatan kompleks menjadi 0,7013 meter. Dengan demikian, penerapan matras bambu efektif dalam meningkatkan stabilitas serta mengurangi penurunan timbunan tanggul laut, ekonomis, serta ramah lingkungan untuk infrastruktur di atas tanah lunak.

Kata Kunci : Tanggul Laut, Penurunan, Stabilitas Lereng, Matras Bambu, PLAXIS 2D.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara kepulauan yang terletak di Asia Tenggara dan didominasi oleh wilayah laut. Lautan Indonesia diketahui memiliki luas lautan sebesar 3.273.810 km² dan bagian daratan seluas 1.919.440 km². Dengan panjang garis pantai mencapai 108.000 kilometer, Indonesia termasuk salah satu negara dengan garis pantai terpanjang di dunia setelah Kanada, Amerika Serikat, dan Rusia. (Badan Informasi Geospasial, 2024). Panjangnya garis pantai di Indonesia ini menyebabkan adanya potensi manfaat bagi masyarakat, namun juga menimbulkan tantangan besar, yakni banjir rob. Banjir rob termasuk pada bencana yang sering terjadi pada Pulau Jawa bagian utara yang berbatasan langsung dengan Laut Jawa, seperti wilayah Semarang, Demak, dan sekitarnya. Banjir rob adalah suatu kondisi dimana air laut naik ke daratan yang disebabkan oleh perubahan iklim, adanya penurunan muka tanah (*land subsidence*), degradasi, dan tingginya intensitas hujan yang terjadi pada wilayah tersebut.

Penurunan muka tanah (*land subsidence*) adalah salah satu penyebab banjir rob yang selalu terjadi setiap tahun. Muka tanah mengalami penurunan di wilayah Semarang utara dengan nilai berkisar antara 7 hingga 9 cm per tahun, dimana nilai tersebut cukup besar dan bisa menimbulkan dampak yang serius apabila terjadi secara terus menerus. Penurunan muka tanah di Semarang umumnya disebabkan oleh faktor alam dan aktivitas manusia, dimana dampak terbesar dirasakan pada wilayah Kaligawe, Tanjung Mas, dan Genuk (Kementerian ESDM, 2020). Pengambilan air tanah yang berlebihan, iklim yang selalu berubah dan muka air laut yang selalu mengalami kenaikan, terlalu berat beban infrastruktur yang ditahan oleh tanah, serta struktur geologi tanah yang jenuh air pada wilayah pesisir menjadi beberapa penyebab terjadinya penurunan tanah di Kota Semarang. Untuk mencegah terjadinya penurunan muka tanah, upaya mitigasi telah diusahakan oleh pemerintah. Salah satu solusi dari permasalahan ini adalah dengan pembangunan Jalan Tol

yang menghubungkan wilayah Semarang hingga Demak disertai dengan pembangunan tanggul laut.

Jalan Tol yang terbentang dari Semarang hingga Demak adalah suatu proyek infrastruktur yang dibangun pemerintah untuk menghubungkan wilayah Kota Semarang dengan Kabupaten Demak di Provinsi Jawa Tengah. Jalan tol ini dibangun untuk meningkatkan konektivitas pada wilayah Pantai Utara Jawa (Pantura) dalam pendistribusian barang dan jasa. Selain sebagai penghubung antar wilayah, pembangunan jalan tol ini disertai dengan adanya perencanaan pembangunan tanggul laut pada Seksi Kaligawe hingga Sayung. Pembangunan tol dan tanggul laut ini diharapkan tidak hanya mendukung mobilitas antar wilayah, namun juga dapat memberikan solusi atas permasalahan lingkungan yang berkelanjutan. Salah satu metode yang dilakukan untuk mencegah permasalahan lingkungan ini adalah dengan membangun tanggul laut dengan penggunaan matras bambu.

Matras bambu merupakan salah satu opsi terbaik untuk mencegah penurunan yang berlebih pada suatu tanah dengan karakteristik sangat lunak serta tidak cukup stabil dalam menahan beban dikarenakan sifatnya yang ringan, fleksibel, dan ramah lingkungan. Bambu adalah salah satu material lokal yang memiliki jumlah yang sangat melimpah di Indonesia, sehingga akan mempermudah sistem perkuatan tanah dasar dalam pendistribusian beban secara merata. Bambu yang digunakan berjumlah ribuan dengan cara dianyam dan diikat menjadi lembaran atau lapisan tertentu. Sifatnya yang ekonomis dan biaya yang terjangkau akan lebih cocok untuk proyek dengan skala besar. Matras pada tanggul laut ini digunakan sebagai lapisan dasar yang berfungsi untuk menstabilkan pondasi tanggul yang terbuat dari cerucuk.

Penggunaan matras bambu pada tanggul laut Jalan Tol Semarang – Demak ini tidak hanya memberikan solusi yang lebih baik, namun akan mendukung pembangunan yang berkelanjutan pada Kota Semarang. Kajian ini akan membantu mengidentifikasi parameter teknis yang mempengaruhi kinerja stabilitas dan penurunan, seperti daya dukung tanah. Selain itu, hasil dari kajian ini dapat menjadi dasar dalam memberikan rekomendasi teknis apabila ditemukan permasalahan

serupa di kemudian hari, serta membuka peluang dalam pengembangan teknologi konstruksi berbasis material lokal yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka didapat beberapa rumusan masalah yang akan ditinjau dan dianalisis sebagai berikut.

1. Berapa nilai *Safety Factor (SF)* tanggul laut terhadap timbunan tanah pesisir tanpa perkuatan berdasarkan simulasi menggunakan program PLAXIS V.21?
2. Berapa nilai penurunan konsolidasi tanggul laut terhadap timbunan tanah pesisir tanpa perkuatan berdasarkan simulasi menggunakan program PLAXIS V.21?
3. Berapa nilai *Safety Factor (SF)* tanggul laut terhadap timbunan tanah pesisir dengan menggunakan perkuatan matras bambu pada desain original berdasarkan simulasi menggunakan program PLAXIS V.21?
4. Berapa nilai penurunan konsolidasi tanggul laut terhadap timbunan tanah pesisir dengan menggunakan perkuatan matras bambu pada desain original berdasarkan simulasi menggunakan program PLAXIS V.21?
5. Berapa nilai *Safety Factor (SF)* tanggul laut terhadap timbunan tanah pesisir menggunakan perkuatan matras bambu dengan desain modifikasi sesuai kebutuhan lapangan berdasarkan simulasi menggunakan program PLAXIS V.21?
6. Berapa nilai penurunan konsolidasi tanggul laut terhadap timbunan tanah pesisir menggunakan perkuatan matras bambu dengan desain modifikasi sesuai kebutuhan lapangan berdasarkan simulasi menggunakan program PLAXIS V.21?
7. Bagaimana perbandingan stabilitas dan penurunan antara original desain dengan desain modifikasi sesuai kebutuhan lapangan berdasarkan program PLAXIS V.21?

1.3 Tujuan Penelitian

Dari uraian rumusan masalah yang telah diuraikan, maka didapatkan tujuan penelitian yang dilakukan sebagai berikut:

1. Mengetahui nilai *Safety Factor (SF)* tanggul laut terhadap timbunan tanah pesisir tanpa perkuatan berdasarkan simulasi menggunakan program PLAXIS V.21.
2. Mengetahui nilai penurunan konsolidasi tanggul laut terhadap timbunan tanah pesisir tanpa perkuatan berdasarkan simulasi menggunakan program PLAXIS V.21.
3. Mengetahui nilai *Safety Factor (SF)* tanggul laut terhadap timbunan tanah pesisir dengan menggunakan perkuatan matras bambu pada desain original berdasarkan simulasi menggunakan program PLAXIS V.21.
4. Mengetahui nilai penurunan konsolidasi tanggul laut terhadap timbunan tanah pesisir dengan menggunakan perkuatan matras bambu pada desain original berdasarkan simulasi menggunakan program PLAXIS V.21.
5. Mengetahui nilai *Safety Factor (SF)* tanggul laut terhadap timbunan tanah pesisir menggunakan perkuatan matras bambu dengan desain modifikasi sesuai hasil kebutuhan lapangan berdasarkan simulasi menggunakan program PLAXIS V.21.
6. Mengetahui nilai penurunan konsolidasi tanggul laut terhadap timbunan tanah pesisir menggunakan perkuatan matras bambu dengan desain modifikasi sesuai hasil kebutuhan lapangan berdasarkan simulasi menggunakan program PLAXIS V.21.
7. Mengetahui perbandingan stabilitas dan penurunan antara original desain dengan perubahan pekerjaan dari hasil kebutuhan lapangan berdasarkan simulasi menggunakan program PLAXIS V.21.

1.4 Manfaat Penelitian

Mengacu pada tujuan penelitian yang telah diuraikan, didapatkan manfaat penelitian sebagai berikut:

1. Menambah pengetahuan dan wawasan mengenai stabilitas dan penurunan muka tanah lunak pada wilayah pesisir.
2. Menambah pengetahuan dan wawasan mengenai perkuatan tanah dengan menggunakan material lokal berupa matras bambu.
3. Mampu menganalisis desain yang aman dan baik untuk menjaga dan meningkatkan stabilitas tanah lunak.
4. Menambah pengetahuan dan wawasan mengenai pengaruh perkuatan tanah dengan menggunakan matras bambu terhadap tingkat kepadatan dan tekstur tanah.
5. Penelitian ini dapat dijadikan acuan dalam memilih jenis perkuatan untuk tanah lunak, khususnya pada wilayah pesisir pantai.

1.5 Batasan Penelitian

Dalam penelitian ini, ditentukan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini menggunakan material bambu dan geotekstil sesuai dengan data lapangan pada spesifikasi teknis dari Balai Besar Pembangunan Jalan Nasional Jawa Tengah – DIY (BBPJN Jateng – DIY).
2. Parameter tanah yang diperoleh dari Laporan Hasil Penyelidikan Tanah pada Pekerjaan Pembangunan Jalan Tol Semarang – Demak Paket 1B.
3. Lokasi penelitian adalah pada Tanggul Laut, *Revetment* dan *Main Road* sta. 1+578 – 8+314.
4. Penelitian ini tidak memperhitungkan beban gempa.
5. Timbunan pasir yang digunakan adalah pasir laut dan kombinasi pasir darat dengan kandungan lumpur maksimum 15% timbunan pilihan.
6. Waktu tunggu konsolidasi ditentukan selama 55 – 75 hari untuk per lapis timbunan.
7. Geotekstil yang digunakan memiliki nilai kuat tarik maksimum sebesar 1000 kN/m, 400 kN/m, dan 600 kN/m.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Analisis stabilitas tanggul laut dengan matras bambu berfungsi untuk evaluasi ketahanan tanggul dalam menghadapi tekanan air laut, gelombang, dan erosi pantai. Analisis ini juga akan membantu dalam menentukan faktor keamanan tanggul dan efektivitas matras bambu dalam menahan beban eksternal.

2.2 Analisis Stabilitas Lereng

Amir dkk (2024) melakukan studi mengenai analisis stabilitas lereng di wilayah Sungai Rongkong, Kabupaten Luwu Utara, dengan memanfaatkan perangkat lunak *Geoslope*. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi peningkatan nilai *Safety Factor* (SF) setelah penerapan perkuatan geotekstil, serta membandingkan perhitungan stabilitas lereng antara metode manual dengan penggunaan *geoslope*. Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif dimana fenomena yang diamati dianalisis secara sistematis menggunakan kedua metode perhitungan tersebut. Hasil analisis penelitian menunjukkan bahwa kondisi lereng sebelum diperkuat masih dibawah batas stabilitas yang telah disyaratkan. Namun setelah menggunakan perkuatan geotekstil nilai faktor keamanan semakin meningkat dan telah mencapai kriteria batas kelongsoran yang diizinkan. Selain itu, hasil analisis stabilitas internal, eksternal, dan kelongsoran lereng Sungai Rongkong dari perhitungan manual dan *geoslope* menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan.

Ramadhani dkk (2024) melakukan penelitian mengenai stabilitas lereng pada area pertambangan nikel di Kabupaten Morowali. Penelitian ini memiliki tujuan untuk menilai stabilitas lereng rencana galian tambang dan menentukan nilai faktor aman lereng ketika proses penggalian berlangsung. Pada penelitian ini melibatkan pemodelan geometri lereng dan dilakukan proses analisis menggunakan pendekatan elemen hingga. Berdasarkan hasil analisis, deformasi lereng terbesar terjadi pada

puncak hingga sisi tengah lereng sebesar 21 cm pada lokasi GT-19841. Adapun analisis faktor aman menunjukkan tahap penggalian dengan kemiringan 50° lereng belum menunjukkan telah mencapai faktor aman minimum. Meski demikian, gaya penahan lereng masih lebih besar dibandingkan dengan gaya penggerakannya. Nilai faktor aman lereng terbesar adalah 1,43 yang berada pada lokasi GT-15617.

Chayati dkk (2022) melakukan penelitian mengenai perencanaan stabilitas lereng timbunan dalam rangka perbaikan saluran irigasi Sugih yang terletak pada Desa Cibedug, Kecamatan Ciawi, Kabupaten Bogor. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik tanah pada lokasi tersebut. Dalam proses analisis, digunakan metode Bishop Disederhanakan (*Simplified Bishop Method*) dan AutoCAD 2018 untuk mendukung perencanaan geometri lereng dan timbunan tanah yang diperlukan. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan hasil penelitian nilai faktor keamanan (*Safety Factor*) sebesar 1,83 yang menunjukkan bahwa kondisi lereng tersebut pada kondisi stabil.

Rumbyarso dan Pribadi (2023) meneliti stabilitas lereng pada Proyek *Geotechnical Investigation* jalur transportasi Pelabuhan Batubara Marangkayu yang terletak pada Kabupaten Kutai Kertanegara. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan angka keamanan lereng dan memperoleh sudut kemiringan lereng yang aman berdasarkan kondisi aktual di lapangan. Analisis dilakukan dengan menggunakan *software* Geostudio Slope dengan pendekatan metode Bishop. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi lereng pada titik pengujian OLC-FBH-03 dan OLC-FBH-06 memiliki nilai faktor keamanan lebih dari 1,25. Oleh karena itu, disimpulkan bahwa jalur transportasi pada lokasi tersebut dinilai aman dari potensi longsor.

2.3 Penurunan Tanah Lunak

Efendi (2023) melakukan penelitian mengenai Pemodelan Penurunan Tanah di kawasan Ibu Kota Negara (IKN) Nusantara dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga *software* LISA V.8. Tujuan dari studi ini adalah untuk memvalidasi hasil analisis LISA dengan membandingkannya terhadap perangkat lunak geoteknik *Geostudio Sigma/W*. Proses penelitian ini dilakukan dengan

mengumpulkan data karakteristik tanah hasil pengeboran di salah satu area IKN, yang kemudian digunakan sebagai input parameter dalam pemodelan numerik di kedua *software*. Hasil analisis menunjukkan bahwa penurunan yang dihitung menggunakan aplikasi *LISA* adalah 0,0623 meter, sedangkan jika menggunakan *software Geostudio Sigma/W* penurunan yang terjadi sebesar 0,0633 meter. Selisih nilai tersebut tergolong kecil dengan rasio perbandingan 1,016, yang mengindikasikan bahwa aplikasi *LISA* memiliki potensi sebagai aplikasi alternatif dalam menganalisis penurunan tanah.

Istiqomah dkk (2020) melakukan studi terkait Penurunan Muka Tanah di Kota Semarang dengan menggunakan Metode Survei GNSS pada tahun 2019. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur laju penurunan muka tanah melalui metode pengamatan GNSS dengan membandingkan data tinggi ellipsoid pada titik yang sama antara tahun 2018 dengan 2019. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, didapatkan hasil berupa nilai laju penurunan muka tanah yang paling besar terdapat pada titik B061 sebesar 7,796 cm/tahun dan yang paling kecil yaitu titik T447 sebesar 1,795 cm/tahun.

Ahsan dkk (2021) melakukan penelitian mengenai Analisis Penurunan Tanah Menggunakan Metode *Vacuum Consolidation*, menggunakan Variasi Jarak Pemasangan PVD. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi besarnya penurunan serta waktu yang dibutuhkan tanah untuk dapat mencapai konsolidasi 90%. Penelitian dilakukan dengan variasi jarak pemasangan PVD sebesar 0,5 m, 0,75 m, dan 1,0 m. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jarak pemasangan PVD sebesar 0,50 m menghasilkan waktu konsolidasi tercepat, yaitu selama 15 hari dengan besar penurunan yang terjadi sebesar 1,737 meter.

Akbar dan Setiawan (2022) melakukan studi mengenai Penurunan Muka Tanah Kota Jambi dengan menggunakan Metode *Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar* selama Periode 2016 – 2021. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan wilayah yang mengalami subsiden dengan memanfaatkan citra Sentinel-1. Pada penelitian ini, Teknik DinSAR digunakan karena memiliki ketelitian mencapai sentimeter untuk melihat besar deformasi, kemudian data diolah menggunakan *software* SNAP dan ArcGIS 10.6. Hasil analisis menunjukkan

bahwa wilayah dengan tingkat penggunaan lahan yang tinggi cenderung mengalami penurunan tanah yang lebih signifikan. Nilai rata-rata penurunan tanah di kota Jambi tercatat 11,28 cm/tahun, dengan subsiden maksimum per tahun sebesar -8,6 cm pada tahun 2019 di kecamatan Jambi Selatan dan kecamatan Pasar sebesar -7,7 pada tahun 2021.

Surbakti (2021) melakukan penelitian mengenai Penurunan Tanah pada Proyek Reklamasi Belawan dengan menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D dan 3D. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan hasil prediksi penurunan tanah berdasarkan program PLAXIS 2D dan 3D terhadap data aktual yang diperoleh dari alat ukur *settlement plate* di lapangan. Pemodelan merepresentasikan dimensi dan tahapan penimbunan proyek reklamasi sesuai kondisi nyata di lapangan. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan hasil bahwa besar penurunan yang dihitung menggunakan aplikasi PLAXIS 2D adalah 6,47 meter dan dari analisis PLAXIS 3D adalah 6,356 meter. Penurunan yang terjadi menurut pengamatan *settlement plate* di lapangan adalah 6,32 meter, sehingga analisis dengan menggunakan PLAXIS 3D lebih mendekati penurunan hasil observasi dibandingkan dengan menggunakan PLAXIS 2D.

2.4 Pengaruh Penggunaan Matras Bambu terhadap Jenis Tanah Lunak

Nurhuda (2022) melakukan penelitian terkait Analisis Stabilitas Tanggul Penahan Tanah pada kawasan Pedestrian Zona II di Situ Bagendit. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi faktor keamanan tanggul terhadap potensi kegagalan berupa gelincir, geser dan guling. Analisis dilakukan dengan menghitung gaya dan momen yang bekerja pada bangunan, kemudian menilai stabilitas terhadap dua jenis kegagalan tersebut. Hasil studi menunjukkan bahwa nilai stabilitas gelincir mencapai 1,73 dan nilai stabilitas guling bernilai 2,10. Kedua nilai tersebut lebih dari batas minimum stabilitas sebesar 1,25, sehingga tanggul dinyatakan dalam kondisi stabil.

Ready (2020) meneliti kestabilan lereng timbunan yang dibangun di atas tanah lunak dengan *hardening soil modelling* serta perkuatan berupa matras bambu, khususnya dalam kondisi beban dinamis. Studi kasus dilakukan pada proyek

Double Track Jombang – Kertosono. Penelitian ini bertujuan untuk membuktikan bahwa matras bambu dapat menjadi solusi efektif dalam mengatasi perbedaan penurunan pada tanah timbunan, sekaligus meningkatkan nilai faktor keamanan lereng. Metode yang digunakan mencakup uji eksperimental skala penuh dan pemodelan numerik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan perkuatan cerucuk dan matras bambu menghasilkan nilai faktor keamanan (*Safety Factor*) sebesar 2,10, yang berada di atas batas minimum 1,23, sehingga kondisi lereng dinyatakan stabil.

Waruwu dkk (2022) melakukan penelitian mengenai penggunaan matras bambu sebagai perkuatan dalam upaya meningkatkan nilai *California Bearing Ratio* (CBR) pada Tanah Lempung. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh tipe matras bambu (anyam dan nir-anyam) serta jumlah lapisan terhadap nilai CBR. Pengujian dilakukan di laboratorium menggunakan sampel tanah lempung dari Sibolangit, Kabupaten Deli Serdang, Provinsi Sumatera Utara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa matras bambu tipe anyam memberikan nilai CBR sebesar 4,56% hingga 5,30%. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan penggunaan matras bambu tipe nir-anyam, yang mengindikasikan bahwa perkuatan dengan spasi yang lebih rapat mampu meningkatkan daya dukung subgrade secara lebih signifikan. Oleh karena itu, matras bambu dinilai layak digunakan pada struktur perkerasan jalan karena kontribusinya dalam meningkatkan CBR tanah dasar.

Pasaribu dkk (2024) melakukan penelitian eksperimental mengenai pengaruh penggunaan matras bambu terhadap nilai *California Bearing Ratio* (CBR) pada tanah lempung. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi peningkatan nilai CBR akibat perkuatan matras bambu, serta menganalisis pengaruh variasi jumlah lapisan dan spasi vertikal terhadap nilai tersebut. Tanah uji diambil dari Delitua Pamah, Kecamatan Delitua Barat, Kabupaten Deli Serdang, yang kemudian di uji di laboratorium. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai CBR tanah dasar tanpa perkuatan bernilai 2,41%, sedangkan menggunakan matras bambu 1 hingga 3 lapis dan variasi spasi 3 – 9 cm menghasilkan nilai CBR antara 2,9% - 3,49%. Meskipun terjadi peningkatan, nilai tersebut masih berada di bawah syarat minimum CBR

sebesar 5% untuk tanah dasar, sehingga diperlukan uji lebih lanjut secara langsung di lapangan

Suyuti dkk (2020) melakukan penelitian terkait prediksi nilai CBR lapangan pada tanah lunak dengan menggunakan pondasi matras dan perkuatan tiang bambu yang dianalisis berdasarkan formula Terzaghi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kapasitas dukung tanah dasar lunak melalui penerapan perkuatan tiang bambu. Metode yang digunakan berupa pengujian CBR di lapangan menggunakan model pondasi tradisional sebagai representasi sistem perkuatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai CBR prediksi berkisar antara 4,9 hingga 5,1%, sedangkan hasil aktual bernilai 4,9%. Kesesuaian antara nilai prediksi dengan aktual ini dicapai dengan menggunakan piston faktual berdiameter 2,5 cm, yang mendukung akurasi metode prediksi yang digunakan.

Afprianto dkk (2022) meneliti efektivitas penggunaan matras dan cerucuk bambu sebagai sistem perkuatan tanah urugan di Area Bandara Ahmad Yani Semarang. Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan metode perkuatan tanah yang paling efektif antara sistem matras-cerucuk bambu dan metode konvensional berupa *preloading*. Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan perhitungan berdasarkan teori konsolidasi 1 Dimensi oleh Terzaghi pada kondisi *normally consolidated*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada area pengujian dengan beban timbunan konvensional, penurunan konsolidasi rata-rata tercatat sebesar 0,725 meter. Efektivitas perkuatan tanah dievaluasi dengan perbandingan penurunan dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi sebesar 95%. Ditemukan bahwa penggunaan matras dan cerucuk bambu lebih unggul dibanding dengan metode konvensional, baik dari segi kecepatan maupun efisiensi proses konsolidasi.

Faradila (2023) melakukan studi mengenai mekanisme interaksi antara tanah dengan perkuatan matras cerucuk bambu pada tanah lunak. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi permasalahan rendahnya daya dukung dan potensi penurunan yang besar ketika tanah menerima beban eksternal. Analisis kestabilan dan penurunan timbunan dilakukan menggunakan program *PLAXIS 3D Foundation* versi 2.1, dengan variasi jenis dan kombinasi perkuatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa

pada cerucuk bambu sepanjang 5 meter, daya dukung selimut tiang tidak cukup untuk menahan beban penuh, sehingga sebagian besar beban turut ditahan oleh ujung cerucuk. Sebaliknya, pada cerucuk bambu sepanjang 10 meter beban hampir sepenuhnya dapat ditahan oleh selimut tiang. Selain itu, penambahan matras bambu secara signifikan meningkatkan kekakuan sistem perkuatan; semakin banyak lapisan dan semakin besar kekakuan, maka semakin besar kontribusi matras dalam menahan beban.

Alfiansyah (2024) melakukan penelitian mengenai stabilitas lereng timbunan jalan dengan perkuatan geotekstil dan matras bambu pada ruas tol Cibitung-Cilincing, tepatnya pada Sta. 3+550. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kapasitas pelayanan jalan terhadap lalu lintas di kawasan industri yang secara tidak langsung mendukung pertumbuhan ekonomi di wilayah Kota Bekasi. Analisis dilakukan dengan menggunakan *software* PLAXIS V.22. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi eksisting tanpa perkuatan, nilai faktor keamanan untuk tinggi 3 m, 6 m, 9 m, dan 12 m secara berturut sebesar 1,784; 1,334; 1,233; 1,118 untuk beban struktur saat konstruksi, serta sebesar 1,641; 1,234; 1,149; 1,051 untuk beban gempa. Penggunaan geotekstil 1 lapis, menghasilkan SF sebesar 1,554; 1,338; 1,162 untuk beban struktur dan 1,394; 1,229; 1,088 untuk beban gempa. Perkuatan geotekstil sesuai perhitungan kebutuhan memberikan SF sebesar 2,024; 1,580; 1,485 untuk beban struktur, dan sebesar 1,576; 1,387; 1,320 untuk beban gempa. Penggunaan matras bambu menghasilkan nilai SF yang lebih tinggi, yakni 2,031; 1,905; 1,711 untuk beban struktur dan 1,901; 1,806; 1,571 untuk beban gempa. Pada tahap pasca konstruksi akibat beban lalu lintas SF tanpa perkuatan sebesar 1,473; 1,219; 1,171; 1,090, beban gempa sebesar 1,368; 1,099; 1,041; 1,023. Untuk geotekstil 1 lapis, nilai SF secara berturut sebesar 1,378; 1,251; 1,137 untuk beban lalu lintas, dan 1,227; 1,212; 1,061 untuk beban gempa. Geotekstil sesuai hitungan memiliki faktor keamanan sebesar 1,871; 1,501; 1,329 untuk beban lalu lintas, dan beban gempa 1,411; 1,323; 1,303. Matras bambu secara berturut 1,841; 1,678; 1,509 beban lalu lintas, 1,467; 1,436; 1,432 beban gempa. Hasil analisis juga menunjukkan bahwa perkuatan matras bambu menghasilkan

konsolidasi terendah pada timbunan 12 m, sedangkan untuk timbunan 6 m dan 9 m diperoleh pada geotekstil menyesuaikan dengan perhitungan kebutuhan.

2.5 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Dalam melaksanakan suatu penelitian, membandingkan hasil dengan penelitian terdahulu perlu dilakukan untuk mengidentifikasi kesamaan, perbedaan, dan perkembangan dari metode yang telah digunakan untuk penelitian sebelumnya. Analisis penelitian terdahulu ini akan membantu dan memahami keterbatasan studi dan bagaimana penelitian yang terbaru dapat dijadikan solusi dari permasalahan. Perbandingan dari penelitian yang sudah ada tercantum pada Tabel 2.1 berikut.

2.6 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Saat Ini

Keterangan	Penelitian Terdahulu						
	Amir dkk (2024)	Ahsan dkk (2021)	Chayati dkk (2022)	Nurhuda (2022)	Faradila (2023)	Alfiansyah (2024)	Salsabila (2025)
Judul Penelitian	Analisis Stabilitas Lereng Menggunakan Software Geoslope Pada Sungai Rongkong, Kabupaten Luwu Utara.	Analisis Penurunan Tanah Menggunakan Metode <i>Vacuum Consolidation</i> dengan Variasi Jarak Pemasangan PVD.	Perencanaan Stabilitas Lereng Timbunan untuk Perbaikan Saluran Irigasi Sugih Desa Citedug, Kecamatan Ciawi Kabupaten Bogor.	Analisis Stabilitas Tanggul Penahan Tanah Pedestrian Zona II Situ Bagendit.	Studi Mekanisme Interaksi Tanah – Matras Cerucuk Bambu sebagai Perkuatan Tanah Lunak.	Analisis Stabilitas Lereng Timbunan Jalan dengan Perkuatan Geotekstil dan Matras Bambu pada Jalan Tol Cibitung – Cilincing Sta. 3+550	Analisis Stabilitas dan Penurunan Tanggul Laut dengan Penggunaan Matras Bambu pada Jalan Tol Semarang - Demak

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Saat Ini

Keterangan	Penelitian Terdahulu						
	Amir dkk (2024)	Ahsan dkk (2021)	Chayati dkk (2022)	Nurhuda (2022)	Faradila (2023)	Alfiansyah (2024)	Salsabila (2025)
Tujuan Penelitian	Untuk mengetahui hasil peningkatan <i>Safety Factor</i> (SF) setelah menggunakan perkuatan geotekstil dan untuk mengetahui perbandingan hasil analisis stabilitas lereng menggunakan perhitungan manual dan geoslope.	Untuk mengetahui waktu dan besarnya penurunan yang terjadi pada tanah untuk dapat mencapai konsolidasi 90%.	Untuk menganalisis sifat sisis dan mekanis tanah di saluran irigasi Sugih Desa Cibedug, Kecamatan Ciawi Kabupaten Bogor.	Untuk mengetahui nilai faktor aman tanggul terhadap bahaya gelincir atau geser dan bahaya guling.	Untuk mengatasi pernasalahan dimana daya dukung akan menjadi rendah dan kemungkinan terjadi penurunan yang besar ketika tanah menerima beban.	Untuk meningkatkan kapasitas jalan dalam melayani lalu lintas di sektor industri yang berguna dakan meningkatkan produksi perekonomian di wilayah Kota Bekasi.	Untuk mengetahui faktor keamanan dan penurunan timbunan jalan dengan dan tanpa perkuatan pada Jalan Tol Semarang – Demak.

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Saat Ini

Keterangan	Penelitian Terdahulu						
	Amir dkk (2024)	Ahsan dkk (2021)	Chayati dkk (2022)	Nurhuda (2022)	Faradila (2023)	Alfiansyah (2024)	Salsabila (2025)
Metode Penelitian	Metode deskriptif yang ditujukan untuk mendeskripsikan fenomena-fenomena yang ada, baik fenomena alamiah maupun fenomena buatan manusia.	Metode <i>Vacuum Consolidation</i> dengan variasi jarak pemasangan PVD sebesar 0,5 m, 0,75 m, dan 1,0 m.	Metode Bishop Disederhanakan (<i>Simplified Bishop Method</i>) dan menggunakan aplikasi AutoCAD 2018 untuk mendapatkan perencanaan stabilitas lereng dan timbunan tanah yang diperlukan.	Dengan cara menghitung dan menganalisis gaya dan momen yang bekerja pada bangunan, serta menganalisis stabilitas geser dan guling.	Dengan menggunakan program PLAXIS 3D Foundation Versi 2.1.	Dengan menggunakan program PLAXIS V.22	Dengan menggunakan program PLAXIS V.21.

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Saat Ini

Keterangan	Penelitian Terdahulu						
	Amir dkk (2024)	Ahsan dkk (2021)	Chayati dkk (2022)	Nurhuda (2022)	Faradila (2023)	Alfiansyah (2024)	Salsabila (2025)
Hasil Penelitian	Stabilitas kelongsoran sebelum menggunakan perkuatan dengan aplikasi geoslope secara keseluruhan masih dapat dikatakan belum melewati batas dari yang telah ditentukan guna mencegah kelongsoran. Namun setelah menggunakan perkuatan	Nilai yang tertinggi diperoleh dengan jarak pemasangan PVD sebesar 0,50 m yaitu menghasilkan waktu untuk mencapai derajat konsolidasi 90% yang lebih cepat selama 15 hari dan besar penurunan yang terjadi adalah sebesar 1,737 meter.	Perhitungan menggunakan Metode Bishop yang disederhanakan, didapatkan nilai faktor keamanan (<i>Safety Factor</i>) 1,83, dimana nilai tersebut adalah stabil.	Nilai stabilitas gelincir atau geser yang didapat bernilai 1,73 dan nilai stabilitas guling bernilai 2,1. Kedua nilai stabilitas tersebut tergolong aman dikarenakan bernilai lebih dari 1,25 yang merupakan batas minimum stabilitas tanah.	Untuk cerucuk panjang 5 meter daya dukung selimut bambu lebih kecil daripada beban yang diberikan, sehingga ujung cerucuk bambu ikut menahan sebagian besar beban yang bekerja. menahan sebagian	Nilai angka aman untuk variasi timbunan dan eksisting tanpa perkuatan 3 m, 6 m, 9 m, dan 12 m secara berturut pada masa konstruksi beban struktur sebesar 1,784; 1,334; 1,233; 1,118, dan beban gempa	Timbunan di atas tanah sangat lunak setinggi 14,3 meter tanpa maupun desain original tidak stabil pada timbunan 3, sedangkan desain modifikasi dengan perkuatan kompleks berhasil meningkatkan stabilitas hingga $SF = 1,864$

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Saat Ini

Keterangan	Penelitian Terdahulu						
	Amir dkk (2024)	Ahsan dkk (2021)	Chayati dkk (2022)	Nurhuda (2022)	Faradila (2023)	Alfiansyah (2024)	Salsabila (2025)
Hasil Penelitian	geotekstil memiliki nilai yang memenuhi spesifikasi batas kelongsoran, yakni perhitungan manual dengan menggunakan geoslope memiliki besaran nilai yang kurang lebih sama dalam analisa stabilitas internal, eksternal, ataupun kelongsoran				besar beban yang bekerja. Untuk bambu panjang 10 meter, beban hampir seluruhnya didukung oleh selimut tiang. Sedangkan jika ditambah dengan kekuatan matras bambu, semakin banyak jumlah lapisan	sebesar 1,641; 1,234; 1,149; 1,051. Perkuatan geotekstil 1 lapis, 6 m, 9 m, dan 12 m beban struktur secara berturut sebesar 1,554; 1,338; 1,162 dan 1,394; 1,229; 1,088 untuk beban gempa. Perkuatan geotekstil sesuai perhitungan secara akibat beban struktur nilainya berturut sebesar 2,024; 1,580; 1,485,	dan menahan penurunan sebesar 70 cm, sehingga memenuhi kriteria aman untuk konstruksi timbunan jalan tol di atas tanah lunak.

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Saat Ini

Keterangan	Penelitian Terdahulu						
	Amir dkk (2024)	Ahsan dkk (2021)	Chayati dkk (2022)	Nurhuda (2022)	Faradila (2023)	Alfiansyah (2024)	Salsabila (2025)
Hasil Penelitian	pada lereng di sekitar Sungai Rongkong.				semakin besar kekakuan, maka semakin besar kontribusi matras dalam menahan beban.	dan beban gempa 1,576; 1,387; 1,320. Perkuatan matras bambu akibat beban struktur secara berturut sebesar 2,031; 1,905; 1,711 dan 1,901; 1,806; 1,571. Selanjutnya pasca konstruksi tanpa perkuatan akibat beban lalu lintas	

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Saat Ini

Keterangan	Penelitian Terdahulu						
	Amir dkk (2024)	Ahsan dkk (2021)	Chayati dkk (2022)	Nurhuda (2022)	Faradila (2023)	Alfiansyah (2024)	Salsabila (2025)
Hasil Penelitian						<p>3 m, 6 m, 9 m, 12 m secara berturut sebesar 1,473; 1,219; 1,171; 1,090, beban gempa 1,368; 1,099; 1,041; 1,023. Geotekstil 1 lapis akibat beban lalu lintas 6 m, 9 m, 12 m secara berturut sebesar 1,378; 1,251; 1,137, dan 1,227; 1,212; 1,061 beban gempa. Geotekstil sesuai hitungan</p>	

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Saat Ini

Keterangan	Penelitian Terdahulu						
	Amir dkk (2024)	Ahsan dkk (2021)	Chayati dkk (2022)	Nurhuda (2022)	Faradila (2023)	Alfiansyah (2024)	Salsabila (2025)
Hasil Penelitian						secara berturut 1,871; 1,501; 1,329 beban lalu lintasn dan beban gempa 1,411; 1,323; 1,303. Matras bambu secara berturut 1,841; 1,678; 1,509 beban lalu lintas, 1,467; 1,436; 1,432 beban gempa. Hasil analisis konsolidasi terendah dihasilkan matras bambu	

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Saat Ini

Keterangan	Penelitian Terdahulu						
	Amir dkk (2024)	Ahsan dkk (2021)	Chayati dkk (2022)	Nurhuda (2022)	Faradila (2023)	Alfiansyah (2024)	Salsabila (2025)
Hasil Penelitian						untuk timbunan 12 m, timbunan 6 m dan 9 m dihasilkan oleh geotekstil sesuai dengan perhitungan kebutuhan	

Sumber : Amir dkk (2024), Ahsan dkk (2021), Chayati dkk (2022), Nurhuda (2022), Faradila (2023), Alfiansyah (2024)

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Definisi dan Sistem Klasifikasi Tanah

Seluruh tanah yang ada di permukaan bumi mencakup seluruh jenis tanah, seperti tanah lempung (*clay*), hingga berangkal (batuan besar). tanah tersusun atas tiga bahan utama, yakni butiran tanah asli, air, serta udara yang terkandung dalam ruang antar butir yang bernama *voids*. Tanah yang benar-benar kering tidak mengandung air dalam porinya. Namun, tanah kering tanpa ada kandungan air sama sekali hanya dapat ditemukan pada tanah yang telah melalui perlakuan khusus, seperti pemanasan oven. Tanah dinyatakan dalam kondisi jenuh apabila seluruh ruang porinya terisi penuh air tanpa ada kandungan udara. Kondisi ini umumnya terjadi pada tanah di bawah muka air tanah. Dalam kajian geoteknik, sebagian besar teori yang digunakan, seperti teori konsolidasi maupun teori kuat geser tanah dengan asumsi tanah dalam keadaan jenuh, yakni hanya mengandung air sebagai fluida pori tanpa udara (Wesley, 2017).

Tanah berasal dari suatu proses yang bernama pelapukan batuan, dimana pelapukan ini bisa terjadi secara fisik maupun kimiawi. Unsur-unsur luar berupa kandungan bahan organik dan struktur batuan aslinya mempengaruhi sifat teknis tanah. Istilah-istilah tanah seperti lempung, pasir, lanau, dan kerikil menjadi pembeda jenis-jenis tanah. Bahan organik yang biasanya terkandung pada tanah mempengaruhi penamaan pada jenis tanah. Contoh dari penamaan tersebut adalah lempung berlanau, dimana material utama yang terkandung adalah lempung, dan kandungan lainnya adalah tanah lanau (Hardiyatmo. 2020).

Pengelompokan tanah merupakan suatu proses pembagian jenis tanah yang menunjukkan sifat teknis atau perilaku yang sama. Pengelompokan sifat teknis tanah ini dinamakan dengan klasifikasi tanah. Klasifikasi tanah ini akan sangat berguna bagi perancang dikarenakan adanya berbagai metode empiris yang dapat digunakan untuk analisis permasalahan yang ada. Namun analisis harus dilakukan

dengan teliti agar tidak menimbulkan suatu permasalahan yang akan merugikan. (Lambe, 1979, dalam Hardiyatmo, 2012).

Klasifikasi tanah dalam bidang mekanika tanah berperan penting dalam memahami serta menganalisis karakteristik teknis suatu jenis tanah. Klasifikasi tanah yang digunakan pada penelitian ini adalah Sistem Klasifikasi Tanah berdasarkan nilai N-SPT.

1. Sistem Klasifikasi Tanah berdasarkan Nilai N-SPT

Nilai N-SPT (*Standard Penetration Test*) merupakan hasil dari uji penetrasi dinamis yang dilakukan untuk mengetahui ketahanan tanah terhadap pukulan konstan pada kedalaman tertentu. Pengujian ini digunakan untuk mengidentifikasi kondisi kekonsistensian tanah lempung dan kepadatan tanah pasir di lapangan. Nilai N-SPT dapat digunakan sebagai dasar klasifikasi tanah karena berkorelasi langsung dengan kekuatan geser dan daya dukung tanah. Nilai N yang rendah menunjukkan tanah dengan daya dukung lemah seperti lempung sangat lunak, sedangkan nilai N yang tinggi menandakan tanah lempung keras (Terzaghi dan Peck, 1967). Rentang nilai N-SPT untuk jenis tanah tertentu menurut Terzaghi dan Peck (1967) ditampilkan pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Hubungan N-SPT dengan Konsistensi Tanah Lempung

Consistency	Unconfined Compression Strength, q_u (KN/m ²)	N-SPT (blows per ft)	Saturated Unit Weight (KN/M ³)
Very Soft	0 - 25	0 - 2	< 16
Soft	25 - 50	2 - 4	16 - 19
Medium	50 - 100	4 - 8	17 - 20
Stiff	100 - 200	8 - 15	18 - 20
Very Stiff	200 - 400	15 - 30	19 - 22
Hard	> 400	> 30	> 20

(Sumber : Terzaghi & Peck, 1967)

3.2 Parameter Pengujian Tanah

Parameter yang digunakan dalam analisis stabilitas tanggul laut diperoleh melalui serangkaian pengujian di lapangan dan laboratorium. Hasil dari pengujian tersebut menghasilkan data parameter tanah yang digunakan pada proses analisis.

3.2.1 Kadar Air

Kadar air tanah merupakan rasio antara berat air yang terkandung dalam sampel tanah terhadap berat kering tanah. Umumnya kadar air tanah dinyatakan dalam satuan gram per sentimeter kubik (gr/cm^3). Kadar air diperoleh melalui pengujian laboratorium, yaitu dengan mengeringkan tanah basah menggunakan oven pada suhu antara 100°C hingga 110°C selama kurang lebih 48 jam. Jumlah air yang menguap selama proses pengeringan dianggap sebagai kandungan air dalam tanah (Mustafa, 2012). Kadar air tanah bisa didapatkan melalui Persamaan 3.1 berikut.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \quad (3.1)$$

Dimana :

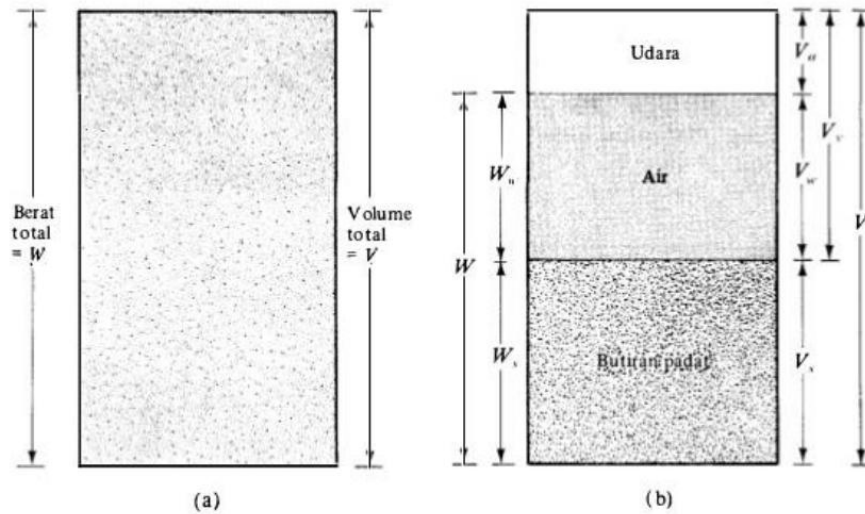
w = kadar air (%)

W_w = berat air (gr)

W_s = berat butiran tanah kering (gr)

3.2.2 Berat Volume Tanah

Diagram fase tanah menggambarkan bahwa tanah tersusun atas 3 komponen utama, yakni partikel padat, air, dan udara. Ruang yang terdapat di antara butiran tanah dapat terisi air, udara, maupun keduanya. Apabila seluruh pori terisi air, maka tanah dikategorikan sebagai tanah jenuh. Sebaliknya, jika pori terisi dengan air dan udara, maka tanah tersebut adalah tanah jenuh sebagian (*partially saturated*). Di bawah ini adalah gambar dari diagram fase tanah.



Gambar 3.1 Diagram Fase Tanah

(Sumber : Hardiyatmo, 2012)

Berat volume tanah jenuh (γ_{sat}) adalah rasio antara berat total tanah, termasuk kandungan air di dalamnya terhadap volume tanah total. Nilai ini diperoleh melalui pengujian laboratorium, dimana tanah basah dimasukkan pada silinder pendek hingga penuh, kemudian diratakan menggunakan pisau khusus. Perhitungan berat volume tanah dinyatakan dengan Persamaan 3.2 berikut.

$$\gamma_{sat} = \frac{W_{sat}}{V} \quad (3.2)$$

Sementara itu, berat volume tanah kering (γ_d) didefinisikan sebagai perbandingan antara berat tanah dalam kondisi kering oven dengan volume total tanah. Perhitungan berat volume tanah kering dinyatakan dengan Persamaan 3.3 berikut.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (3.3)$$

Berat volume tanah basah (γ_b) atau berat volume total merupakan perbandingan berat tanah dalam kondisi basah dengan volume total tanah. Perhitungan berat volume tanah kering dinyatakan dengan Persamaan 3.4 berikut.

$$\gamma_b = \frac{W_s + W_w + W_a}{V} \quad (3.4)$$

Dimana :

γ_{sat} = berat volume tanah jenuh (gr/cm³)

γ_d = berat volume tanah kering (gr/cm³)

γ_b = berat volume tanah basah (gr/cm³)

W_s = berat butiran tanah padat (gr)

W_{sat} = berat butiran tanah jenuh (gr)

W_w = berat air (gr)

W_a = berat udara, dianggap nol (gr)

V = volume tanah total (cm³)

3.2.3 Berat Jenis Tanah

Berat jenis tanah, atau dikenal juga dengan berat spesifik (*specific gravity*) merupakan suatu nilai perbandingan antara berat butiran tanah dengan berat air destilasi di udara pada volume yang dan suhu tertentu, umumnya diambil pada suhu 20°C. Nilai ini dihitung berdasarkan Persamaan 3.5 berikut.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (3.5)$$

Dimana :

G_s = berat jenis tanah

γ_s = berat volume butiran padat (gr/cm³)

γ_w = berat volume air (gr/cm³)

3.2.4 Kuat Geser Tanah

Kuat geser tanah merupakan kemampuan suatu tanah untuk menahan gaya geser yang bekerja tanpa mengalami keruntuhan yang signifikan. Menurut Hardiyatmo (2014), besar kecilnya kuat geser tanah dipengaruhi oleh dua parameter utama, yaitu kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Kuat geser ini terdiri dari dua komponen, yaitu komponen kohesi yang bergantung pada jenis tanah dan kerapatan butirannya, dan komponen gesekan yang sebanding dengan tegangan efektif pada bidang geser.

Kuat geser tanah dinyatakan dengan persamaan Coulomb seperti pada Persamaan 3.6 berikut.

$$\tau = c + (\sigma - u) \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (3.6)$$

Dimana :

$\tau = s$ = kuat geser tanah atau tahanan geser tanah

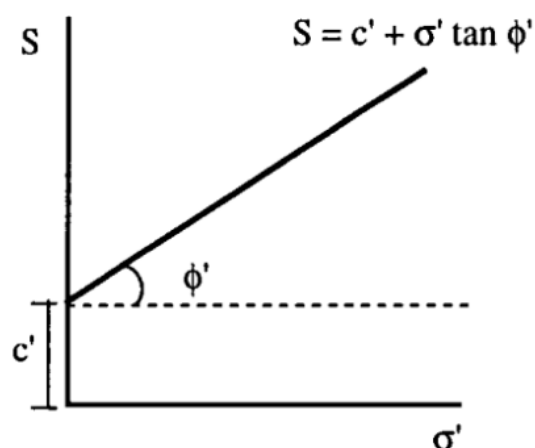
c = kohesi

σ = tegangan total pada bidang geser

u = tekanan air pori

φ = sudut geser dalam

Dalam persamaan kuat geser tanah, komponen kohesi tidak dipengaruhi oleh tegangan normal, sedangkan komponen tahanan gesek bergantung pada besar kecilnya tegangan normal yang bekerja. Pada jenis tanah berbutir kasar, nilai kohesi umumnya dianggap nol ($c = 0$), sehingga kuat geser tanah sepenuhnya ditentukan oleh gaya gesek antar butiran. Apabila tegangan geser yang bekerja pada suatu bidang dalam tanah melebihi nilai yang dinyatakan dalam persamaan 3.6, maka akan terjadi pergerakan geser atau keruntuhan pada bidang tersebut. Hubungan antara tegangan geser dan tegangan normal digambarkan pada grafik 3.2 di bawah ini.



Gambar 3.2 Grafik Keruntuhan Mohr-Coulomb

(Sumber : Hardiyatmo, 2012)

3.2.5 Koefisien Permeabilitas Tanah

Setiap jenis tanah tersusun atas partikel padat serta rongga antar butiran yang disebut pori-pori (*voids*). Pori-pori tersebut saling terhubung, memungkinkan air mengalir melaluinya. Kemampuan tanah untuk dilalui aliran air dikenal sebagai permeabilitas. Hukum Darcy (1856) menjelaskan bahwa laju aliran (rembesan) dalam tanah sebanding dengan gradien hidrolik yang terjadi. Hubungan ini dapat dinyatakan melalui Persamaan 3.7 dan Persamaan 3.8 berikut.

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (3.7)$$

$$v = k \cdot i \quad (3.8)$$

Dimana :

v = kecepatan rembesan (cm/det)

i = gradien hidrolik

k = koefisien permeabilitas (cm/det)

L = panjang lintasan aliran (m)

Di bawah ini adalah nilai taksiran untuk koefisien rembesan tanah.

Tabel 3.2 Koefisien Permeabilitas Tanah

Jenis Tanah	Koefisien Rembesan (m/detik)
Kerikil	> 0,01
Pasir Kasar	10^{-2} sampai 10^{-3}
Pasir Sedang	10^{-3} sampai 10^{-4}
Pasir Halus	10^{-5} sampai 10^{-6}
Lanau	10^{-6} sampai 10^{-8}
Lempung	10^{-8} sampai 10^{-11}

(Sumber : Wesley, 2017)

Koefisien rembesan bernilai sangat luas. Pada tabel 3.3 diatas, nilai yang didapat hanyalah taksiran saja. Nilai koefisien rembesan yang akurat hanya didapat dengan melakukan pengujian khusus pada tanah.

3.2.6 Sudut Dilatansi (ψ)

Sudut dilatansi (*dilatancy angle*) adalah suatu sudut yang terbentuk antara arah deformasi geser dan arah perubahan volume (deformasi volumetrik) pada tanah, yang mencerminkan terjadinya perubahan volume selama proses geser berlangsung (Budhu, 2011). Ketika tanah granular mengalami geser, material tersebut cenderung mengalami pengembangan volume atau dilatansi. Semakin padat kondisi tanah granular, maka semakin besar nilai sudut dilatansinya. Pada tanah lempung, sudut dilatansi umumnya dianggap nol ($\psi = 0$) karena tidak menunjukkan perubahan volume selama geser. Sementara itu, pada tanah kering, nilai sudut dilatansi secara umum berada sekitar 30° ($\psi = 30^\circ$), tergantung pada tingkat kerapatan dan sudut geser tanah tersebut (Bolton, 1986).

3.2.7 Poisson Ratio (μ)

Poisson ratio (μ) merupakan perbandingan antara regangan aksial (arah memanjang) dan regangan lateral (arah melintang) yang terjadi ketika suatu material, dalam hal ini tanah, menerima beban aksial dalam kondisi elastis. Nilai rasio ini digunakan untuk menggambarkan perilaku deformasi material yang terjadi secara tegak lurus terhadap arah pembebanan. (Bowles, 1997).

Tabel 3.3 Poisson Ratio (ν)

Jenis Tanah	Poisson Ratio
Lempung jenuh	0,40 – 0,50
Lempung tak jenuh	0,10 – 0,30
Lempung berpasir	0,20 – 0,30
Lanau	0,30 – 0,35
Pasir padat	0,20 – 0,40
Pasir kasar	0,15
Pasir halus	0,25
Batu	0,10 – 0,40

(Sumber : Bowles, 1997)

3.2.8 Angka Pori dan Porositas

Angka pori merupakan rasio yang menunjukkan perbandingan antara volume ruang kosong (*void*) terhadap volume material padat yang ada dalam massa tanah. Hubungan ini dapat dihitung melalui Persamaan 3.9 berikut.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.9)$$

Umumnya, nilai angka pori untuk tanah pasir bernilai 0,4 hingga 1,0 ($e \approx 0,4 - 1,0$). Sedangkan untuk tanah lempung, angka porinya berkisar antara 0,5 hingga 1,5 ($e = 0,5 - 1,5$) (Hardiyatmo, 2002).

Porositas menggambarkan persentase volume ruang kosong dalam tanah terhadap keseluruhan volume tanah, termasuk butiran padat dan pori-porinya. Perhitungan porositas dapat dilakukan menggunakan Persamaan 3.10 berikut.

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (3.10)$$

Dimana :

e = angka pori

V_v = volume pori

V_s = volume butiran tanah padat

n = porositas (%)

V = volume total tanah

3.3 Konsolidasi dan Penurunan

Konsolidasi adalah suatu proses berkurangnya volume tanah jenuh air akibat pengaruh beban luar, terutama pada tanah dengan tingkat permeabilitas rendah. Penurunan volume ini terjadi karena keluarnya air dari pori-pori tanah secara bertahap. Ketika beban diberikan pada lapisan tanah jenuh dengan permeabilitas rendah, tekanan air pori dalam tanah akan meningkat. Perbedaan tekanan ini mendorong air mengalir dari zona dengan tekanan tinggi ke lapisan dengan tekanan lebih rendah, dan pergerakan air ini menyebabkan tanah mengalami penurunan.

Penurunan tanah merupakan suatu hal utama yang harus diperhatikan dengan acuan menggunakan titik referensi ketinggian tempat tertentu. Dengan adanya beban bangunan yang berlebih, maka penurunan tanah dan regangan tanah akan terjadi. Regangan tanah tersebut disebabkan oleh adanya perubahan susunan tanah, dan juga rongga pori yang semakin berkurang. Penurunan total tanah didapatkan dari jumlah penurunan segera dan penurunan konsolidasi (Hardiyatmo, 2010).

Apabila tanah pada suatu wilayah berbentuk lempung, maka penurunannya akan cenderung besar. Apabila tanah pada suatu wilayah berbentuk pasir, maka penurunan pada wilayah tersebut cenderung kecil. Hal ini membuat tanah lempung dikatakan sebagai tanah yang memiliki kompresibilitas tinggi, sedangkan pasir memiliki kompresibilitas rendah. Penurunan pada tanah lempung biasanya terjadi dalam waktu yang lama, hal ini dikarenakan daya rembes dari tanah lempung sangat rendah. Oleh karena itu, tanah lempung akan menjadi persoalan besar dalam pelaksanaan pembangunan infrastruktur. Konsolidasi primer sangat bergantung pada sifat kompresibilitas dan permeabilitas tanah.

3.3.1 Parameter Konsolidasi

Dalam pengujian konsolidasi dengan *consolidometer/oedometer*, terdapat beberapa parameter yang menjadi pengaruh dalam perhitungan konsolidasi tanah.

1. Angka Pori/*Void Ratio* (e)

Angka pori merupakan rasio yang menunjukkan perbandingan antara volume ruang kosong (*void*) terhadap volume material padat yang ada dalam massa tanah. Hubungan ini dapat dihitung melalui Persamaan 3.9 berikut.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.9)$$

Umumnya, nilai angka pori untuk tanah pasir bernilai 0,4 hingga 1,0 ($e \approx 0,4 - 1,0$). Sedangkan untuk tanah lempung, angka porinya berkisar antara 0,5 hingga 1,5 ($e = 0,5 - 1,5$) (Hardiyatmo, 2002).

Dimana :

- e = angka pori
- V_v = volume pori
- V_s = volume butiran tanah padat
- n = porositas (%)
- V = volume total tanah

2. Derajat Penurunan Konsolidasi (U)

Derajat penurunan konsolidasi adalah suatu nilai perbandingan rasio air pori yang menurun akibat konsolidasi dengan tekanan air pori berlebih pada saat kondisi awal. Pada suatu tanah yang memiliki kedalaman tanah z , perkembangan dari proses konsolidasi akibat dari kenaikan tegangan dinyatakan dalam Persamaan 3.11 berikut.

$$U = \frac{e_o - e}{e_o - e_1} = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_0}{\sigma'_1 - \sigma'_0} = 1 - \frac{u}{u_i} \quad (3.11)$$

Dimana :

- U = Derajat konsolidasi pada waktu tertentu di kedalaman z , yang menggambarkan sejauh mana konsolidasi berlangsung.
- e_o = nilai angka pori sebelum konsolidasi dimulai
- e_1 = nilai angka pori setelah konsolidasi terjadi
- e = angka pori tanah selama proses konsolidasi berlangsung (*intermediate*).
- σ' = tegangan efektif tanah pada suatu tahap konsolidasi yang sedang dihitung.
- σ'_0 = tegangan efektif awal sebelum tanah mengalami konsolidasi
- σ'_1 = tegangan efektif akhir setelah proses konsolidasi selesai.
- u_0 = tekanan air pori awal sebelum peningkatan beban luar.
- u_1 = nilai tekanan air pori sesaat setelah kenaikan tegangan total diterapkan, lebih tinggi dari u_0 .
- u = tekanan air pori berlebih yang masih ada selama konsolidasi berlangsung.

3. Koefisien Konsolidasi Vertikal (C_v)

Secara umum, koefisien konsolidasi vertikal akan selalu meningkat jika batas cair tanah juga meningkat. Perhitungan nilai C_v dapat dilihat pada Persamaan 3.12 berikut.

$$C_v = \frac{T_v H_t^2}{t} \quad (3.12)$$

Dimana :

C_v = Koefisien konsolidasi vertikal ($m^2/tahun$)

T_v = faktor waktu bergantung pada derajat konsolidasi

t = waktu kebutuhan dalam mencapai derajat konsolidasi $U\%$ (tahun)

H_t = tebal lapisan tanah terkonsolidasi (m)

4. Tekanan Pra Konsolidasi/*preconsolidation pressure* (σ_c')

Tekanan prakonsolidasi merupakan parameter yang berfungsi untuk menentukan jenis tanah lempung yang akan di analisis pada penurunan konsolidasi.

5. *Over Consolidation Ratio* (OCR)

Secara umum, OCR atau *Over Consolidation Ratio* adalah nilai perbandingan antara tekanan pra konsolidasi (σ_c') dengan tegangan efektif (σ_0'). Nilai OCR diperoleh melalui Persamaan 3.13 berikut.

$$OCR = \frac{\sigma_c'}{\sigma_0'} \quad (3.13)$$

Dimana :

σ_c' = tekanan prakonsolidasi (kN/m^2)

σ_0' = tegangan efektif yang terjadi (kN/m^2)

6. Koefisien Pemampatan (a_v)

Koefisien pemampatan merupakan koefisien yang berfungsi untuk menyatakan adanya kemiringan pada kurva $e - \log \sigma'$. Rumus persamaan untuk koefisien pemampatan dapat dilihat pada Persamaan 3.14 berikut..

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma} = \frac{e_1 - e_2}{\sigma_2' - \sigma_1'} \quad (3.14)$$

Dimana :

a_v = koefisien pemampatan ($m^2/kN, cm^2/kg$)

e_1 = nilai angka pori tanah saat mengalami tegangan efektif sebesar σ_1'

e_2 = nilai angka pori tanah pada kondisi tegangan efektif σ_2' .

7. Koefisien Perubahan Volume (m_v)

Koefisien perubahan volume merupakan parameter yang menggambarkan besaran perubahan volume tanah akibat setiap kenaikan satu satuan tegangan efektif. Nilai ini dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.15 berikut.

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_1} = \frac{a_v}{1 + e_1} \quad (3.15)$$

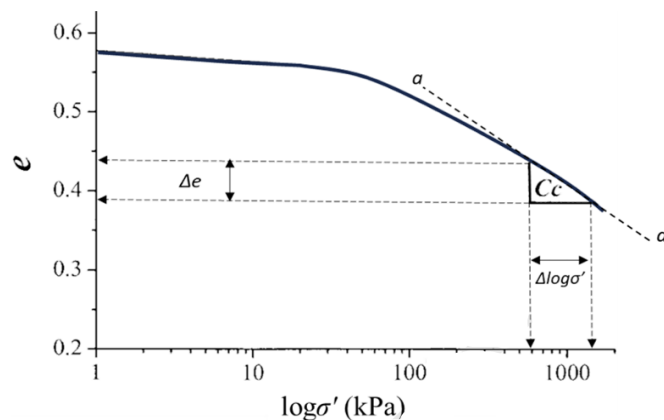
Dimana :

m_v = koefisien perubahan volume (tidak konstan) ($cm^2/kg, m^2/kN$)

8. Indeks Pemampatan (C_c)

Indeks pemampatan merupakan bentuk diagonal lurus yang didapat dari grafik $e - \log \sigma'$. Perhitungan nilai indeks pemampatan dapat dilihat pada Persamaan 3.16 berikut.

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma_2' - \log \sigma_1'} = \frac{e_1 - e_2}{\log \left(\frac{\sigma_2'}{\sigma_1'} \right)} \quad (3.16)$$



Gambar 3.3 Indeks Pemampatan pada Grafik $e - \log \sigma'$

Sedangkan untuk tanah normally consolidated dengan sensitivitas rendah sampai sedang menurut Terzaghi dan Peck (1967) ditunjukkan pada Persamaan 3.17 berikut.

$$C_c = 0,009(LL - 10) \quad (3.17)$$

Sedangkan rumus perhitungan nilai C_c untuk tanah lempung dibentuk kembali (*remolded*) terdapat pada Persamaan 3.18 berikut.

$$C_c = 0,007 (LL - 10) \quad (3.18)$$

Perhitungan nilai C_c menurut Rendon-Herrero terdapat pada Persamaan 3.19 berikut.

$$C_c = 0,141 G_s^{1,2} \left(\frac{1+e_o}{G_s} \right)^{2,38} \quad (3.19)$$

Sedangkan perhitungan nilai C_c menurut Nagaraj dan Murty dapat dilihat pada Persamaan 3.20 berikut.

$$C_c = 0,2343 \left(\frac{LL(\%)}{100} \right) G_s \quad (3.20)$$

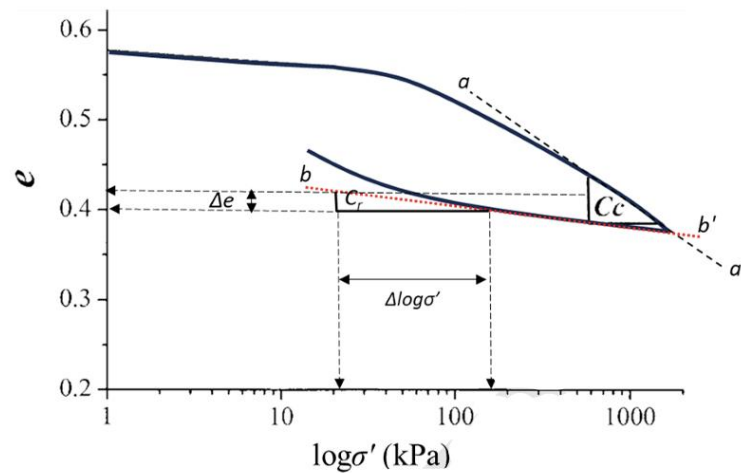
Dimana :

LL = batas cair

9. Indeks Pemampatan Kembali (C_r)

Indeks pemampatan kembali merupakan nilai kemiringan dari kurva hubungan angka pori terhadap logaritma tegangan efektif ($e - \log \sigma'$) pada saat tanah mengalami pelepasan beban, dan kemudian dibebani kembali. Nilai C_r dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.21 berikut.

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1} = \frac{e_1 - e_2}{\log \left(\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} \right)} \quad (3.21)$$



Gambar 3.4 Indeks Pemampatan Kembali pada Grafik $e - \log \sigma'$

3.3.2 Penurunan Konsolidasi

Penurunan tanah akibat pembebanan yang terjadi pada suatu tanah merupakan penurunan total. Analisis penurunan ini dihitung menggunakan teori Terzaghi (1925), dimana nilai deformasi lateral dan nilai regangan satu dimensi diabaikan.

Pengujian konsolidasi satu dimensi memiliki tujuan untuk mengetahui tegangan-regangan tanah tanpa terjadi deformasi lateral, untuk mendapat parameter konsolidasi, dan untuk mengetahui jenis tanah lempung berdasarkan sejarah pembebanan dan nilai OCR.

1. *Normally consolidated*

Dimana nilai tekanan overburden sama dengan tekanan maksimum tanah di masa lalu ($\sigma'_o = \sigma'_c$). Serta nilai OCR = 1.

2. *Over-consolidated*

Dimana nilai tekanan overburden saat ini kurang dari tekanan maksimum tanah di masa lalu ($\sigma'_o < \sigma'_c$). Serta nilai OCR > 1.

3. *Under-consolidated*

Adalah kondisi dimana tanah masih mengalami konsolidasi akibat dari nilai tekanan overburden saat ini (σ'_o). Serta nilai OCR < 1.

Ketika beban diberikan pada tanah, akan terjadi deformasi atau regangan yang disebabkan oleh perubahan struktur tanah dan penyusutan volume pori. Besarnya penurunan tanah akibat konsolidasi dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.22 berikut.

$$S = S_i + S_c + S_s \quad (3.22)$$

Dimana :

S = total penurunan (m)

S_i = penurunan segera (deformasi vertikal setelah pembebanan) (m)

S_c = penurunan konsolidasi primer (air keluar dari pori-pori) (m)

S_s = penurunan konsolidasi sekunder (setelah konsolidasi primer) (m)

Penurunan total tanah merupakan jumlah dari penurunan segera dan penurunan konsolidasi, yang secara bersama-sama menggambarkan deformasi vertikal tanah akibat beban yang diberikan.

1. Penurunan Segera (S_i)

Penurunan segera umumnya terjadi pada tanah berbutir kasar seperti pasir. Hal ini disebabkan oleh sifat pasir yang memiliki kompresibilitas rendah, sehingga tekanan air pori cepat terdispasi setelah beban diterapkan. Perhitungan penurunan segera pada tanah lempung tertuang pada Persamaan 3.23 berikut.

$$S_i = q_0 \sum I \frac{h_i}{E_i} \quad (3.23)$$

Dengan perhitungan nilai E menurut Mitchell dan Gardner (1975) terdapat pada Persamaan 3.24 dan Persamaan 3.25 berikut:

$$E = 10 (N + 15) \text{ k/ft}^2 \text{ (tanah pasir)} \quad (3.24)$$

$$E = 6(N + 5) \text{ k/ft}^2 \text{ (pasir berlempung)} \quad (3.25)$$

Dengan nilai $1 \text{ k/ft}^2 = 4,882 \text{ ton/m}^2 = 48,07 \text{ kN/m}^2$ dan N = nilai $N\text{-SPT}$.

2. Penurunan Konsolidasi Primer (S_c)

Penurunan konsolidasi primer terjadi seiring berjalannya waktu dan disertai dengan penyusutan volume massa tanah, Proses ini terjadi disebabkan oleh keluarnya air dari rongga antar butiran tanah, khususnya tanah jenuh dengan permeabilitas rendah. Persamaan untuk menyatakan penurunan konsolidasi primer dapat dilihat pada Persamaan 3.26, lempung *normally consolidated* dapat dilihat pada Persamaan 3.27, dan untuk lempung *overconsolidated* dapat dilihat pada Persamaan 3.28 dan Persamaan 3.29 berikut.

$$\sigma'_1 = \sigma'_o + \Delta\sigma \quad (3.26)$$

a. Lempung *normally consolidated*

$$S_c = C_c \frac{H}{1+e_o} \log \left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_o} \right) \quad (3.27)$$

b. Lempung *overconsolidated* ($\sigma_c \geq \sigma'_o + \Delta\sigma$)

Jika $\sigma'_o + \Delta\sigma \leq \sigma'_c$,

$$S_c = C_s \frac{H}{1+e_o} \log \frac{\sigma'_1}{\sigma'_o} \quad (3.28)$$

Jika $\sigma'_o + \Delta\sigma > \sigma'_c$,

$$S_c = C_s \frac{H}{1+e_o} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} + C_c \frac{H}{1+e_o} \log \frac{\sigma'_1}{\sigma'_c} \quad (3.29)$$

Dimana :

C_s = indeks pemampatan kembali = $(0,2)C_c$

C_c = indeks pemampatan selama proses konsolidasi primer

H = ketebalan lapisan tanah yang terkonsolidasi (m)

σ'_c = tekanan prakonsolidasi sebelum konsolidasi kembali (kN/m^2)

e_o = angka pori awal (sebelum konsolidasi).

$\Delta\sigma$ = tambahan tegangan akibat beban eksternal (kN/m^2)

σ'_o = tekanan *overburden* efektif awal (kN/m^2)

3.4 Stabilitas Lereng

Pada lereng atau permukaan tanah dengan kemiringan tertentu, gaya gravitasi menjadi faktor utama yang mendorong massa tanah bergerak ke arah bawah. Jika gaya dorong akibat gravitasi melebihi kemampuan tanah dalam menahan gaya tersebut, maka kestabilan lereng terganggu dan berpotensi terjadi longsor.

3.4.1 Kelongsoran Lereng

Terdapat berbagai faktor yang mempengaruhi hasil perhitungan analisis stabilitas lereng, diantaranya adalah kondisi lapisan tanah, nilai kuat geser tanah, serta nilai permeabilitas tanah. Berdasarkan pendapat Terzaghi (1950), penyebab terjadinya kelongsoran lereng dapat diklasifikasikan menjadi 2 kategori, yaitu faktor internal dan faktor eksternal. Faktor internal merujuk pada penyebab longsor yang berasal dari dalam sistem tanah itu sendiri tanpa pengaruh dari luar, contohnya yakni tekanan air pori yang mengalami kenaikan dalam lereng. Sementara itu, faktor eksternal berasal dari luar sistem tanah dan berkontribusi terhadap penambahan gaya geser tanpa disertai perubahan kuat geser tanah. Di bawah ini adalah beberapa contoh penyebab terjadinya kelongsoran lereng alam menurut Hardiyatmo (2010).

1. Adanya beban tambahan di atas lereng, seperti bangunan, kendaraan, atau timbunan yang meningkatkan gaya dorong lereng.
2. Penggalan tanah pada kaki lereng yang mengurangi daya dukung dan kestabilan lereng bagian bawah.
3. Pemotongan lereng untuk memperbesar kemiringan
4. Perubahan muka air tanah secara tiba-tiba.
5. Peningkatan tekanan lateral akibat akumulasi air.
6. Gempa bumi atau getaran berlebih.
7. Penurunan kekuatan geser tanah.

3.4.2 Pengaruh Longsor

Hardiyatmo (2010) menyatakan bahwa longsor dipengaruhi oleh beberapa faktor sebagai berikut.

1. Pengaruh Iklim

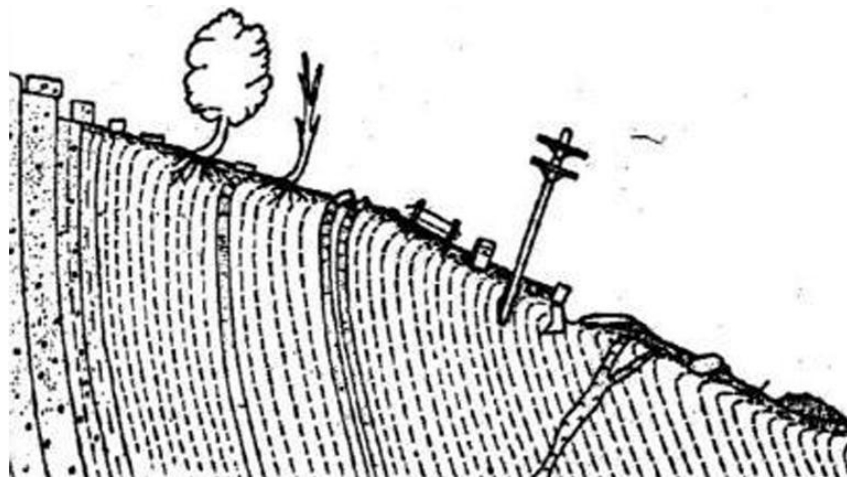
Secara umum, nilai kuat geser tanah akan selalu berubah seiring dengan pergantian musim, terutama untuk tanah lempung. Beberapa jenis tanah mengalami penyusutan selama musim kemarau akibat kehilangan kadar air, dan kembali mengembang ketika memasuki musim penghujan karena peningkatan kejenuhan air. Oleh karena itu, dalam analisis stabilitas lereng, nilai kuat geser yang digunakan adalah nilai pada kondisi tanah jenuh, yaitu pada saat kandungan air tanah berada pada titik maksimum seperti yang terjadi di musim hujan.

2. Pengaruh Air

Rembesan air dalam tanah dapat menghasilkan gaya rembesan yang mempengaruhi kestabilan lereng. Erosi juga berperan penting, seperti erosi mampu mengurangi tinggi lereng dan meningkatkan stabilitas, dan akan menurunkan kestabilan lereng apabila terjadi pada kaki lereng. Selain itu, penurunan muka air tanah secara tiba-tiba akan mengurangi gaya angkat air, sehingga beban tanah bertambah dan menimbulkan peningkatan tegangan geser. Jika tegangan tersebut melebihi kekuatan geser tanah, kelongsoran dapat terjadi. Dalam kondisi ekstrem, penurunan gaya antar partikel (gaya intergranular) dapat menyebabkan tanah mengalir seperti cairan.

3. Pengaruh Rangkak (*Creep*)

Siklus kembang susut merupakan siklus yang terjadi dekat permukaan tanah miring dan terjadi sebagai akibat dari perubahan temperatur, iklim, dan pengaruh pembekuan air. Pada saat tanah lereng berkembang dan menyusut, hal tersebut akan mempengaruhi gerakan lereng untuk bergerak ke bawah. Ilustrasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.5 berikut.



Gambar 3.5 Kondisi Lereng Akibat Pengaruh Rangkak

(Sumber : Taylor, 1948, dalam Hardiyatmo, 2010)

Dari gambar di atas, dapat dilihat bahwa pengaruh rangkak dapat menyebabkan beberapa hal berikut :

1. Blok batuan menjadi bergerak dan batuan yang mulai meluncur atau menggelinding ke arah bawah lereng.
2. Batang pohon yang tumbuh di area lereng menunjukkan kelengkungan ke arah atas.
3. Permukaan lereng mengalami deformasi berupa lengkungan, yang menandakan tarikan dari bagian bawah.
4. Bangunan di sekitar lereng tampak miring atau bergeser dari posisi awal.
5. Kerusakan pondasi dan dinding penahan tanah, ditandai dengan retakan atau pergeseran struktur.
6. Jalur transportasi mengalami kerusakan atau keluar dari posisi normal akibat pergerakan massa tanah.

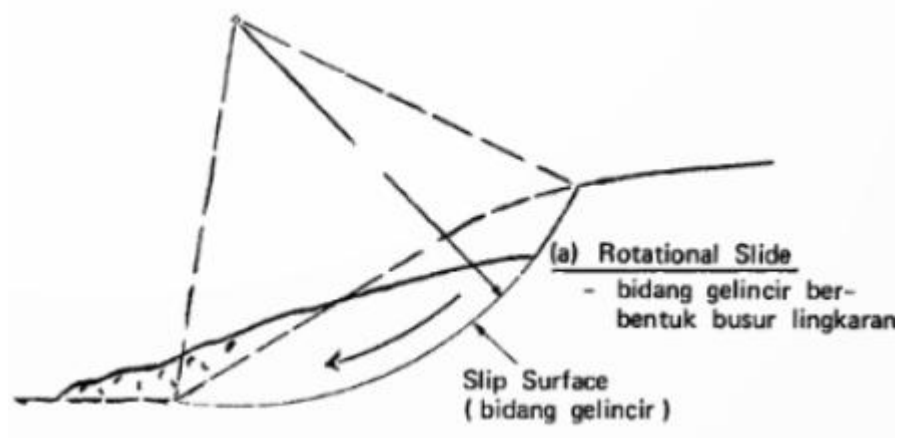
3.4.3 Jenis Kelongsoran Tanah

Ketika terjadi kelongsoran, massa tanah akan bergerak mengikuti suatu bidang tertentu yang dinamakan dengan bidang gelincir. Pergerakan ini umumnya menyebabkan tanah mengalami disintegrasi menjadi partikel-partikel yang lebih kecil. Fenomena ini menunjukkan bahwa gaya geser tanah tidak mampu menahan gaya pendorong yang bekerja sepanjang bidang gelincir tersebut. Menurut Wesley

(2017), kegagalan lereng terjadi ketika kuat geser tanah lebih kecil dibandingkan gaya yang bekerja pada bidang potensial longsor. Bidang gelincir tanah terbagi menjadi dua, diantaranya adalah :

1. Longsoran Rotasi (*Rotational Slide*)

Longsoran rotasi yaitu bidang gelincir yang cenderung berbentuk busur lingkaran. Jenis longsoran ini umumnya terjadi pada massa tanah yang bersifat relatif homogen, seperti pada timbunan tanggul. Pola pergerakannya cenderung membentuk bidang melengkung ke atas, yang merupakan ciri khas dari longsoran rotasi.

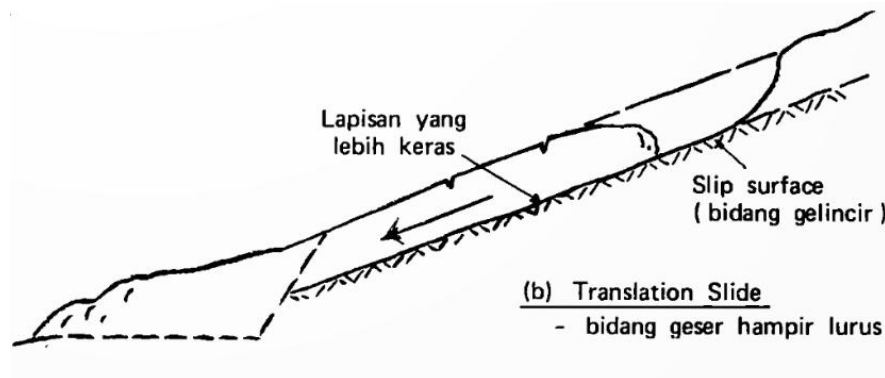


Gambar 3.6 Bentuk Longsoran Rotasi

(Sumber : Wesley, 1977)

2. Longsoran Translasi (*Translational Slide*)

Longsoran translasi adalah bidang gelincir yang berbentuk cenderung datar dan sejajar muka tanah. Longsoran ini bergerak pada satu jurusan, umumnya terjadi di atas permukaan keras yang sejajar muka tanah. Longsoran translasi biasanya terjadi pada lereng dengan komponen berupa tanah lempung dengan tekanan air pori yang cenderung tinggi.



Gambar 3.7 Bentuk Longsoran Translasi

(Sumber : Wesley, 1977)

3.4.4 Parameter Stabilitas Lereng

Beberapa parameter penting yang dibutuhkan dalam analisis stabilitas lereng meliputi aspek-aspek berikut.

1. Kohesi (c)
2. Sudut Geser Dalam (ϕ)
3. Berat Jenis Tanah (γ)
4. Tekanan Air Pori (u)
5. Sudut Lereng (β)
6. Faktor Keamanan (*Safety Factor*) (SF)

3.4.5 Teori Stabilitas Lereng

Secara umum, analisis stabilitas lereng dilakukan berdasarkan konsep keseimbangan batas plastis (*limit plastic equilibrium*) dan bertujuan untuk menentukan faktor keamanan pada bidang longsor yang potensial. Menurut Hardiyatmo (2010), di bawah ini adalah beberapa anggapan yang dibuat pada analisis stabilitas lereng.

1. Peristiwa longsor dianggap sebagai masalah dua dimensi yang terjadi sepanjang bidang longsor tertentu.
2. Massa tanah yang mengalami longsor diasumsikan sebagai benda kaku (benda masif).

3. Kuat geser tanah dianggap isotropis, sehingga tidak mempengaruhi nilai tanahan geser di sepanjang bidang tersebut.
4. Nilai faktor keamanan dihitung berdasarkan rata-rata tegangan geser tanah yang terdapat pada longsoran. Oleh karena itu, meskipun faktor keamanan menunjukkan angka lebih dari satu, gaya geser tanah masih dapat terlampaui di titik-titik tertentu pada bidang longsor tersebut.

Berdasarkan Kementerian PUPR (2018), stabilitas lereng merupakan kondisi dimana gaya penahan dan penggerak mengalami keseimbangan yang berarti. Suatu lereng dinyatakan stabil apabila gaya penahan lebih besar daripada gaya penggerak yang bekerja padanya. Sebagai acuan teknis, Direktorat Jenderal Bina Marga telah menerbitkan pedoman yang mencakup berbagai metode analisis stabilitas lereng sebagai berikut.

1. Metode Fellenius (*Swedish Circle*)

Metode fellenius ini dilakukan dengan membagi massa tanah lereng menjadi beberapa irisan vertikal, kemudian menghitung keseimbangan momen dari masing-masing irisan terhadap titik pusat rotasi. Nilai faktor keamanan diperoleh dari rasio gaya penahan dan gaya penggerak yang dihitung berdasarkan keseimbangan rotasional.

2. Metode Bishop

Metode bishop merupakan pengembangan dari metode fellenius yang mempertimbangkan gaya normal dan keseimbangan momen pada setiap irisan lereng. Metode ini memberikan hasil yang lebih akurat karena memperhitungkan pengaruh tegangan normal antar irisan, meskipun masih mengabaikan keseimbangan gaya horizontal.

3. Metode Janbu

Metode janbu dilakukan dengan pendekatan keseimbangan gaya dan momen untuk setiap irisan. Metode ini banyak digunakan untuk analisis lereng dengan kondisi geometri kompleks.

3.5 Perkuatan Tanah

Perkuatan tanah merupakan suatu metode yang dilakukan untuk menentukan kekuatan tanah dan mengetahui stabilitas tanah dalam menahan beban struktur bangunan. Secara umum, tanah yang ada di lapangan kurang mendukung untuk dilaksanakan proyek konstruksi, sehingga tanah pada lokasi yang ditentukan harus diberi perkuatan. (Purwanto, 2012).

Menurut Das dan Sobhan (2013), perkuatan tanah merupakan suatu upaya dalam meningkatkan kekuatan tanah dalam menahan stabilitas dengan menggunakan material tambahan seperti geotekstil, baja, maupun menggunakan serat alami. Nilai faktor keamanan dalam analisis stabilitas tanah dan perkuatannya dapat dilihat dalam Tabel 3.5 berikut.

Tabel 3.4 Nilai Faktor Keamanan Lereng

Biaya dan Konsekuensi Kegagalan Lereng	Tingkat Ketidakpastian Kondisi Analisis	
	Rendah ^a	Tinggi ^b
Biaya perbaikan setara dengan biaya tambahan untuk desain konservatif	1,25	1,5
Biaya perbaikan lebih besar dari biaya tambahan untuk desain konservatif	1,5	2,0 atau lebih
^a Ketidakpastian rendah : kondisi geologi dapat dipahami, kondisi tanah seragam, penyelidikan tanah jelas, lengkap, dan konsisten dengan kondisi di lapangan. ^b Ketidakpastian tinggi : kondisi geologi sangat kompleks, kondisi tanah variatif, data pengujian tidak konsisten atau terbatas.		

(Sumber : SNI 8460:2017)

Proses perkuatan tanah umumnya dilaksanakan menjadi dua tahap, yakni tahap pekerjaan kontrol yang mencakup kegiatan penataan geometri, drainase, dan mengendalikan air rembesan. Tahap berikutnya adalah pekerjaan perkuatan yang mencakup penataan struktur perkuatan menggunakan geosintetik, dan-8 tindakan lainnya yang berfungsi untuk stabilisasi tanah.

3.5.1 Perkuatan Tanah dengan Geosintetik

Geosintetik merupakan suatu material konstruksi yang dibentuk menggunakan bahan polimer fleksibel, dan digunakan bersama berbagai material geoteknik sebagai perkuatan dari suatu struktur (ASTM D 4439). Produk ini dirancang untuk berbagai aplikasi, diantaranya adalah *Geocell*, *Geogrid*, *HDPE Geomembrane*, *Geotextile Non Woven*, dan yang paling umum digunakan dalam konstruksi adalah jenis *Geotextile Woven*.

Menurut Koerner (2005), geotekstil adalah kain permeabel yang digunakan pada tanah untuk fungsi-fungsi seperti separasi, filtrasi, perkuatan, perlindungan, dan drainase. Terdapat dua jenis geotekstil yang banyak digunakan untuk perkuatan, yaitu :

1. Geotekstil anyam (*geotextile woven*)

Geotekstil anyam menurut Koerner (1990) merupakan geotekstil yang diproduksi dengan metode anyam (*weaving*) menggunakan material benang sintetis. Umumnya, geotekstil anyam dibuat menggunakan *polypropylene* atau *polyester* yang memiliki sifat berkekuatan tarik yang tinggi, serta memiliki regangan yang rendah. Geotekstil ini baik untuk perkuatan tanah dengan tanah yang bersifat lunak.

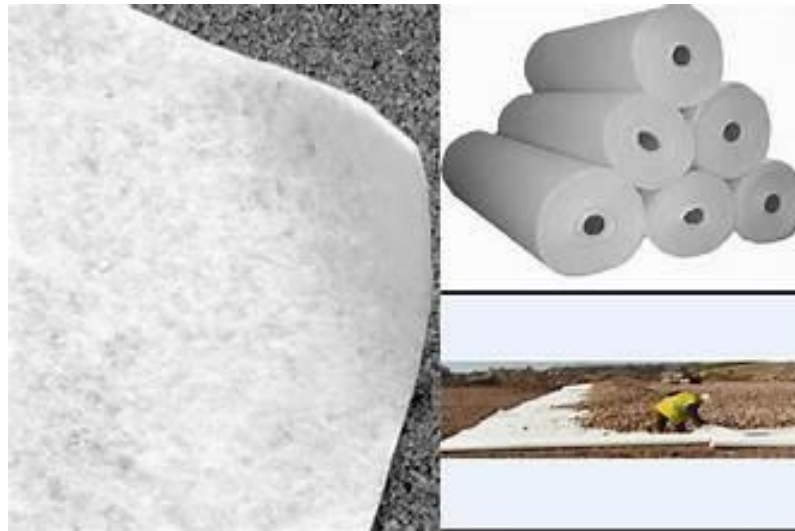


Gambar 3.8 Geotekstil Anyam

(Sumber : PT. PrimaTex Geokarya Abadi)

2. Geotekstil Nir-anyam (*geotextile non woven*)

Menurut Koerner (1990), geotekstil nir-anyam merupakan material geosintetik yang digunakan untuk perkuatan tanah tanpa proses penganyaman, namun pembuatannya dilakukan dengan menggunakan Teknik *needle-punching*, *thermal bonding*, maupun *chemical bonding*. Material pembentuknya sama dengan geotekstil anyam. Namun, pengaplikasian geotekstil nir-anyam lebih cocok untuk filtrasi, drainase karena sifatnya yang lebih permeabel. Bentuk geotekstil nir-anyam dapat dilihat pada Gambar 3.9 berikut.



Gambar 3.9 Geotekstil Nir-anyam

(Sumber : PT. PrimaTex Geokarya Abadi)

Menurut Koerner (1990) dalam buku *Designing with Geosynthetics*, terdapat lima fungsi utama geotekstil sebagai dasar pemilihan untuk proyek konstruksi.

1. Sebagai Pemisah

Geotekstil banyak digunakan sebagai pemisah dua lapisan tanah yang memiliki sifat berbeda, sehingga material tidak akan tercampur dan kestabilan struktur dapat terjaga.

2. Sebagai Filtrasi

Geotekstil memiliki fungsi sebagai penyaring aliran air sekaligus menjaga kestabilan ganah, sehingga tidak terjadi longsor pada tanah.

3. Sebagai Drainase

Geotekstil dapat digunakan untuk drainase, hal ini dikarenakan air akan dialirkan dalam bidangnya (*in-plane flow*).

4. Sebagai Perkuatan

Geotekstil seringkali digunakan agar kekuatan tarik pada tanah yang lemah dapat meningkat. Oleh karena itu, lereng, tanggul, ataupun timbunan dapat menjadi lebih stabil.

5. Sebagai Pelindung

Geotekstil memiliki fungsi sebagai pelindung material lain yang ada, contohnya geomembran ataupun kerusakan mekanis. Umumnya, geotekstil sebagai pelindung digunakan sebagai bantalan terhadap tekanan material yang ada di atasnya.

Dari lima fungsi utama geotekstil dalam proyek konstruksi, di bawah ini adalah pendekatan analitis yang digunakan dalam perhitungan kebutuhan teknis sesuai fungsi geotekstil yang diterapkan menurut Koerner (2005).

1. Gaya Tarik Geotekstil (*Ultimate Tensire Force*)

Gaya tarik yang dibutuhkan tanah dalam menahan gaya lateral dapat didefinisikan pada Persamaan 3.31 berikut.

$$T = \sigma_h \cdot S \quad (3.31)$$

Dimana :

T = Gaya tarik yang dibutuhkan (kN/m)

σ_h = Tegangan horisontal tanah (kN/m²)

S = Spasi antar lapisan perkuatan (m)

3.6 Bambu

Secara umum, struktur bangunan berbahan dasar bambu cenderung lebih ekonomis dibandingkan dengan bahan bangunan lainnya untuk fungsi serupa. Di

Indonesia, bambu merupakan material yang sangat mudah diperoleh karena ketersediaannya yang melimpah. Tanaman ini termasuk dalam famili *Gramineae* (rumput-rumputan) dan memiliki karakteristik unik, salah satunya adalah tidak mengalami perkembangan diameter batang atau gemang (Frick, 2004).

3.6.1 Sifat Mekanika Bambu

Menurut Frick (2004), ada beberapa hal yang mempengaruhi sifat-sifat teoritis bambu, diantaranya adalah sebagai berikut.

1. Jenis bambu yang digunakan, karena karakteristik fisik dan mekanis setiap spesies berbeda.
2. Usia bambu pada saat ditebang, yang menentukan kekuatan dan ketahanannya.
3. Kadar air kesetimbangan dalam batang bambu, karena tingginya kadar air dapat menurunkan kekuatan.
4. Bagian batang yang digunakan untuk konstruksi, dimana bagian bawah hingga tengah batang umumnya lebih baik dibandingkan bagian atas.
5. Letak dan jarak antar ruas, semakin panjang jarak antar ruas biasanya berkorelasi dengan kekuatan struktur yang lebih tinggi.

Penentuan sifat mekanis bambu menurut prasyarat dalam pembangunan merupakan bambu kering dengan kadar air yang terkandung maksimum 12%. Angka tersebut merupakan kadar air kesetimbangan untuk batas wajar pada wilayah dengan iklim tropis.

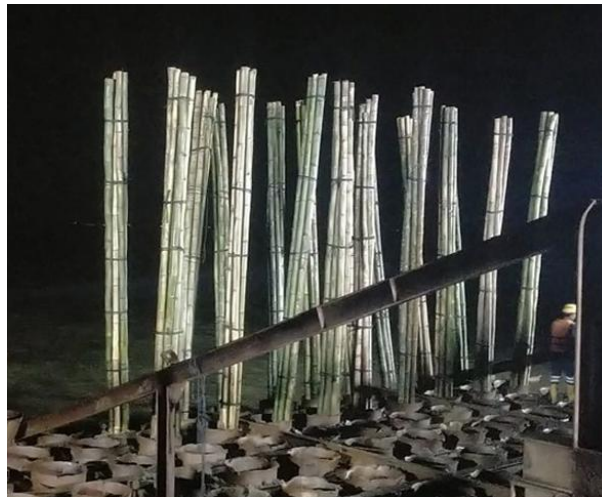
Nilai berat jenis bambu akan selalu berbeda untuk setiap jenis bambu, dimana rentang nilainya berada di antara 670-720 kg/m². Bagian batang bambu bagian mana yang akan digunakan dan proses pengeringan juga akan mempengaruhi besaran nilai berat jenis. Dalam konstruksi bangunan berbahan bambu di Indonesia, berat jenis rata-rata bambu yang digunakan dianggap sebesar 700 kg/m³.

Nilai kuat tarik bambu sangat bergantung pada gaya tarik yang bekerja sejajar searah serat, posisi potongan batang, dan diameter batang. Di Indonesia, tegangan tarik izin untuk arah sejajar serat adalah 29,4 N/mm². Sementara itu, nilai kuat tekan bambu menunjukkan kemampuan bambu dalam menahan gaya tekan aksial. Batang bambu tanpa ruas memiliki daya tahan terhadap tekanan yang 8-45% lebih tinggi

dibandingkan dengan batang bambu beruas. Nilai tegangan tekan izin yang digunakan di Indonesia sebesar $7,85 \text{ N/mm}^2$.

Nilai kuat geser bambu merupakan parameter yang menahan gaya yang mampu menyebabkan pergeseran bambu. Perbedaan nilai kuat geser dipengaruhi oleh tebal dinding batang, serta letak bagian batang yang akan dilakukan pengujian. Di Indonesia, nilai kuat geser bambu yang diizinkan sebesar $2,45 \text{ N/mm}^2$. Sedangkan nilai kuat lentur adalah parameter yang menahan gaya yang bisa menyebabkan lengkung pada bambu atau menahan beban yang diberikan kepada bambu. Bambu memiliki sifat yang elastis, sehingga lendutan yang terjadi cenderung tinggi. Nilai kuat lentur yang diizinkan di Indonesia sebesar $9,80 \text{ N/mm}^2$.

Modul elastis bambu merupakan parameter yang menunjukkan bahwa bambu dengan struktur yang lebih langsing lebih kuat dibandingkan dengan batang yang utuh. Kekuatan dan elastisitas bambu dipengaruhi oleh kepadatan serat kokoh bambu. Di Indonesia, bambu memiliki standar nilai modul elastis sebesar 20 N/mm^2 . Bambu yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3. berikut.



Gambar 3.10 Material Bambu yang Digunakan

(Sumber : BBPJN Jateng – DIY, 2024)

3.6.2 Keunggulan Bambu sebagai Bahan Konstruksi

Penilaian bambu sebagai bahan konstruksi dilakukan dengan audit nyata dengan indikator penentu, sehingga proses konstruksi dapat dilaksanakan dan bahan yang digunakan bisa lebih optimal. Di bawah ini adalah penentu audit bambu secara ekologis menurut Frick (2004) :

1. Bambu merupakan bahan yang didapat dari alam yang mudah untuk dilestarikan dan dibudidayakan secara terus-menerus. Proses tersebut menandakan bahwa bambu akan mengikat CO₂ dan memproduksi oksigen oleh asimilasi.
2. Bambu dapat dieksploitasi secara optimal dan ramah lingkungan dengan melakukan tebang pilih dan sesuai waktu kadar kanji rendah.

3.7 Cerucuk

Menurut Suyuti dkk (2023), cerucuk adalah batang bambu yang ditanam secara vertikal dalam tanah lunak sebagai elemen struktural dalam pondasi. Cerucuk bambu bekerja melalui gesekan antara permukaan dengan tanah lunak. Dalam konstruksinya, bambu ditanam dan disusun dalam pola tertentu pada muka antar lapisan tanah lunak dengan material geotekstil sebelum ditutup lapisan granuler.

3.7.1 Tujuan Penggunaan Cerucuk

Tujuan digunakannya cerucuk adalah sebagai berikut.

1. Memperkuat *subgrade* dengan kondisi tanah yang sangat lunak, khususnya pada daerah pesisir.
2. Menambah kekuatan geser dan meningkatkan faktor keamanan lereng.
3. Meningkatkan gesekan lateral dan vertikal antara bambu dengan tanah lunak.
4. Mengurangi *settlement* dengan menahan massa tanah di atasnya.

3.7.2 Daya Dukung Cerucuk pada Tanah Lunak

Dalam proses desain cerucuk untuk perkuatan tanah lunak, dibutuhkan pendekatan analitis perhitungan daya dukung secara akurat. Menurut Bowles (1997), daya dukung elemen pondasi dalam seperti cerucuk dipengaruhi faktor geometri dan sifat fisik tanah, sehingga persamaan empiris dibutuhkan untuk

memperoleh estimasi realistis di lapangan. Dalam penelitian Suyuti dkk (2019), ada beberapa persamaan untuk cerucuk dalam tanah lunak, diantaranya adalah sebagai berikut.

1. Kapasitas Gesek Tiang (q_{bp})

Dalam perhitungan kapasitas geser, digunakan persamaan empiris yang membandingkan dimensi tiang dengan karakteristik tanah. Rumus mencari kapasitas gesek tiang dapat dilihat pada Persamaan 3.32 berikut.

$$q_{bp} = \alpha_{bp} \left(\frac{B}{S} \right) c_u \quad (3.32)$$

Dimana :

q_{bp} = kapasitas geser tiang

α_{bp} = koefisien gesekan antara cerucuk dengan tanah

B = lebar pondasi

S = jarak antar cerucuk

c_u = kohesi dalam kondisi *undrained*

2. Koefisien Gesekan (α_{bp})

Koefisien gesekan cerucuk bernilai tidak tetap, melainkan dipengaruhi geometri cerucuk serta karakteristik tanah. Rumus perhitungan koefisien gesekan dapat dilihat pada Persamaan 3.33 berikut.

$$\alpha_{bp} = \left(\frac{0,5L}{d} \right)^{-0,2} \left(\frac{c_u}{p'_0} \right)^{-0,3} \quad (3.33)$$

Dimana :

α_{bp} = koefisien gesekan antara cerucuk dengan tanah

L = panjang cerucuk

d = diameter cerucuk

p'_0 = tekanan efektif awal tanah

c_u = kohesi dalam kondisi *undrained*

3. Rasio c_u/p'_0

Nilai rasio ini menggambarkan hubungan kuat geser tanah dengan tekanan efektif awal tanah. Persamaan perhitungan tersebut dapat dilihat pada Persamaan 3.34 berikut.

$$\frac{c_u}{p'_0} = 0,11 + 0,0037 \times PI \quad (3.34)$$

Dimana :

PI = indeks plastisitas tanah (%)

4. Indeks Plastisitas (PI)

Indeks plastisitas merupakan indikator yang menunjukkan sejauh mana tanah mengalami deformasi plastis dan dapat diketahui berdasarkan nilai indeks kompresi tanah (C_c) dan nilai rasio pori awal (e_0). Nilai indeks plastisitas dapat diketahui dengan Persamaan 3.35, serta daya dukung ultimit dapat diketahui pada Persamaan 3.36 berikut.

$$PI = 102,3 \left(\frac{C_c}{1+e_0} \right) + 13,34 \quad (3.35)$$

$$q_u = q_{sb} + q_{gb} + q_{bp} \quad (3.36)$$

Dimana :

q_u = daya dukung ultimit (kN/m^2)

q_{sb} = daya dukung *soil-bags* / bangunan perkuatan (kN/m^2)

q_{gb} = daya dukung *geo-bamboo* (kN/m^2)

3.7.3 Kegagalan Geser pada Cerucuk

Kegagalan geser (*shear failure*) terjadi pada saat cerucuk mengalami gaya geser berlebih yang terjadi sepanjang bidang longsor. Perhitungan kegagalan geser tersebut dapat dilihat pada Persamaan 3.36 berikut.

$$F_r = \frac{N_r \tan \varphi'}{F_s} + \frac{c' \Delta L_m}{F_s} \quad (3.36)$$

Dimana :

F_r = gaya geser resistif

N_r = gaya normal pada dasar slice

c' = nilai kohesi efektif dalam kondisi tegangan efektif

φ' = sudut geser dalam efektif, mencerminkan tingkat geser antar butiran

ΔL_m = panjang slice

3.8 Pembebanan Lalu Lintas

Beban rencana yang digunakan untuk analisis merupakan beban yang didapatkan dari kontak roda dengan perkerasan. Beban lalu lintas sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis kendaraan, jumlah sumbu roda, beban muatan, dan volume Lalu lintas Harian Rata-rata (LHR). Menurut Direktorat Jenderal Bina Marga (2021), perhitungan beban lalu lintas dalam perencanaan jalan dilakukan dengan menggunakan analisis beban ekuivalen, serta mempertimbangkan laju pertumbuhan lalu lintas tahunan sebagai bagian dari desain beban. Sedangkan menurut metode AASHTO 1972 dan 1993 dihitung dengan satuan *Equivalent Single Axle Load* (ESAL) yang merepresentasikan dampak kumulatif kendaraan terhadap kerusakan perkerasan setara dengan beban gandar tunggal standar 18.000 pon.

3.9 PLAXIS

Program *PLAXIS* merupakan perangkat lunak yang seringkali dioperasikan dalam bidang geoteknik, seperti tegangan-deformasi, daya dukung tanah, dan stabilitas lereng. Program ini berfungsi dalam proses analisis perilaku tanah dan interaksinya dengan struktur. Dalam *PLAXIS*, pemodelan material tanah dilakukan dengan pendekatan konstitutif yang sesuai, seperti metode Mohr-Coulomb.

Model Mohr-Coulomb adalah metode paling banyak digunakan untuk proses analisis awal yang sederhana. Pemodelan ini menggunakan data hasil tes laboratorium berupa c , φ , γ , dan modulus elastisitas. Pada analisis stabilitas lereng, pemodelan ini merupakan solusi yang paling tepat untuk diaplikasikan. Hal ini

dikarenakan pemodelan yang akan dilakukan lebih detail dan maksimal hingga mendekati titik kritis tanah pada suatu bidang longsor.

Menurut Budhu (2011), dalam buku *Soil Mechanics and Foundations*, analisis numerik dengan metode elemen hingga (*finite element method*) penting untuk memahami respons tanah terhadap beban yang diberikan, khususnya untuk permasalahan geoteknik yang rumit untuk diselesaikan dengan analisis konvensional. Dengan dilakukan pembagian tanah menjadi beberapa elemen kecil, *PLAXIS* dapat menghasilkan distribusi tegangan, regangan, dan deformasi yang sangat detail.

Secara umum, tahapan dalam pemodelan menggunakan perangkat lunak *PLAXIS* dilakukan melalui beberapa langkah sistematis berikut.

1. Memasukkan Data

Pada tahap awal pemodelan, seluruh data yang diperlukan dimasukkan ke dalam sistem, termasuk geometri lereng atau struktur dinding penahan tanah, parameter sifat fisik dan mekanik tanah, kondisi pembebanan, serta kondisi awal. Tahap ini bertujuan untuk merepresentasikan kondisi lapangan secara realistis ke dalam model numerik.

2. Proses Perhitungan Data

Setelah data dimasukkan, dilakukan proses analisis berdasarkan jenis perhitungan yang sesuai dengan tujuan pemodelan. *PLAXIS* menyediakan beberapa opsi analisis, seperti perhitungan konsolidasi, analisis plastis, pengurangan nilai kohesi dan sudut geser (*phi/c-reduction*), serta proses analisis dinamis.

3. Hasil Luaran

Dari perhitungan dan analisis yang telah dilakukan program, hasil luaran akan tersedia dalam bentuk gambar, kurva, serta angka.

4. Kurva

Kurva yang dihasilkan dari proses perhitungan analisis akan menunjukkan beberapa parameter yang dihasilkan untuk dilakukan perbandingan dalam setiap luaran.

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Tinjauan Umum

Penelitian ini merupakan penelitian yang menggunakan metode deskriptif kualitatif, dengan mengandalkan data sekunder yang di analisis untuk dilakukan analisis pada perangkat lunak *PLAXIS V.21* berbasis model elemen hingga. Penelitian ini dilakukan pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Semarang – Demak Sta. 1+600. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi stabilitas lereng serta penurunan konsolidasi yang terjadi pada lokasi tersebut.

Proses identifikasi stabilitas dan penurunan lereng akan dilakukan pada timbunan tanah jalan dengan perkuatan berupa geotekstil dan matras bambu. Pemodelan dilakukan dengan membandingkan antara desain tipikal penampang melintang original desain sesuai DED dan perubahan desain setelah dilakukan *trial embankment* (uji coba tanggul laut).

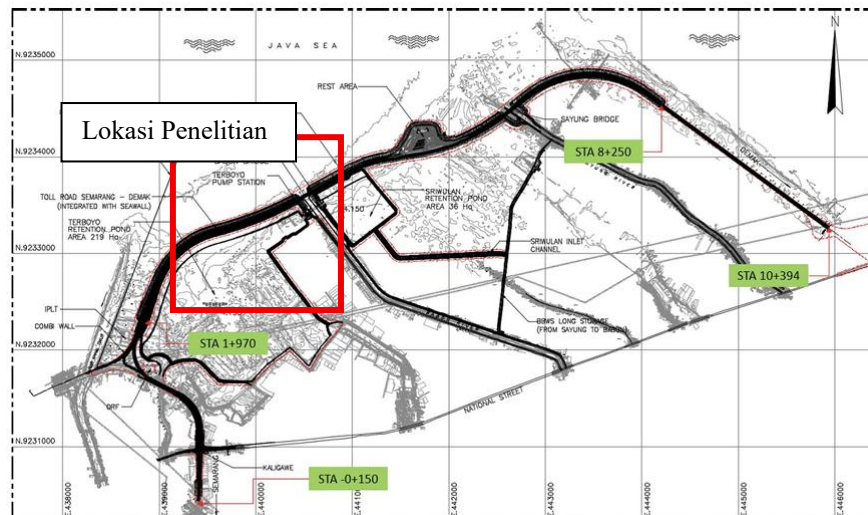
4.2 Data Penelitian

Pada penelitian ini, digunakan data sekunder yang diperoleh dari pemilik proyek. Dalam hal ini pemilik proyek adalah Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Jateng – DIY. Adapun data yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Data Laporan Hasil Penyelidikan Tanah (Data *Properties* Tanah).
2. Peta Lokasi Penelitian.
3. Desain Penampang Jalan.
4. Data Beban Lxalu Lintas.
5. Data Pembebanan akibat Gempa.

4.3 Lokasi Penelitian

Penelitian tugas akhir ini mengambil lokasi di Proyek Jalan Tol Semarang – Demak Seksi 1B. Peta yang menunjukkan lokasi pelaksanaan proyek Jalan Tol Semarang – Demak 1B tercantum pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Peta Lokasi Penelitian
(Sumber : BBPJN Jateng – DIY, 2023)

4.4 Tahap Penelitian

Untuk melaksanakan penelitian ini, terdapat beberapa tahapan yang perlu dilakukan sebagai berikut.

1. Tahap Pengumpulan Data.

Pada tahap ini, dilakukan pengumpulan berbagai informasi yang meliputi hasil uji laboratorium dan lapangan, kondisi asli tanah yang ada saat ini, serta dokumen gambar desain potongan melintang yang sesuai lokasi penelitian yang telah dipilih.

2. Tahap Olah Data

Analisis dilakukan menggunakan data-data yang telah diperoleh, kemudian di olah dengan menggunakan program PLAXIS V.21 untuk menentukan faktor keamanan (SF) serta besarnya penurunan akibat konsolidasi tanah.

Proses analisis ini dilakukan menggunakan landasan teori yang sesuai dan tepat.

3. Tahap Pembahasan dan Kesimpulan

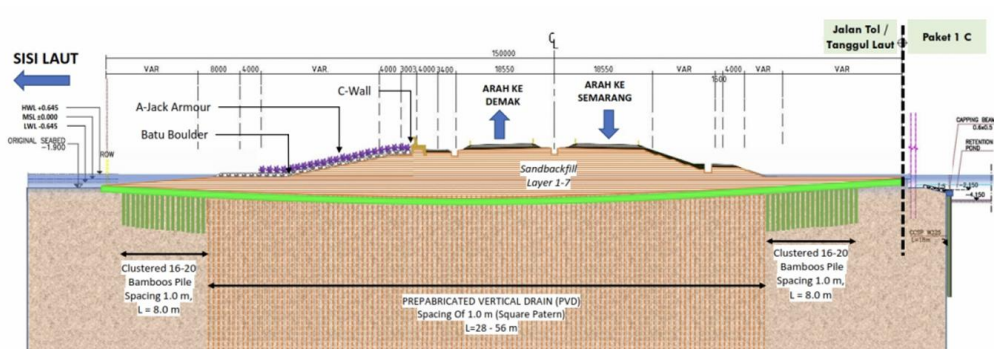
Apabila hasil analisis dengan menggunakan PLAXIS V.21 telah diperoleh, maka pembahasan hasil analisis akan dilakukan. Hasil analisis dituang dalam pembahasan secara logis dan rinci sesuai dengan *output* yang tersedia. Selanjutnya, dari hasil analisis dapat ditarik kesimpulan dan diberikan rekomendasi yang didasarkan pada teori-teori yang relevan dan masuk akal.

4.5 Analisis Data

Dalam pelaksanaan analisis data, digunakan data sekunder yang diperoleh dari pihak pelaksana. Proses analisis data bertujuan untuk membantu menemukan solusi atas permasalahan yang ada, dengan mengacu pada data yang telah dikumpulkan sebelumnya. Data tersebut selanjutnya diolah dan dianalisis menggunakan perangkat lunak yang sesuai dan mengikuti tahapan yang sistematis.

4.5.1 Data Original Desain (DED)

Gambar untuk desain original sesuai DED pada Jalan Tol Semarang – Demak tercantum pada Gambar 4.2 di bawah ini.



Gambar 4.2 Geometri Potongan Melintang Original Desain (DED)

(Sumber : Balai Besar Pembangunan Jalan Nasional Jateng – DIY, 2023)

4.5.3 Data Parameter Tanah

Berdasarkan Laporan Hasil Penyelidikan Tanah untuk Proyek Pembangunan Jalan Tol Semarang – Demak yang dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, diperoleh sejumlah parameter tanah yang disajikan pada Tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1 Parameter Tanah

Nama	Satuan	Tanah Timbunan	Very Soft Clay (A)	Very Soft Clay (B)	Stiff to Very Stiff Clay	Very Stiff to Hard Clay
Kedalaman	m	0-4	4-20	20-30	30-52	52-60
Model	-	<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Mohr-Coulomb</i>
Jenis	-	<i>Drained</i>	<i>Undrained (A)</i>	<i>Undrained (A)</i>	<i>Undrained (A)</i>	<i>Undrained (A)</i>
Berat Volume Jenuh (γ_{sat})	kN/m ³	17.00	15.69	16.09	16.44	16.75
Berat Volume Tak Jenuh (γ_{unsat})	kN/m ³	15.00	12.63	13.25	14.29	14.40
Modulus Young (E)	kN/m ²	8000.00	2000.00	5000.00	13000.00	20000.00
<i>Poisson Ratio</i> (ν)	-	0.30	0.45	0.40	0.30	0.28
Indeks Permeabilitas (K_x, K_y)	m/hari	7.13	1.24E-05	1.24E-05	4.75E-03	4.75E-03
Kohesi (cu)	kN/m ²	1.00	14.11	12.82	15.00	25.00
Angka Pori (e)	-	0.50	2.00	2.50	1.11	1.18

(Sumber : Balai Besar Pembangunan Jalan Nasional Jateng – DIY, 2023)

4.5.4 Data Parameter Geotekstil

Jenis geotekstil yang diterapkan dalam penelitian ini merupakan geotekstil *woven*. Parameter dari material tersebut diperoleh mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan edisi Tahun 2018. Detail nilai parameter geotekstil tersebut tertuang pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Data Parameter Geotekstil

Parameter	Simbol	Nilai		Satuan
		Original Design	Hasil Trial Embankment	
Kuat Tarik Maksimum	Ta	1000	400	kN/m
			600	

(Sumber : Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Jateng - DIY, 2022)

4.5.5 Data Parameter Bambu

Penelitian ini menggunakan jenis bambu yang lazim ditemukan di Indonesia. Meski demikian, terdapat beberapa ketentuan teknis mengenai bambu yang dapat diaplikasikan pada proyek Jalan Tol Semarang – Demak. Informasi lengkap terkait parameter bambu tersebut disajikan pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Data Parameter Bambu

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Jenis Material	Tipe	Elastoplastik, Isotropik	-
Tahan Terhadap Pukulan	-	Ya	-
Kekakuan Normal	EA_1 & EA_2	4×10^5	kN/m
Kekakuan Lentur	EI	7×10^4	kNm
Berat	W	0,30	kN
Rasio Poisson	N	0,200	-

Lanjutan Tabel 4.3 Data Parameter Bambu

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Momen Lentur Maksimum	M_p	500	kNm
Kekuatan Maksimum	$N_{p,1}$ $N_{p,2}$	400	kN/m

(Sumber : Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Jateng – DIY, 2022)

4.5.6 Data Beban Lalu Lintas

Pada Proyek Jalan Tol Semarang – Demak, besarnya beban lalu lintas mengacu pada ketentuan dalam SNI 8460:2017. Berdasarkan standar tersebut, jalan tol dikategorikan sebagai jalan kelas I dengan beban lalu lintas sebesar 15 kN/m². Rincian beban tersebut disajikan sesuai dengan Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4 Beban Lalu Lintas untuk Analisa Stabilitas

Kelas Jalan	Beban Lalu Lintas (kPa)	Beban di Luar Jalan (kPa)
I	15	10
II	12	10
III	12	10

(Sumber : SNI 8460:2017)

4.5.7 Data *Preabricated Vertical Drain* (PVD)

Berdasarkan data *Original Design* oleh Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Jateng – DIY, data PVD yang digunakan memiliki panjang 28-56 meter.

4.6 Analisis Data Menggunakan *PLAXIS*

Analisis data dalam penelitian ini menggunakan aplikasi *PLAXIS V.21* melalui 3 tahapan utama, yakni mencakup *Plaxis Input*, *Plaxis Calculation*, dan *Plaxis Output*. Penjelasan lebih rinci mengenai masing-masing tahapan disampaikan pada uraian berikut.

4.6.1 *Plaxis Input*

1. Klik sebanyak dua kali pada menu *Plaxis Input* untuk membuka perangkat lunak *PLAXIS*. Setelah kotak dialog muncul, pilih *Start a New Project* untuk memulai desain baru.
2. Setelah *Project Properties* muncul, pilih *model*, kemudian ubah *model type* menjadi *plane strain* dan pilih *elements* dasar berupa *15-Noded*. Hal ini berguna untuk mendapatkan angka tegangan-regangan serta pembebanan yang lebih jelas dan akurat.
3. Untuk pengaturan satuan (*units*), gunakan *m* untuk satuan *length*, *kN* untuk satuan *Force*, dan *day* untuk satuan *time*. Dalam menu *contour*, diperlukan input koordinat minimum dan maksimum dari geometri desain penelitian. Untuk nilai *Xmin*, *Xmax*, *Ymin*, *Ymax* berturut-turut adalah 0,0; 150,0; 0,0; 14,3.
4. Pemodelan geometri dilakukan sebagai berikut.
 - a. Gunakan fitur *Geometry Line* untuk membentuk garis berdasarkan grid yang tersedia. Proses penggambaran dimulai dari titik koordinat (0,0) dan dilanjutkan mengikuti koordinat yang telah ditentukan sebelumnya.
 - b. Atur kondisi batas (*boundary condition*) dengan memilih *standard fixities* pada *toolbar* yang tersedia.
 - c. Tambahkan beban merata dengan memilih menu *Distributed load-load system A*. Setelah itu, klik kanan pada objek yang dituju dan masukkan nilai beban sesuai kebutuhan.
5. Input nilai parameter tanah dengan *toolbar* berupa *material sets*. Langkah-langkah detailnya adalah sebagai berikut.
 - a. Pilih *material set*, klik *new* untuk membuat parameter tanah baru, kemudian akan muncul tiga kotak dialog, yakni *general*, *parameters*, dan *interface*.
 - b. Isikan nilai parameter tanah sesuai dengan data parameter tanah yang diperoleh dari data sekunder.
 - c. Input jenis model material dan jenis material sesuai dengan data parameter tanah yang diperoleh.

- d. Masukkan seluruh nilai pada kotak dialog *general properties* dan masukkan semua data parameter tanah pada menu *parameters*. Kemudian OK untuk menyimpan jenis tanah.
 - e. Klik dan geser data yang ada pada *material sets* ke dalam kluster tanah. Apabila warna pada bidang gambar sudah berubah, maka material tanah sudah siap.
 - f. Klik OK untuk menyelesaikan *input* data.
6. Pilih menu *generate mesh* yang tertera pada *toolbar*. Kemudian akan muncul jendela baru dengan elemen tanah yang sudah terbagi.
 7. Buka menu *initial conditions* yang berisi opsi *generate water pressure* dan *generate initial stresses*. Mode pada *initial conditions* dapat diatur menggunakan *switch*. Setelah pengaturan selesai, klik *update* untuk menampilkan visualisasi tegangan awal pada model.
 8. Klik *calculate* untuk menyelesaikan pemrograman.

4.6.2 *Plaxis Calculation*

Plaxis calculation merupakan menu *plaxis* yang berfungsi untuk menganalisis kalkulasi data yang telah dimasukkan dalam *plaxis input*. Pada tahap ini, terdapat 4 jendela utama, yakni *general*, *parameters*, *multipliers*, dan *preview*. Di dalam jendela *general* tersedia beberapa opsi analisis, seperti *consolidation analysis* untuk mengevaluasi penurunan akibat konsolidasi, *plastic analysis* untuk menganalisis perilaku tanah dan struktur di bawah beban, *dynamic analysis* untuk simulasi pengaruh beban gempa, dan *phi/c reduction* yang digunakan dalam penentuan faktor keamanan tanah.

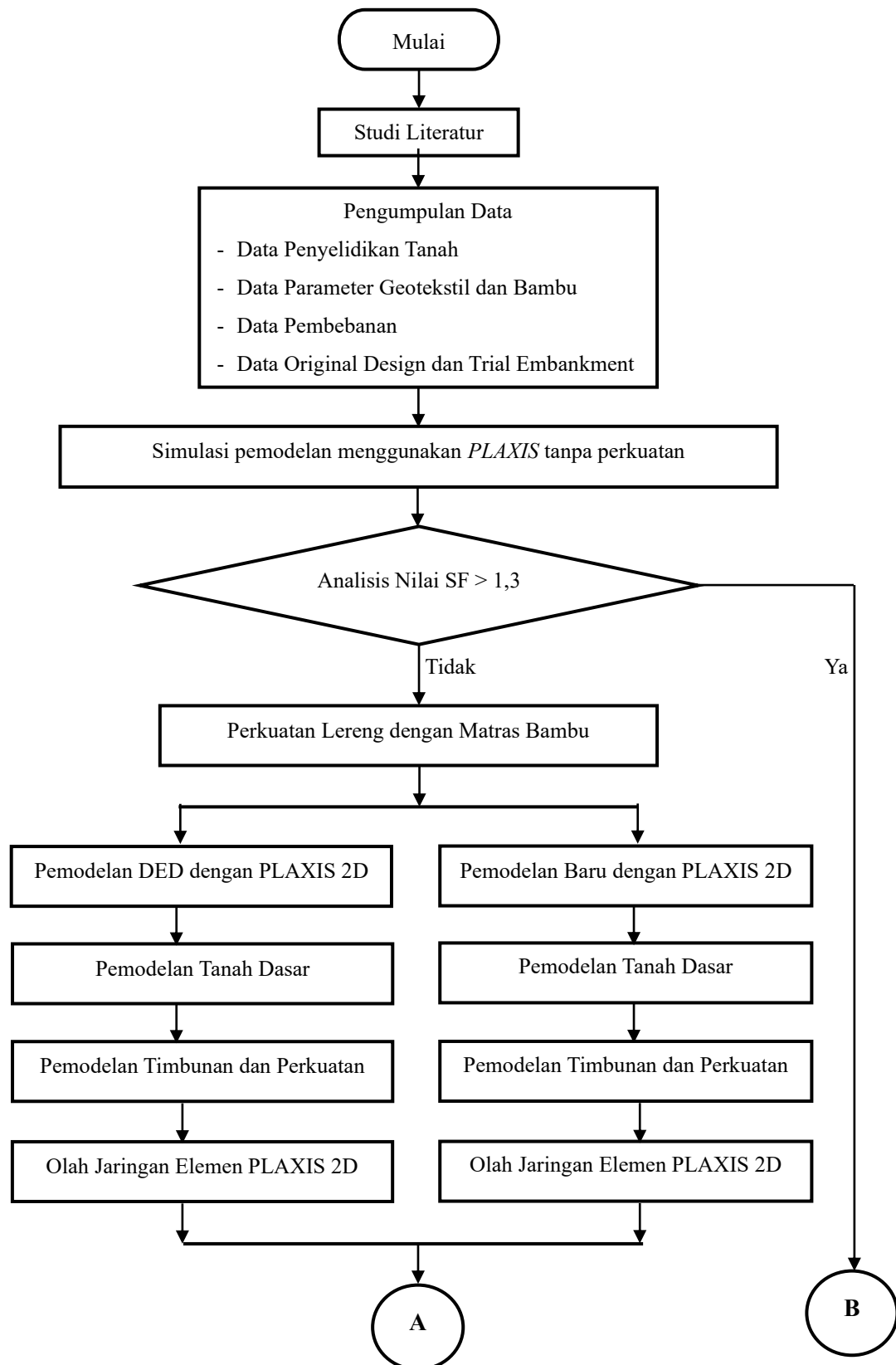
Setelah memilih opsi tipe analisis, pilih *point of curve* untuk menentukan titik tinjauan kelongsoran dan menggambarkan kondisi tanah. Kemudian klik *calculate* untuk menampilkan hasil perhitungan.

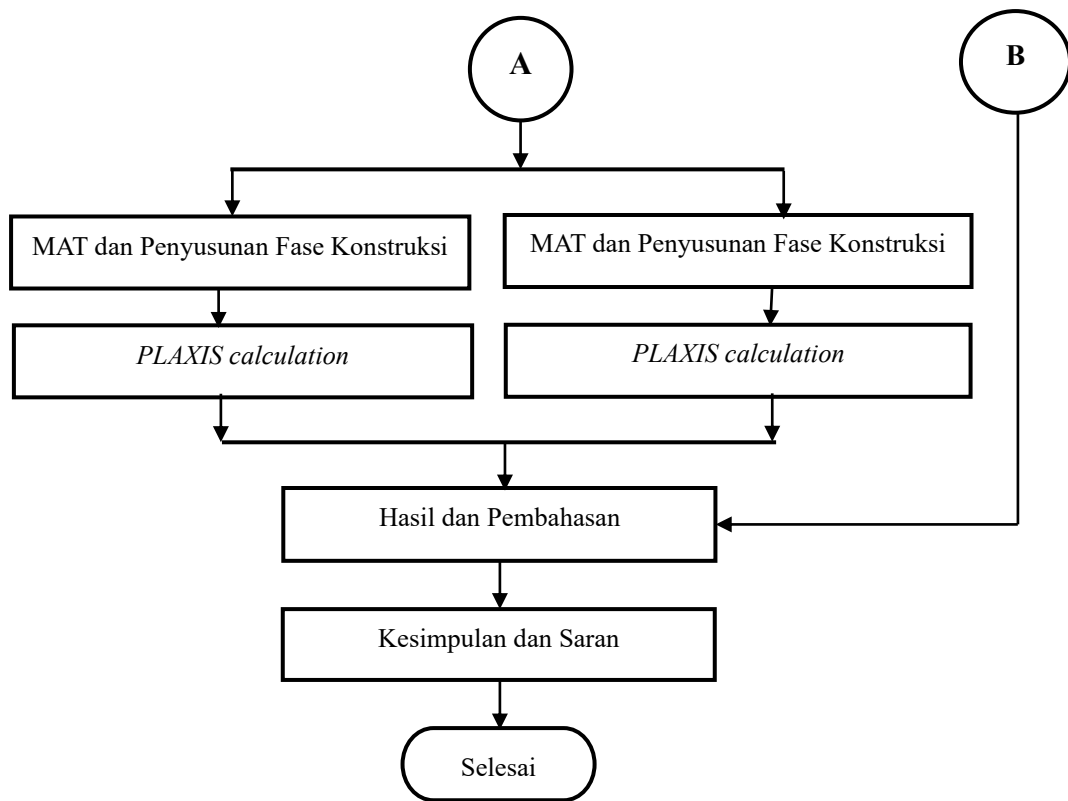
4.6.3 *Plaxis Output*

Setelah seluruh tahapan analisis terselesaikan, langkah selanjutnya adalah mengklik tombol *Output* untuk menampilkan hasil dari analisis yang telah dilakukan pada tahap sebelumnya.

4.7 Bagan Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui serangkaian tahapan analisis yang terstruktur. Tahapan tersebut dijabarkan untuk mempermudah penulis dalam melaksanakan proses penelitian, serta mempermudah pembaca dalam memahami proses penelitian. Rangkaian proses tersebut dapat dilihat secara visual pada Gambar 4.5 berikut.





Gambar 4.3 Bagan Alir Penelitian

BAB V

PEMBAHASAN

5.1 Deskripsi Umum

Pada penelitian ini, lokasi penelitian proyek Jalan Tol Semarang – Demak terletak pada sta. 1+578 – 8+314. Pada lokasi tersebut, tanah lempung sangat mendominasi, yakni dimulai dari kedalaman 0 hingga 56 meter di bawah muka air tanah. Tanah lanau pasiran merupakan tanah yang digunakan sebagai lapisan tanah timbunan dengan tinggi 14 meter yang dibagi menjadi 7 lapis. Analisis desain tanpa perkuatan dan analisis desain dengan struktur perkuatan yang berbeda dilakukan untuk mengidentifikasi hasil perkuatan yang efektif, efisien, dan memiliki nilai faktor keamanan timbunan jalan yang lebih tinggi serta mampu mengurangi penurunan tanah yang berlebih.

Analisis ini dilaksanakan dengan aplikasi PLAXIS V.21 dan dengan perhitungan manual dengan metode Fellenius. Timbunan Analisis timbunan jalan dimulai dengan menganalisis penurunan struktur tanah tanpa adanya perkuatan. Apabila hasil analisis tanpa perkuatan tidak mampu menahan stabilitas dan penurunan tanah, maka desain akan dilanjutkan dengan pemodelan menggunakan perkuatan matras bambu dan cerucuk. Tanah timbunan yang digunakan pada desain perkuatan tanah tersebut yaitu dengan timbunan tanah lanau pasiran dengan kemiringan lereng 1:2.

5.2 Kebutuhan Data Analisis

Penelitian ini dilakukan menggunakan data sekunder yang diperoleh dari proyek Jalan Tol Semarang – Demak. Data lainnya yang digunakan pada penelitian ini tertuang sebagai berikut.

1. Data Parameter Tanah

Data parameter tanah yang digunakan adalah data tanah dari Laporan Hasil Penyelidikan Tanah pada Pekerjaan Pembangunan Jalan Tol Semarang – Demak yang telah tercantum pada Tabel 4.1.

2. Beban Struktur dan Lalu Lintas

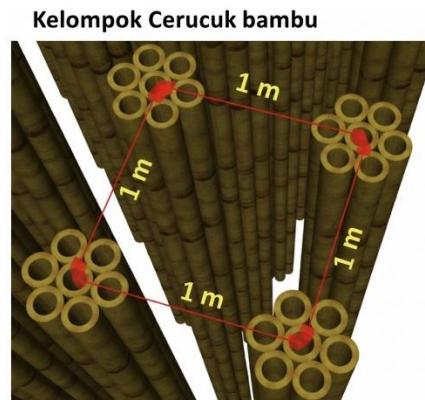
Beban struktur dan beban lalu lintas yang digunakan pada penelitian ini adalah beban merata, dengan beban lalu lintas sebesar 15 kN/m berdasarkan fungsi dan sistem jaringan jalan serta beban struktur sebesar 10 kN/m berdasarkan data sekunder. Sehingga data beban merata yang dimasukkan dalam program PLAXIS bernilai 25 kN/m.

3. Data Geotekstil

Data geotekstil yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis *geotextile woven* dengan parameter yang dapat dilihat pada Tabel 4.2.

4. Data Parameter Bambu

Data parameter bambu pada penelitian ini diperoleh dari Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Jateng – DIY yang tercantum pada Tabel 4.3. Untuk detail dari cerucuk bambu yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 5.1 berikut.

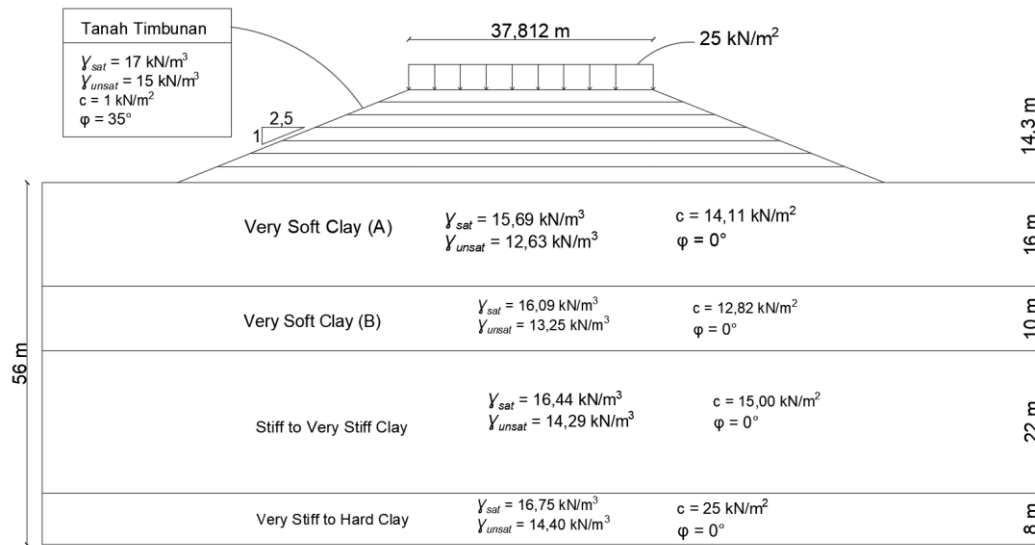


Gambar 5.1 Desain Cerucuk Bambu

(Sumber : Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Jateng – DIY, 2022)

5. Desain Geometri Jalan

Salah satu data yang dibutuhkan adalah desain geometri jalan beserta dengan parameter untuk setiap lapisan tanah. Untuk pemodelan geometri jalan yang mengacu pada data sekunder dari BBPJJN Jateng - DIY dapat dilihat pada Gambar 5.2 berikut.



Gambar 5.2 Desain Geometri Jalan

5.3 Analisis Stabilitas dan Penurunan pada Timbunan Jalan Tanpa Perkuatan

5.3.1 Analisis Menggunakan Program PLAXIS V.21

1. Pemodelan Timbunan Jalan

Pemodelan awal dilakukan dengan menggambarkan timbunan tanah 7 lapisan, dengan ketinggian tiap lapisan dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut.

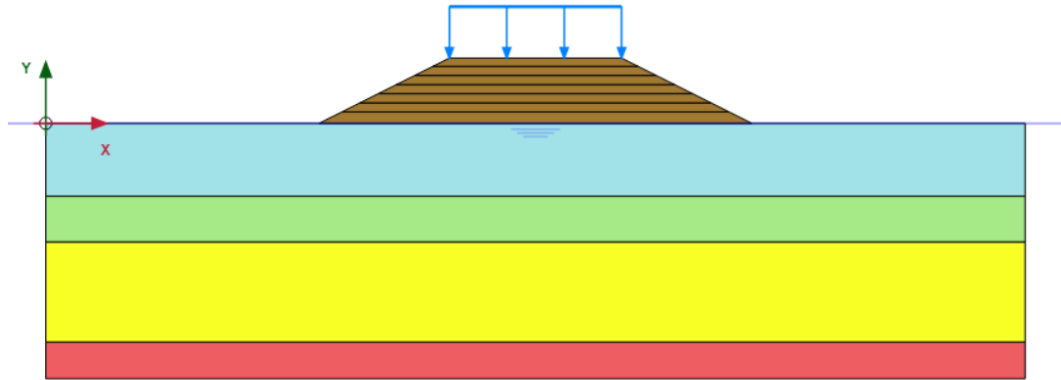
Tabel 5.1 Ketinggian Struktur Tanah Timbunan

Lapisan	Tinggi Timbunan	Waktu Konsolidasi
I	2,50 m	75 Hari
II	2,00 m	75 Hari
III	2,00 m	75 Hari
IV	2,00 m	75 Hari
V	2,00 m	75 Hari
VI	2,00 m	75 Hari
VII	1,80 m	150 Hari

(Sumber : Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Jateng – DIY)

Timbunan jalan pada proyek ini memiliki kemiringan lereng sebesar 1:2,5. Kemiringan lereng timbunan yang cukup besar ini digunakan untuk menghindari adanya kelongsoran akibat struktur tanah yang sangat lunak.

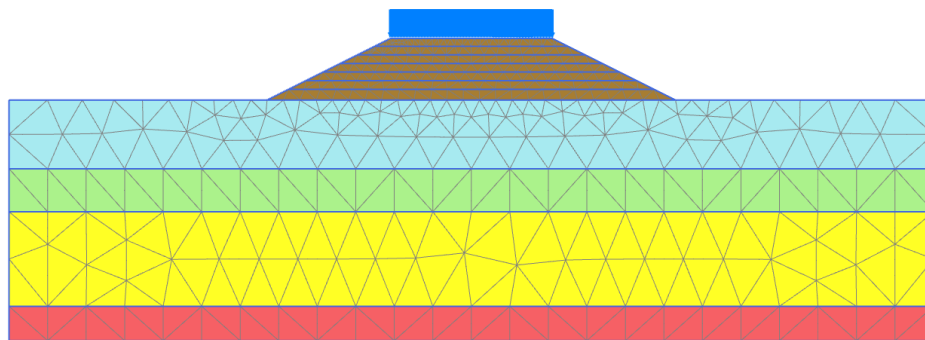
Pemodelan desain timbunan jalan tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.3 berikut.



Gambar 5.3 Desain Pemodelan Timbunan Tanpa Perkuatan

2. Jaringan Elemen (*Deformed Mesh*)

Jaringan elemen digambarkan pada struktur dengan bentuk segitiga sembarang yang diakibatkan oleh pengaruh beban. *Deformed mesh* pada timbunan tanpa perkuatan dapat dilihat pada Gambar 5.4 berikut.



Gambar 5.4 Jaringan Elemen Timbunan Jalan Tanpa Perkuatan

Setelah diperoleh hasil jaringan elemen, langkah yang dilakukan adalah menentukan muka air tanah. Pada proyek ini, muka air tanah terletak pada elevasi -3 m.

3. Calculation Phases

Apabila muka air tanah sudah ditentukan, maka penyusunan *phases* dapat dilakukan untuk proses *staged construction*. Untuk susunan *phases* yang sudah mengalami proses *calculation* dapat dilihat pada Gambar 5.5 berikut.

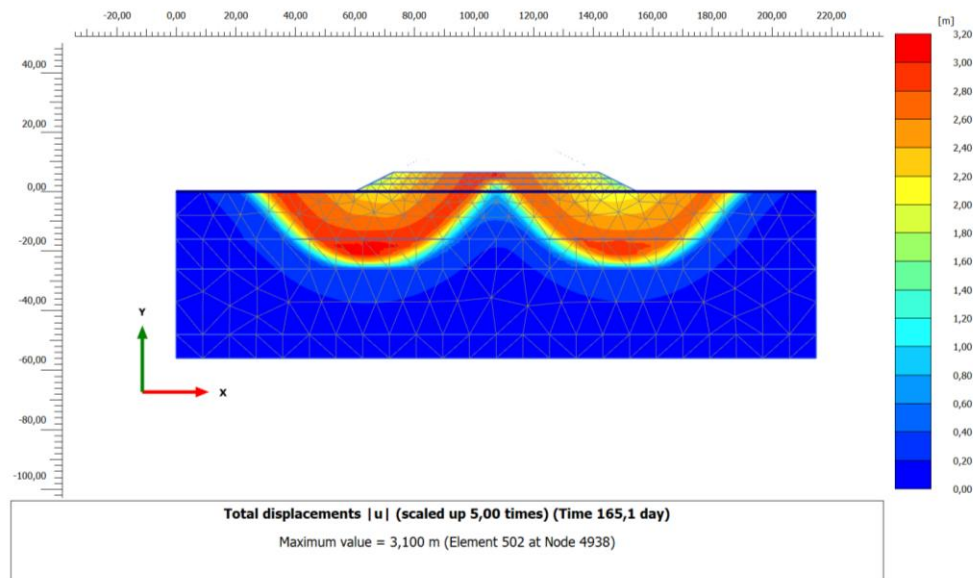
	Calculation type	Loading type (t)	Pore pressure calu.	Time interval
 Initial phase [InitialPhase]	 K0 procedure	 Staged construction	 Phreatic	0,000 day
 Timbunan Stage 1 [Phase_1]	 Plastic	 Staged construction	 Use pressures from previous phase	7,000 day
 WT 1 [Phase_2]	 Consolidation	 Staged construction	 Use pressures from previous phase	75,00 day
 Timbunan Stage 2 [Phase_3]	 Plastic	 Staged construction	 Phreatic	7,000 day
 WT 2 [Phase_4]	 Consolidation	 Staged construction	 Use pressures from previous phase	75,00 day
 Timbunan Stage 3 [Phase_5]	 Plastic	 Staged construction	 Phreatic	7,000 day
 WT 3 [Phase_6]	 Consolidation	 Staged construction	 Use pressures from previous phase	75,00 day
 Timbunan Stage 4 [Phase_7]	 Plastic	 Staged construction	 Phreatic	7,000 day
 WT 4 [Phase_8]	 Consolidation	 Staged construction	 Use pressures from previous phase	75,00 day
 Timbunan Stage 5 [Phase_9]	 Plastic	 Staged construction	 Phreatic	2,000 day
 WT 5 [Phase_10]	 Consolidation	 Staged construction	 Use pressures from previous phase	75,00 day
 Timbunan Stage 6 [Phase_11]	 Plastic	 Staged construction	 Phreatic	2,000 day
 WT 6 [Phase_12]	 Consolidation	 Staged construction	 Use pressures from previous phase	75,00 day
 Timbunan Stage 7 [Phase_13]	 Plastic	 Staged construction	 Phreatic	2,000 day
 WT 7 [Phase_14]	 Consolidation	 Minimum excess pore pressure	 Use pressures from previous phase	0,000 day
 Beban 15 KPa [Phase_15]	 Consolidation	 Staged construction	 Phreatic	2,000 day
 SF [Phase_16]	 Safety	 Incremental multipliers	 Use pressures from previous phase	0,000 day

Gambar 5.5 Tabel Susunan *Phases* Timbunan Tanpa Perkuatan

Berdasarkan hasil perhitungan pada program Plaxis V.21, dapat dilihat bahwa untuk timbunan jalan tanpa perkuatan hanya mampu dilakukan hingga timbunan 2, dan terjadi *collapse* (keruntuhan) pada tanah timbunan 3.

4. Total Displacement

Pada penelitian stabilitas dan penurunan timbunan jalan tanpa perkuatan, perhitungan hanya mampu dilakukan hingga timbunan 3. Hal ini dikarenakan tanah asli yang berupa lempung tidak cukup kuat untuk diberi timbunan dengan ketinggian yang cukup besar. Hasil *total displacement* penelitian timbunan tanpa perkuatan dapat dilihat pada Gambar berikut.



Gambar 5.6 Bentuk *Total Displacement* Timbunan Tanpa Perkuatan

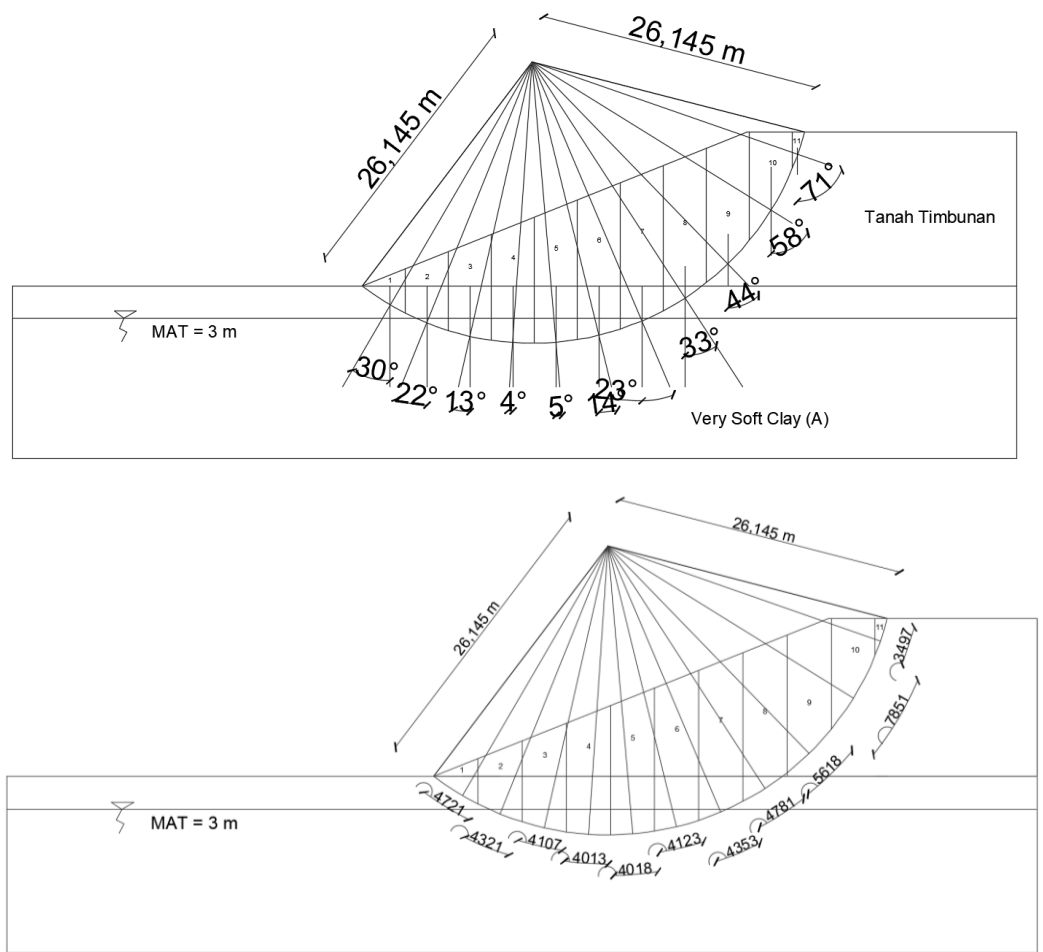
Reached values	
Reached total time	165,1 day
CSP - Relative stiffness	0,01373E-3
ForceX - Reached total force	0,000 kN/m
ForceY - Reached total force	0,000 kN/m
Pmax - Reached max pp	72,59 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase p	0,1543
ΣM_{weight} - Reached weight	1,000
ΣM_{sf} - Reached safety fact	1,000

Gambar 5.7 Hasil Kalkulasi Faktor Keamanan Timbunan Tanpa Perkuatan

Hasil *Total Displacement* menunjukkan bahwa hasil penurunan terlihat sangat besar, sehingga mengindikasikan adanya potensi ketidakstabilan pada timbunan. Oleh karena itu, dibutuhkan perkuatan tambahan berupa matras bambu, cerucuk, maupun geotekstil agar penurunan dapat dikendalikan. Berdasarkan hasil yang diperoleh, timbunan jalan runtuh pada saat penimbunan tanah lapisan 3, dimana hal tersebut menandakan bahwa timbunan tidak aman serta membutuhkan perkuatan.

5.3.2 Perhitungan Faktor Keamanan dengan Metode Fellenius

Metode fellenius ini dilakukan dengan membagi massa tanah lereng menjadi beberapa irisan vertikal, kemudian menghitung keseimbangan momen dari masing-masing irisan terhadap titik pusat rotasi. Pada penelitian ini, lereng dibagi menjadi 11 irisan dengan jari-jari lingkaran sebesar 26,145 meter.



Gambar 5.8 Bentuk Geometri Lereng pada Irisan Metode Fellenius

Dari gambar irisan geometri lereng tersebut, dapat diketahui parameter untuk setiap tanah adalah sebagai berikut.

1. Tanah Timbunan

$$\text{Berat Volume } (\gamma_{\text{sat}}) = 17 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Koheksi (c)} = 1 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Sudut Geser Dalam } (\phi) = 35^\circ$$

2. *Very Soft Clay* (A)

$$\text{Berat Volume } (\gamma_{\text{sat}}) = 15,69 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Koheksi (c)} = 14,11 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Sudut Geser Dalam } (\phi) = 0^\circ$$

Berdasarkan Gambar 5.7, lebar untuk setiap irisan bernilai 4 meter. Di bawah ini adalah contoh untuk perhitungan irisan 1. Pada irisan 1, bentuk geometri dipecah menjadi 2 bentuk yang berbeda, yakni 1 segitiga untuk lapisan tanah timbunan, dan 1 segitiga untuk lapisan tanah *very soft clay* (A).

$$\text{Lebar (b)} = 4 \text{ meter}$$

$$\text{Tinggi (h}_1\text{)} = 1,6 \text{ meter}$$

$$\text{Tinggi (h}_2\text{)} = 2,496 \text{ meter}$$

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{2} \times a \times t \\ &= \frac{1}{2} \times 4 \times 1,6 \\ &= 3,20 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$A_2 = 4,992 \text{ m}^2$$

$$a_i = 4,721 \text{ meter}$$

$$\begin{aligned} u_i &= 4,721 \times 9,81 \\ &= 46,313 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W &= A_1 \times \gamma_{\text{sat timbunan}} + (A_2 \times \gamma_{\text{sat clay}}) \\ &= 3,20 \times 17 + (4,992 \times 15,69) \\ &= 132,724 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\theta_1 = -30^\circ$$

$$\begin{aligned} N' &= W_1 \cos \theta_1 - u_i a_i \\ &= 132,724 \cos(-30) - 46,313 \times 4,721 \\ &= -103,701 \end{aligned}$$

$$T = W_1 \sin \theta_1$$

$$\begin{aligned}
 &= 132,724 \times \sin(-30) \\
 &= -66,362 \text{ kN} \\
 c_1 a_1 &= 4,721 \times 14,11 \\
 &= 66,613 \text{ kN/m} \\
 \tan \varphi &= \tan (35^\circ) \\
 &= 0,700
 \end{aligned}$$

Rekapitulasi untuk perhitungan seluruh irisan dapat dilihat pada Tabel 5.2 berikut.

Tabel 5.2 Perhitungan Setiap Irisan Timbunan Lereng

Slices	Lebar (m)	A_1 (m ²)	A_2 (m ²)	A_3 (m ²)	W (kN)	a_i (m)	α (°)	u_i (kN/m ²)	W·sin α (kN)	N' ($W_i \cos \theta_1 - u_i a_i$)	$c_i \cdot a_i$ (kN/m)	tan ϕ'
1	4	3.200	4.992	-	132.724	4.721	-30	46.313	-66.362	-103.701	66.613	0.700
2	4	9.600	13.226	-	370.716	4.321	-22	42.389	-138.873	160.559	60.969	0.700
3	4	16.000	18.290	-	558.970	4.107	-13	40.290	-125.741	379.174	57.950	0.700
4	4	22.400	20.660	-	704.955	4.013	-4	39.368	-49.175	545.256	56.623	0.700
5	4	28.800	20.526	-	811.653	4.018	5	39.417	70.740	650.189	56.694	0.700
6	4	35.200	17.880	-	878.937	4.123	14	40.447	212.634	686.068	58.176	0.700
7	4	41.600	12.506	-	903.419	4.353	23	42.703	352.994	645.716	61.421	0.700
8	4	4.060	1.257	46.672	878.494	4.781	33	46.902	478.462	512.531	67.460	0.700
9	4	7.858	7.500	2.510	303.752	5.618	44	55.113	211.004	-91.122	79.270	0.700
10	4	29.423	-	-	500.196	7.851	58	77.018	424.190	-339.607	110.778	0.700
11	1.098	3.642	-	-	61.915	3.497	71	34.306	58.542	-99.809	49.343	0.700
Total									1428,415	2945,253	725,296	

Untuk perhitungan nilai Faktor Keamanan (SF) dapat dilihat sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 SF &= \frac{\sum_{i=1}^{11} c a_i + (W_i \cos \theta_1 - u_i a_i) \tan \varphi}{\sum_{i=1}^{11} W_i \sin \theta_i} \\
 &= \frac{725,296 + (2945,253) \cdot 0,70}{1428,415} \\
 SF &= 0,457 < 1,3 \text{ (TIDAK AMAN)}
 \end{aligned}$$

Rendahnya nilai Faktor Keamanan (SF) mengindikasikan bahwa tanah timbunan belum aman dari keruntuhan. Hal tersebut sesuai dengan analisis dengan program PLAXIS V.21 dimana tanah timbunan jalan tersebut membutuhkan perkuatan untuk meningkatkan nilai stabilitas dan menurunkan angka penurunan tanah.

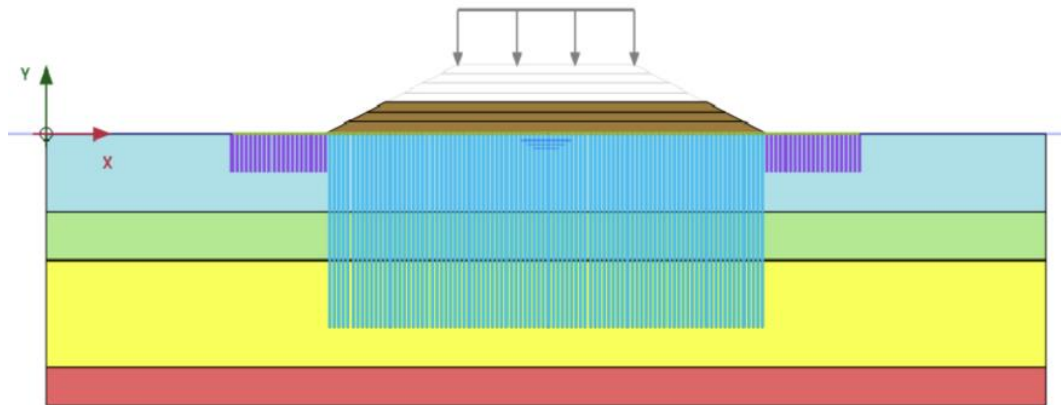
5.4 Analisis Timbunan Jalan dengan Perkuatan Matras Bambu dan Cerucuk

5.4.1 Analisis Timbunan Jalan Sesuai Original Desain (DED) dengan Program PLAXIS V.21

1. Pemodelan Timbunan Jalan

Pemodelan awal dilakukan dengan menggambarkan timbunan tanah 7 lapisan, dengan ketinggian tiap lapisan sama dengan desain timbunan tanpa perkuatan. Selain dengan ketinggian yang sama, waktu tunggu untuk konsolidasi tiap lapisan juga memiliki nilai yang sama. Nilai ketinggian dan waktu tunggu konsolidasi setiap lapisan tanah timbunan dapat dilihat pada Tabel 5.1.

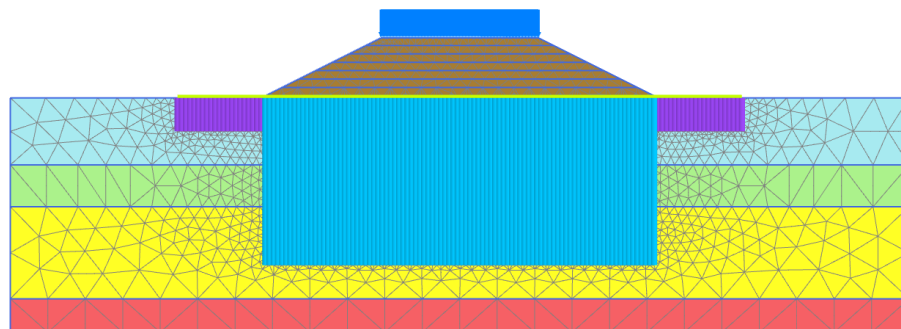
Di bawah ini adalah hasil dari pemodelan sesuai dengan original desain (DED) dengan ketinggian sebesar 14,3 meter menggunakan perkuatan matras bambu, cerucuk, dan geotekstil.



Gambar 5.9 Desain Pemodelan Timbunan Jalan dengan Perkuatan Sesuai Original Desain (DED)

2. Jaringan Elemen (*Deformed Mesh*)

Jaringan elemen (*Deformed mesh*) pada timbunan jalan dengan perkuatan matras bambu, cerucuk, dan geotekstil sesuai original desain (DED) dapat dilihat pada Gambar 5.10 berikut.



Gambar 5.10 Jaringan Elemen Timbunan Jalan dengan Perkuatan Matras Bambu, Cerucuk, dan Geotekstil

Setelah diperoleh hasil jaringan elemen, langkah yang dilakukan adalah menentukan muka air tanah. Pada proyek ini, muka air tanah terletak pada elevasi -3 m.

3. Calculation Phases

Susunan *phases* untuk desain sesuai DED yang sudah mengalami proses *calculation* dapat dilihat pada Gambar 5.11 berikut.

	Calculation type	Loading type (D)	Pore pressure ...	Time interval
Initial phase [InitialPhase]	K0 procedure	Staged construction	Phreatic	0,000 day
Timbunan Stage 1 [Phase_1]	Plastic	Staged construction	Use pressures from previous phase	7,000 day
WT 1 [Phase_2]	Consolidation	Staged construction	Use pressures from previous phase	75,00 day
Timbunan Stage 2 [Phase_3]	Plastic	Staged construction	Phreatic	7,000 day
WT 2 [Phase_4]	Consolidation	Staged construction	Use pressures from previous phase	75,00 day
Timbunan Stage 3 [Phase_5]	Plastic	Staged construction	Phreatic	7,000 day
WT 3 [Phase_6]	Consolidation	Staged construction	Use pressures from previous phase	75,00 day
Timbunan Stage 4 [Phase_7]	Plastic	Staged construction	Phreatic	7,000 day
WT 4 [Phase_8]	Consolidation	Staged construction	Use pressures from previous phase	75,00 day
Timbunan Stage 5 [Phase_9]	Plastic	Staged construction	Phreatic	2,000 day
WT 5 [Phase_10]	Consolidation	Staged construction	Use pressures from previous phase	75,00 day
Timbunan Stage 6 [Phase_11]	Plastic	Staged construction	Phreatic	2,000 day
WT 6 [Phase_12]	Consolidation	Staged construction	Use pressures from previous phase	75,00 day
Timbunan Stage 7 [Phase_13]	Plastic	Staged construction	Phreatic	2,000 day
WT 7 [Phase_14]	Consolidation	Minimum excess pore pressure	Use pressures from previous phase	0,000 day
Beban 15 KPa [Phase_15]	Consolidation	Staged construction	Phreatic	2,000 day
SF [Phase_16]	Safety	Incremental multipliers	Use pressures from previous phase	0,000 day

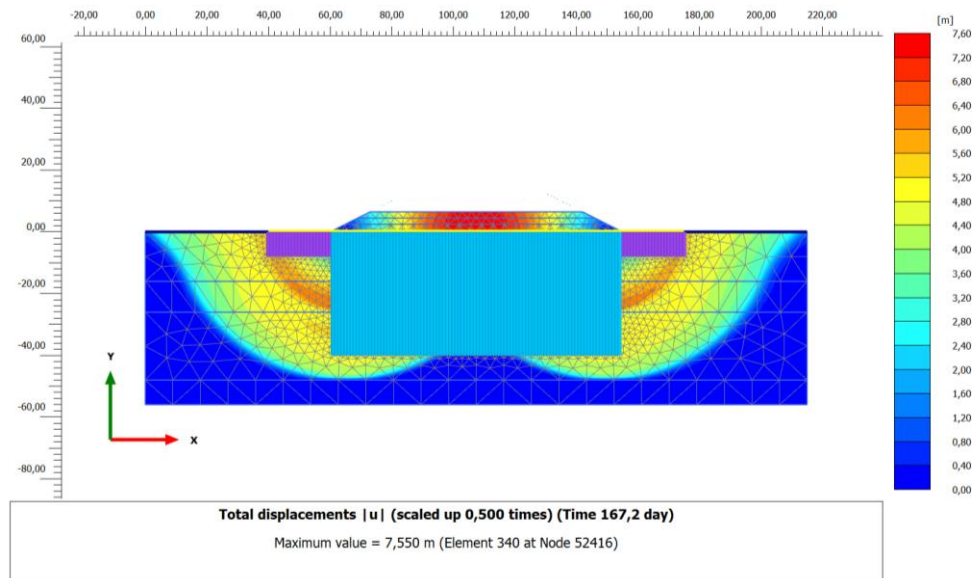
Gambar 5.11 Tabel Susunan *Phases* Timbunan dengan Perkuatan sesuai Original Desain (DED)

Berdasarkan hasil perhitungan pada program Plaxis V.21, dapat dilihat bahwa untuk timbunan jalan dengan perkuatan berupa matras bambu, cerucuk, geotekstil, dan pelengkap PVD hanya mampu dilakukan hingga timbunan 2, dan terjadi *collapse* (keruntuhan) pada tanah timbunan 3.

4. Total Displacement

Pada penelitian stabilitas dan penurunan timbunan jalan dengan perkuatan sesuai dengan Original Desain (DED), perhitungan hanya mampu dilakukan hingga timbunan 3. Hal ini dikarenakan perkuatan yang telah di desain belum mampu menahan tanah timbunan yang cenderung tinggi dan memiliki parameter tanah yang lebih tinggi dibandingkan dengan keseluruhan lapisan tanah dasar. Hasil *total displacement* dan kurva faktor keamanan penelitian

timbunan tanpa perkuatan dapat dilihat pada Gambar 5.12 dan Gambar 5.13 berikut.



Gambar 5.12 Bentuk *Total Displacement* Timbunan dengan Perkuatan sesuai Original Desain (DED)

Reached values	
Reached total time	167,2 day
CSP - Relative stiffness	0,04310E-3
ForceX - Reached total force	0,000 kN/m
ForceY - Reached total force	0,000 kN/m
Pmax - Reached max pp	424,9 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase p	0,4614
ΣM_{weight} - Reached weight	1,000
ΣM_{sf} - Reached safety fact	1,000

Gambar 5.13 Hasil Kalkulasi Faktor Keamanan Timbunan dengan Perkuatan sesuai Original Desain (DED)

Hasil *Total Displacement* menunjukkan bahwa hasil penurunan terlihat sangat besar dengan keruntuhan pada saat penimbunan lapisan 3. Keruntuhan pada saat penimbunan tanah tersebut menandakan bahwa lapisan tanah dasar yang ada di bawahnya masih belum mampu menahan beban yang disebabkan oleh

timbunan tersebut. Dua lengkungan ke bawah pada gambar hasil analisis tersebut menggambarkan bahwa tanah dasar mengalami penurunan sekaligus pergerakan lateral ke arah samping akibat tekanan yang terlalu besar dari timbunan. Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan tanah lunak yang berperan sebagai tanah dasar tidak mampu menahan beban besar, sehingga sebagian massa tanah terdorong keluar ke arah horizontal. Sementara itu, lengkungan pada tanah timbunan menandakan terjadinya penurunan utama di area dengan beban terbesar. Lengkungan-lengkungan ini menjelaskan bahwa tanah mengalami deformasi vertikal dan lateral secara bersamaan, yang merupakan respons alami terhadap konsolidasi dan redistribusi tegangan di bawah timbunan. Oleh karena itu, dibutuhkan perkuatan yang lebih kuat untuk dapat meningkatkan stabilitas hingga pada lapisan timbunan ke-7 dan menurunkan angka penurunan tanah.

5.4.2 Perhitungan Daya Dukung Cerucuk secara Manual

Perhitungan daya dukung cerucuk dilakukan untuk mengetahui kemampuan cerucuk dalam menahan beban timbunan yang berada di atasnya. Analisis ini memiliki tujuan untuk memastikan kapasitas dukung cerucuk mampu menahan beban kerja tanpa mengalami keruntuhan geser maupun penurunan berlebih. Spesifikasi cerucuk yang digunakan berdasarkan penelitian oleh BBPJJN Jateng – DIY dan berdasarkan penelitian oleh Chakraborty dkk. (2023).

Panjang (L)	= 8 m
Diameter (d)	= 0,1 m
Jarak antar cerucuk (s)	= 1 m
Berat Volume (γ_{bp})	= 2,5 kN/m ³
Modulus Elastisitas (E)	= 12.000.000 kN/m
Kuat tarik bambu	= 218750 kN/m

Cerucuk yang digunakan tergolong cukup pendek dengan jangkauan hanya mencapai kategori tanah *Very Soft Clay* (A). Untuk perhitungan analisis daya dukung cerucuk dapat dilihat sebagai berikut.

a. Daya Dukung Cerucuk

Pada perhitungan daya dukung cerucuk, persamaan yang digunakan adalah Persamaan 3.35, 3.34, 3.33, 3.32 yang dapat dilihat sebagai berikut.

$$\begin{aligned} PI &= 102,3 \times \left(\frac{Cc}{1+e} \right) + 13,34 \\ &= 102,3 \times \left(\frac{0,432}{1+2} \right) + 13,34 \\ &= 28,080\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{Cu}{P_o'} &= 0,11 + 0,0037 \times 28,080 \\ &= 0,214 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{bp} &= \left(\frac{0,5 \times 8}{0,1} \right)^{-0,2} (0,214)^{-0,3} \\ &= 0,759 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{bp} &= 0,759 \times \left(\frac{127,4}{1} \right) \times 14,11 \\ &= 1365,284 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

b. Daya Dukung Tanah Dasar

Dalam melakukan perhitungan daya dukung tanah dasar, nilai faktor daya dukung tanah diketahui dalam Tabel Daya Dukung Terzaghi (1943), sehingga dapat diketahui parameter sebagai berikut.

$$\varphi = 0$$

$$N_c = 5,7$$

$$N_q = 1$$

$$N_\gamma = 0$$

$$\begin{aligned} q_{ult} &= c.N_c + q.N_q + 0,5.\gamma.B.N_\gamma \\ &= (14,11 \cdot 5,7) + (229,5 \cdot 1) + (0,5 \cdot (15,69 - 10) \cdot 109,312 \cdot 0) \\ &= 309,927 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$q_{bp} = 0$$

c. Daya Dukung Gabungan

Nilai daya dukung cerucuk dan tanah dasar digunakan dalam melakukan perhitungan daya dukung gabungan. Perhitungan tersebut dapat dilihat sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 Q_{ult} &= q_{ult} + q_{bp} + q_{gb} \\
 &= 309,927 + 1171,444 + 0 \\
 &= 1509,971 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

d. Faktor Keamanan

$$\begin{aligned}
 SF &= \frac{Q_{ult}}{q} \\
 &= \frac{6105,732}{1509,971} \\
 &= 7,30 > 1,3 \text{ (AMAN)}
 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan manual menunjukkan bahwa nilai SF dari timbunan sebesar 7,30 yang menandakan kondisi tanah seharusnya berada dalam kondisi aman terhadap daya dukung. Namun, setelah di analisis menggunakan PLAXIS V.21 memperlihatkan adanya keruntuhan yang besar pada timbunan ke-3. Perbedaan ini terjadi karena asumsi perhitungan manual yang hanya memperhitungkan beban vertikal tanpa memperhitungkan deformasi lateral, tekanan air pori, dan interaksi antar perkuatan. Oleh karena itu, nilai faktor keamanan hasil perhitungan manual tidak sepenuhnya mewakili kondisi aktual di lapangan maupun hasil pemodelan melalui pemodelan numerik dengan program PLAXIS V.21.

5.5 Alternatif Desain Baru untuk Timbunan Jalan dengan Perkuatan Matras Bambu, Geotekstil, dan Cerucuk

Ketidakstabilan tanah dalam menahan beban timbunan jalan memberikan tantangan lebih besar dalam melakukan desain ulang untuk menstabilkan timbunan. Alternatif desain baru jalan perlu dilakukan pengembangan sebagai upaya dalam mengurangi penurunan berlebih. Pada alternatif desain ini, perkuatan yang digunakan sangat kompleks, seperti matras bambu, cerucuk, geotekstil, dan drainase vertikal berupa PVD (*Prefabricated Vertical Drain*). Matras bambu berperan sebagai penyebar beban di bawah timbunan, geotekstil sebagai separator dan perkuatan tarik dalam menahan deformasi lateral, dan cerucuk untuk meningkatkan daya dukung tanah lempung.

Desain baru yang dihasilkan tidak mengubah jenis perkuatan yang digunakan, namun hanya dengan mengubah jumlah cerucuk, dan lapisan bambu hingga kestabilan dapat dicapai.

5.5.1 Parameter Tanah Uji

Pada proses desain perkuatan baru, terdapat perubahan parameter tanah, yakni perubahan dari analisis Undrained tipe A menjadi Undrained tipe B. Analisis ini dilakukan dengan menggunakan parameter kohesi tak terdrainase. Perubahan ini menyebabkan program PLAXIS tidak lagi menghitung air pori karena dianggap sudah termasuk dalam kekuatan total.

Perubahan parameter tanah yang digunakan untuk analisis hanya mengalami perubahan pada kohesi tak terdrainase (*Undrained Shear Strength*). Nilai kohesi tak terdrainase (S_u) didapat dari hasil pengujian *Standard Penetration Test* (SPT) melalui pendekatan empiris. Sehingga nilai S_u yang diperoleh untuk setiap lapisan tanah adalah sebagai berikut.

1. Very Soft Clay (A)

$$\begin{aligned} S_u &= k \times NSPT \\ &= 6 \times 8 \\ &= 48 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

2. Very Soft Clay (B)

$$\begin{aligned} S_u &= k \times NSPT \\ &= 6 \times 16,67 \\ &= 100 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

3. Stiff to Very Stiff Clay

$$\begin{aligned} S_u &= k \times NSPT \\ &= 6 \times 21,67 \\ &= 130 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

4. Very Stiff to Hard Clay

$$\begin{aligned} S_u &= k \times NSPT \\ &= 6 \times 23,33 \\ &= 100 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Seluruh rekapitulasi parameter yang digunakan dalam analisis desain baru dapat dilihat pada Tabel 5.3 berikut.

Tabel 5.3 Parameter Tanah Analisis Desain Terbaru

Nama	Satuan	Tanah Timbunan	Very Soft Clay (A)	Very Soft Clay (B)	Stiff to Very Stiff Clay	Very Stiff to Hard Clay
Kedalaman	m	0-4	4-20	20-30	30-52	52-60
Model	-	<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Mohr-Coulomb</i>
Jenis	-	<i>Drained</i>	<i>Undrained (B)</i>	<i>Undrained (B)</i>	<i>Undrained (B)</i>	<i>Undrained (B)</i>
Berat Volume (γ_{sat})	kN/m ³	17.00	15.69	16.09	16.44	16.75
Berat Volume Kering (γ_{unsat})	kN/m ³	15.00	12.63	13.25	14.29	14.40
Modulus Young (E)	kN/m ²	8000.00	5000.00	7000.00	100000.00	150000.00
<i>Poisson Ratio</i> (ν)	-	0.30	0.10	0.10	0.10	0.28
Indeks Permeabilitas (Kx, Ky)	m/hari	-	1.24E-05	1.24E-05	4.75E-03	4.75E-03
Kohesi tak Terdrainase (S_u)	kN/m ²	12.00	48.00	100.00	130.00	140.00
Angka Pori (e)	-	0.50	2.00	2.50	1.11	1.18

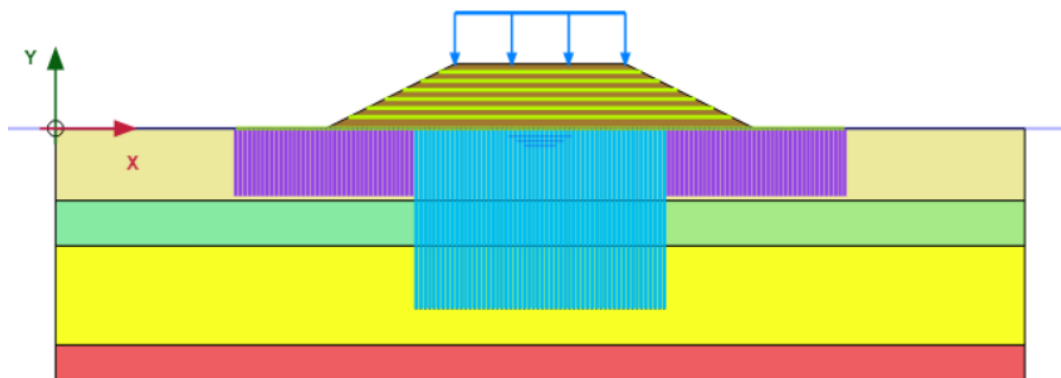
5.5.2 Analisis Desain Baru dengan Program PLAXIS V.21

Keseluruhan proses analisis untuk desain baru dengan perkuatan matras bambu, cerucuk, geotekstil, serta dengan PVD dilakukan dengan bentuk geometri yang sama dengan ketinggian timbunan yang sama. Proses analisis tersebut dapat dilihat sebagai berikut.

1. Pemodelan Timbunan Jalan

Pemodelan awal dilakukan dengan menggambarkan timbunan tanah 7 lapisan, dengan kriteria desain terdapat pada Tabel 5.1.

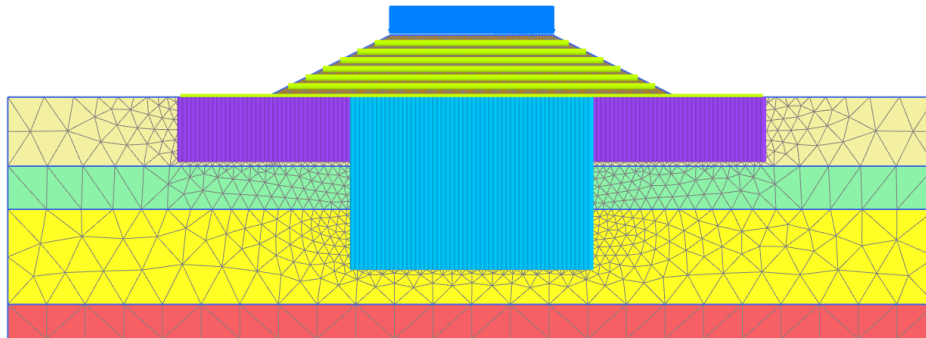
Di bawah ini adalah hasil dari pemodelan baru dengan ketinggian sebesar 14,3 meter menggunakan perkuatan matras bambu, cerucuk 15 meter, dan geotekstil.



Gambar 5.14 Desain Pemodelan Timbunan Jalan dengan Perkuatan pada Desain Baru

2. Jaringan Elemen (*Deformed Mesh*)

Jaringan elemen (*Deformed mesh*) pada timbunan jalan dengan perkuatan matras bambu, cerucuk, dan geotekstil pada desain baru dapat dilihat pada Gambar 5.15 berikut.



Gambar 5.15 Jaringan Elemen Timbunan Jalan dengan Perkuatan Matras Bambu, Cerucuk, dan Geotekstil pada Desain Baru

Setelah diperoleh hasil jaringan elemen, langkah yang dilakukan adalah menentukan muka air tanah. Pada analisis terbaru, MAT sama dengan analisis sebelumnya, yakni pada -3 meter.

3. *Calculation Phases*

Susunan *phases* untuk desain terbaru yang sudah mengalami proses *calculation* dapat dilihat pada Gambar 5.16 berikut.

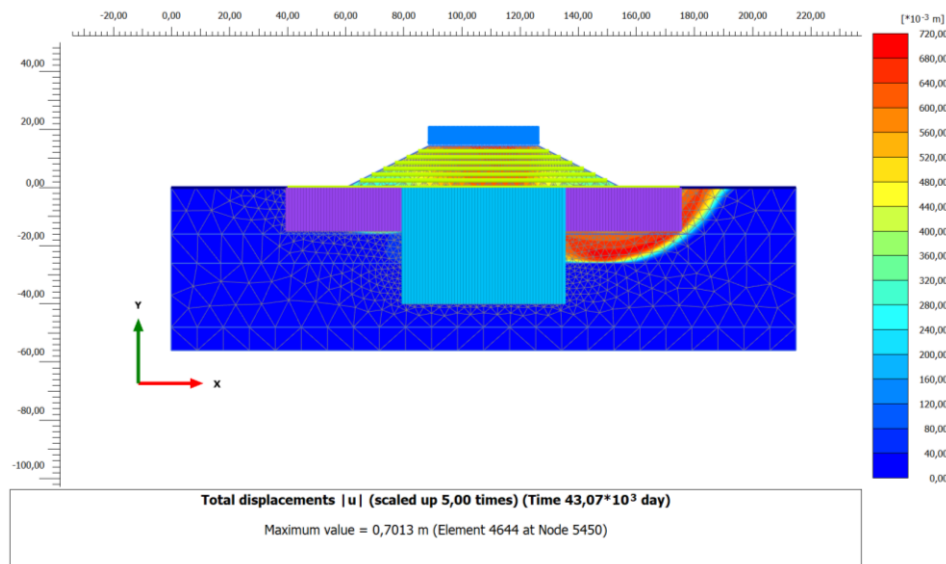
ID	Calculation type	Loading type (D)	Pore pressure ...	Time interval
Initial phase [InitialPhase]	K0 procedure	Staged construction	Phreatic	0,000 day
Timbunan Stage 1 [Phase_1]	Plastic	Staged construction	Use pressures from previous phase	7,000 day
WT 1 [Phase_2]	Consolidation	Staged construction	Use pressures from previous phase	75,00 day
Timbunan Stage 2 [Phase_3]	Plastic	Staged construction	Phreatic	7,000 day
WT 2 [Phase_4]	Consolidation	Staged construction	Use pressures from previous phase	75,00 day
Timbunan Stage 3 [Phase_5]	Plastic	Staged construction	Phreatic	7,000 day
WT 3 [Phase_6]	Consolidation	Staged construction	Use pressures from previous phase	75,00 day
Timbunan Stage 4 [Phase_7]	Plastic	Staged construction	Phreatic	7,000 day
WT 4 [Phase_8]	Consolidation	Staged construction	Use pressures from previous phase	75,00 day
Timbunan Stage 5 [Phase_9]	Plastic	Staged construction	Phreatic	2,000 day
WT 5 [Phase_10]	Consolidation	Staged construction	Use pressures from previous phase	75,00 day
Timbunan Stage 6 [Phase_11]	Plastic	Staged construction	Phreatic	2,000 day
WT 6 [Phase_12]	Consolidation	Staged construction	Use pressures from previous phase	75,00 day
Timbunan Stage 7 [Phase_13]	Plastic	Staged construction	Phreatic	2,000 day
WT 7 [Phase_14]	Consolidation	Minimum excess pore pressure	Use pressures from previous phase	0,000 day
SF [Phase_16]	Safety	Incremental multipliers	Use pressures from previous phase	0,000 day
Beban 15 KPa [Phase_15]	Consolidation	Staged construction	Phreatic	2,000 day

Gambar 5.16 Tabel Susunan *Phases* Timbunan dengan Perkuatan pada Desain Baru

Berdasarkan hasil perhitungan pada program Plaxis V.21, dapat dilihat bahwa untuk timbunan jalan dengan perkuatan berupa matras bambu, cerucuk, geotekstil, dan pelengkap PVD sudah stabil hingga pada penambahan beban lalu lintas sebesar 15 KPa.

4. *Total Displacement*

Pada penelitian stabilitas dan penurunan timbunan jalan dengan perkuatan pada desain baru, hasil *total displacement* penelitian timbunan tanpa perkuatan dapat dilihat pada Gambar 5.17, serta kurva faktor keamanan desain baru dapat dilihat pada Gambar 5.18 berikut.



Gambar 5.17 Bentuk *Total Displacement* Timbunan pada Desain Baru

Reached values		
Reached total time		43,07E3 day
CSP - Relative stiffness		0,05344E-3
ForceX - Reached total force		0,000 kN/m
ForceY - Reached total force		0,000 kN/m
Pmax - Reached max pp		447,2 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase p		0,000
ΣM_{weight} - Reached weight		1,000
ΣM_{sf} - Reached safety fact		1,864

Gambar 5.18 Hasil Kalkulasi Faktor Keamanan untuk Desain Baru dengan Perkuatan

Dari hasil simulasi numerik, diperoleh faktor keamanan global bernilai 1,864 yang menunjukkan bahwa secara kekuatan timbunan dan matras bambu berada dalam kondisi aman terhadap keruntuhan menyeluruh. Hasil *Total Displacement* menunjukkan bahwa tanah timbunan sudah stabil hingga tanah mendapatkan tambahan beban lalu lintas sebesar 25 KPa. Deformasi maksimum dari timbunan dengan perkuatan baru tersebut bernilai sebesar 0,7013 meter atau setara dengan 70,13 cm. Nilai tersebut cenderung besar jika dibandingkan dengan tinggi dan karakteristik timbunan atau penguatan di lapangan.

5.6 Perbandingan Hasil Analisis Timbunan dengan Perkuatan Desain Baru dengan Desain Original

Pemasangan cerucuk sebanyak 40 buah pada kiri dan kanan timbunan, serta dipasang pada bagian bawah matras bambu berfungsi untuk menurunkan deformasi lateral dan meningkatkan faktor keamanan timbunan secara signifikan. Pemasangan cerucuk ini cukup berpengaruh dalam meningkatkan nilai stabilitas tanah. Hasil rekapitulasi perhitungan faktor keamanan dan penurunan dapat dilihat pada Tabel 5.4 dan Tabel 5.5 berikut.

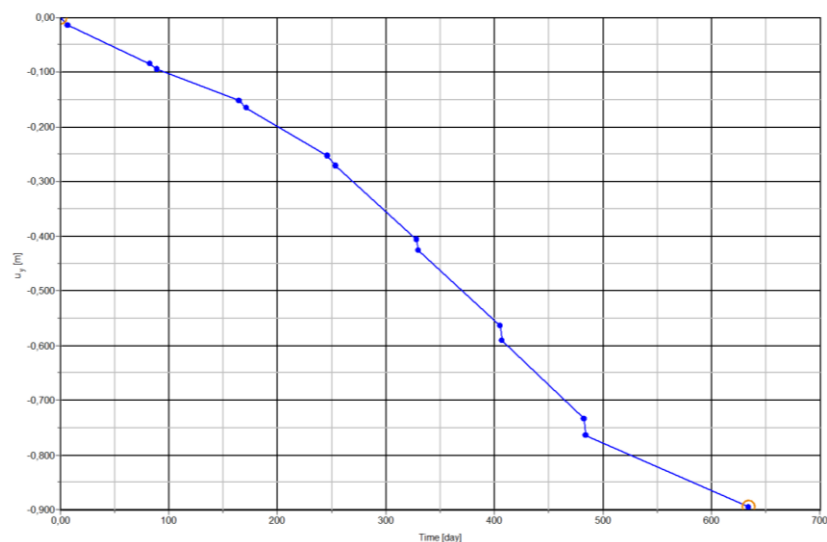
Tabel 5.4 Rekapitulasi Nilai Faktor Keamanan

Jenis Desain	Parameter		Keterangan
	Syarat Faktor Keamanan (SF)	Faktor Keamanan (SF)	
Desain Tanpa Perkuatan	1.3	Runtuh pada timbunan 3	Tidak Aman
Original Desain (DED)	1.3	Runtuh pada timbunan 3	Tidak Aman
Desain Baru	1.3	1.864	Aman

Tabel 5.5 Rekapitulasi Nilai Penurunan

Jenis Desain	Penurunan Tanah	Satuan	Keterangan
Desain Tanpa Perkuatan	3,100	m	Runtuh pada Timbunan 3
Original Desain (DED)	7,550	m	Runtuh pada Timbunan 3
Desain Baru	0,7013	m	-

Grafik penurunan dari timbunan 1 hingga timbunan ke 7 dapat dilihat pada Gambar 5.19 berikut.

**Gambar 5.19 Grafik Penurunan Timbunan Jalan**

Berdasarkan hasil analisis numerik, model yang mengacu pada desain eksisting sesuai *Dokumen Engineering Design* (DED) menunjukkan bahwa stabilitas timbunan hanya dapat dipertahankan hingga tahap timbunan ke-3. Setelah tahap tersebut, analisis menunjukkan bahwa faktor keamanan turun hingga di bawah batas aman ($SF = 1,3$), dan deformasi lateral pada kaki lereng meningkat. Hal tersebut menunjukkan bahwa desain DED belum mampu menahan peningkatan beban timbunan secara bertahap pada kondisi tanah dasar yang lunak.

Sementara itu, pada desain modifikasi yang menerapkan kombinasi perkuatan yang cukup kompleks, hasil simulasi menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan dengan nilai faktor keamanan mencapai 1,864. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Afprianto dkk (2022) yang menyimpulkan bahwa kombinasi matras bambu dan cerucuk efektif menahan penurunan pada lempung lunak, namun deformasi vertikal perlu dikendalikan melalui peningkatan waktu konsolidasi. Alfiansyah (2024) juga mendapat hasil bahwa penggunaan geotekstil dan matras bambu pada timbunan jalan tol meningkatkan faktor keamanan menjadi 1,5 yang dipastikan aman, dan hasil penelitiannya menunjukkan kecenderungan yang sama dengan hasil penelitian ini. Sementara itu, penelitian Chayati dkk. (2022) menunjukkan hasil bahwa penambahan perkuatan berlapis seperti geotekstil dan cerucuk dapat memperkecil nilai deformasi lateral dan meningkatkan nilai faktor keamanan, meskipun nilai deformasi total masih bernilai cukup besar. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kombinasi perkuatan yang diterapkan sudah efektif meningkatkan kestabilan global tanggul laut, namun penyempurnaan desain masih dibutuhkan.

Dengan demikian, secara keseluruhan hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan kombinasi perkuatan yang sangat kompleks mampu meningkatkan stabilitas timbunan jalan tol di atas tanah yang sangat lunak dengan faktor keamanan bernilai 1,864, sehingga termasuk aman terhadap kelongsoran. Meskipun demikian, penurunan 70 cm masih relatif tinggi jika dibandingkan dengan penelitian pada kasus timbunan jalan di atas tanah lunak. Kondisi ini menunjukkan bahwa tujuan peningkatan stabilitas global telah tercapai, namun aspek penurunan masih perlu dioptimalkan, misalnya dengan memperpanjang masa *preloading* untuk mengurangi penurunan akhir.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis konsolidasi pada proyek Jalan Tol Semarang – Demak, dapat diambil kesimpulan dari seluruh rumusan masalah adalah sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil simulasi tanpa perkuatan, diperoleh bahwa timbunan mengalami keruntuhan pada saat mencapai timbunan ke-3. Kondisi ini menunjukkan nilai faktor keamanan (SF) $< 1,3$, sehingga timbunan dinyatakan tidak stabil. Hal tersebut menandakan bahwa lapisan tanah dasar yang tergolong sangat lunak tidak mampu menahan beban timbunan tanpa adanya sistem perkuatan.
2. Hasil simulasi menggunakan program PLAXIS V.21 menunjukkan bahwa penurunan konsolidasi tanpa perkuatan terjadi sangat besar, hingga mencapai 3,100 meter pada lapisan tanah lunak dengan ketinggian 14,3 meter. Nilai ini menunjukkan bahwa deformasi vertikal terlalu besar untuk kondisi timbunan jalan, sehingga dibutuhkan perkuatan untuk meningkatkan stabilitas.
3. Pada analisis menggunakan Original Desain (DED) dengan kombinasi matras bambu, cerucuk, dan PVD hasil simulasi menunjukkan bahwa timbunan masih mengalami keruntuhan pada timbunan ke-3. Nilai SF belum memenuhi batas aman, yaitu $SF < 1,3$, sebagaimana disyaratkan oleh Bowles (1997) dan Das (2010) yang menyatakan bahwa nilai SF minimum untuk stabilitas lereng timbunan jalan tol harus berada di atas 1,3 agar aman terhadap keruntuhan.
4. Berdasarkan hasil simulasi, desain original (DED) menghasilkan penurunan senilai 7,550 meter. Nilai tersebut tergolong sangat besar untuk proyek jalan tol di atas tanah sangat lunak. Sehingga dibutuhkan desain yang lebih kompleks untuk mencegah penurunan tanah yang besar.
5. Hasil simulasi pada desain baru menunjukkan peningkatan signifikan terhadap kestabilan. Nilai faktor keamanan meningkat hingga 1,864 yang

berarti sudah melebihi batas aman 1,3 dan memenuhi kriteria desain geoteknik yang stabil. Peningkatan ini diperoleh melalui modifikasi perkuatan berupa penambahan jumlah cerucuk bambu sebanyak 40 buah di sisi kiri dan kanan timbunan, serta penyesuaian konfigurasi matras bambu dan geotekstil.

6. Berdasarkan analisis, desain baru menghasilkan penurunan maksimum sebesar 0,7013 meter. Nilai ini menunjukkan bahwa perkuatan yang digunakan efektif menurunkan deformasi hingga $\pm 30\%$ dibandingkan dengan desain original (DED). Penurunan di bawah 0,75 meter pada tanah sangat lunak untuk timbunan jalan masih tergolong dalam batas wajar dan dapat diterima secara teknis, terutama bila disertai dengan sistem drainase seperti *Prefabricated Vertical Drain* yang membantu mempercepat proses konsolidasi.
7. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa desain original belum memenuhi kriteria stabilitas dan penurunan yang diizinkan, sedangkan desain baru menunjukkan kinerja yang jauh lebih baik. Nilai faktor keamanan meningkat dari $< 1,3$ menjadi 1,864, dan penurunan meningkat dari 3,100 meter menjadi 7,550 meter, hingga menurun drastis menjadi 0,7013 meter. Dengan demikian, desain modifikasi lebih efektif dan sesuai kebutuhan lapangan, karena mampu mempertahankan kestabilan hingga penambahan beban timbunan 25 KPa tanpa indikasi kegagalan.

6.2 Saran

Dari keseluruhan proses analisis, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pengujian tanah perlu dilakukan tepat pada titik analisis PLAXIS agar parameter yang digunakan mewakili kondisi sebenarnya yang ada di lapangan dan hasil bisa menjadi lebih akurat.
2. Perlu dilakukan monitoring penurunan dan tekanan air pori untuk memeriksa hasil penurunan yang sebenarnya terjadi di lapangan.

3. Untuk proyek serupa, desain modifikasi dengan kombinasi matras bambu, geotekstil, PVD, dan cerucuk dapat dijadikan acuan awal, namun perlu disesuaikan dengan kondisi tanah setempat.
4. Perlu dilakukan analisis pasca-konstruksi (*back analysis*) berdasarkan data monitoring lapangan untuk memvalidasi hasil numerik PLAXIS.
5. Penggunaan parameter hasil korelasi literatur sebaiknya dikonfirmasi dengan uji laboratorium agar hasil simulasi lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Afprianto, E.S., Syafrudin, Kodoatie, R. 2022. *Efektivitas Matras dan Cerucuk Bambu untuk Peredam Penurunan Tanah Urugan Pada Area Bandara Ahmad Yani Semarang*. Jurnal Profesi Insinyur Indonesia, 1 (2), November 2022.
- Ahsan, A.D., Yanti, G., Megasari, S.W. 2021. *Analisis Penurunan Tanah Menggunakan Metode Vacuum Consolidation dengan Variasi Jarak Pemasangan PVD*. Jurnal Konstruksia Vol. 13 No. 1.
- Akbar, G.D.P.N., Setiawan, B. 2022. *Analisis Penurunan Muka Tanah Kota Jambi dengan Metode Differential Interferometry Synthetics Aperture Radar Tahun 2016-2021*. Jurnal Geosains dan Remote Sensing (JRGS) Vol. 3, No. 1, 2022.
- Alfiansyah, M.F. 2024. *Analisis Stabilitas Lereng Timbunan Jalan dengan Perkuatan Geotekstil dan Matras Bambu pada Jalan Tol Cibitung – Cilincing Sta. 3+550*. dspace.uui.ac.id. Yogyakarta.
- Amir, M., Musa, R., Mallombassi, A. 2024. *Analisis Stabilitas Lereng Menggunakan Software Geoslope pada Sungai Rongkong (Kabupaten Luwu Utara)*. Jurnal Kridatama Sains dan Teknologi Vol. 6, No. 1 2024.
- Badan Standarisasi Nasional, 2017. *SNI 8460:2017. Persyaratan Perencanaan Geoteknik*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Bowles, J.E. 1986. *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)*. Edisi Kedua, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Chakraborty, P., Srivastava, L.S., Kumar, P. 2023. *A Simple Analytical Model for Bamboo-Reinforced Slopes using Modified Bishop Method*. Frontiers in Built Environment, Vol. 9, May 2023.
- Chayati, N., Hariati, F., Alimuddin, Taqwa, F.M.L., Ilham, M. 2022. *Perencanaan Stabilitas Lereng Timbunan untuk Perbaikan Saluran Irigasi Sugih, Desa Cibedug, Kecamatan Ciawi, Kab. Bogor*. Rona Teknik Pertanian, 15 (1) April 2022.
- Das, B.M. 1988. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Edisi Pertama. Penerbit Erlangga. Jakarta.

- Efendi, A.W. 2022. *Pemodelan Penurunan Tanah di Ibu Kota Negara Nusantara Menggunakan Analisis Numerik Metode Elemen Hingga LISA V.8*. PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa Vol. 12, No. 1, Juni 2023.
- Faiz, I.N. 2022. *Analisis Stabilitas dan Penurunan Timbunan Ringan Mortar Busa Dibandingkan Dengan Menggunakan Timbunan Pilihan Pada Oprit Jembatan (Studi Kasus: Flyover Klonengan, Kabupaten Tegal, Provinsi Jawa Tengah)*. dspace.uui.ac.id. Yogyakarta.
- Faradila, A. 2023. *Studi Mekanisme Interaksi Tanah-Matras Cerucuk Bambu sebagai Perkuatan Tanah Lunak*. Buletin Profesi Insinyur 6 (1) 2023 hlm. 007-013.
- Frick, H. 2004. *Ilmu Konstruksi Bangunan Bambu : Pengantar Konstruksi Bambu*. Penerbit Kanisius. Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H.C. 2020. *Mekanika Tanah 1*. Penerbit Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H.C. 2010. *Mekanika Tanah 2*. Penerbit Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Istiqomah, L.N., Sabri, L.M., Sudarsono, B. 2020. *Analisis Penurunan Muka Tanah Kota Semarang Metode Survei GNSS Tahun 2019*. Jurnal Geodesi Undip, Vol. 9, No. 2, 2020.
- Khatib, A., Marto, A., Yusuf, M.Z.Hj. 2005. *Bearing Capacity of Soft Soil Using Bamboo-Geotextile Composite*. Jurnal Saintis Vol. 8 No. 2, Oktober 2005, pp. 61-69.
- Ramadhani, S., Minmahddun, A., Patuti, I.M., Widiastuti, M. 2024. *Analisis Stabilitas Lereng Tambang Nikel Kabupaten Morowali*. Rekonstruksi Tadulako, Civil Engineering on Research and Development Vol. 5, Issue 1, March 2024, pages 65-70.
- Rumbyarso, Y.P.A., Pribadi, G. 2023. *Analisis Stabilitas Lereng dengan Metode Bishop pada Proyek Geotechnical Investigation Jalur Transportasi Pelabuhan Batubara Marangkayu Kabupaten Kutai Kertanegara*. Jurnal Kridatama Sains dan Teknologi, Vol. 05 No. 2, 2023.

- Saha, P., & Rokonuzzaman, M. (2020). A case study on finite element simulation of the stage construction method. In *KUET*.
<https://www.researchgate.net/publication/328886980>
- Surachmat, D., Wijaya, H., Kawanda, A. 2019. *Analisis Penurunan Tanah dengan Menggunakan Geotekstil pada Timbunan*. Jurnal Mitra Teknik Sipil Vol. 2, No. 4, November 2019: hlm 197-202.
- Surbakti, R. 2021. *Analisis Penurunan Tanah dengan PLAXIS 2D dan 3D pada Proyek Reklamasi Belawan*. Jurnal Ilmiah Indonesia Vol. 6, No. 7, Juli 2021.
- Susiazti, H., Widiastuti, M., Widayati, R. 2020. *Analisis Penurunan Konsolidasi Metode Preloading dan Prefabricated Vertical Drain (PVD)*. Jurnal Teknologi Sipil, Vol. 4, No. 1 Mei 2020.
- Suyuti, Sultan, M.A., Misbah, Z.K. 2019. *Bearing Capacity of Soil Bags on Soft Ground Reinforced by Bamboo Pile*. International Journal of GEOMATE, Jan 2019, Vol. 16, Issue 53, pp. 32-39.
- Terzaghi, K., 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley, New York.
- Wesley, L.D. 2017. *Mekanika Tanah*. Edisi Baru. Penerbit Andi Yogyakarta. Yogyakarta.
- Wibowo, A. H., Hartopo, H., & Apriyanto, T. (2023). ANALISIS DATA N-SPT DI RUAS JALAN TOL SEMARANG – DEMAK SEKSI II (STA. 10+690 s/d 27+000). *Rang Teknik Journal*, 6(2), 242–250.
<https://doi.org/10.31869/rtj.v6i2.4208>
- Widodo, B., Pratikso, Rochim, A., Irsyam, M., & Widoanindyawati, V. (2019). Influence of bamboo pile clusters in the pile mattress bamboo construction systems as reinforcement of soft subgrade that support embankment load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 527(1).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/527/1/012055>
- Widodo, B., & Rochim, A. (2022). *Determining The Stiffness of Bamboo Mattress in Soft Soil Improvement Analysis with Bamboo Mattress Pile Construction* (Vol. 64). <https://www.researchgate.net/publication/365960045>

LAMPIRAN

LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL - FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG

BORE LOG

Pasta Pekerjaan Pembangunan Jalan Tol Semarang - Demak Paket 1A R. Yos Sudarso, Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah				Bore Hole No : BH. 1/P. 9 Page 1/2			
5 April 2023		Described by : Ir. Sili Hardiyati, MT.		Coordinate S : -6.951019			
Cocok		Checked by : Andi Retno Ari S. ST., MT.		E : 110.447868			
Sunchin		Date of photograph		Elevation Z :			
Supono		Sample store at : Semarang		Inclination			
Rotary		Ground Water Depth : -3,00 Meter		Azimuth			
				Field Test			
				SPT			
Depth (m)	N'	10	30	50			
2.00	11						
2.45							
4.00	1						
4.45							
6.00	2						
6.45							
8.00	1						
8.45							
10.00	1						
10.45							
12.00	2						
12.45							
14.00	3						
14.45							
16.00	3						
16.45							
18.00	4						
18.45							
20.00	5						
20.45							
22.00	7						
22.45							
24.00	11						
24.45							
26.00	12						
26.45							
28.00	12						
28.45							
30.00	16						
30.45							

W = N-Spt Terkoreksi

Next Page

LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL - FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG

BORE LOG

Hasil Pekerjaan Pembangunan Jalan Tol Semarang - Demak Paket 1A

Di. Yua Sudarso, Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah

Bore Hole No : BH. 1/P. 9 Page 2/2

5 April 2023

Cocokan

Survei

Supena

Rotary

73 mm

Described by : Ir. Siti Hardiyati, MT.

Checked by : Andi Retno Ari S. ST., MT.

Date of photograph

Sample store at : Semarang

Ground Water Depth : -3,00 Meter

Coordinate S : -6.951019

E : 110.447868

Elevation Z :

Inclination

Azimuth

Thickens (m)	Sample	Symbol	Layer Type	DESCRIPTION	Field Test				
					SPT				
					Depth (m)	N'	10	30	50
18.00	34.50 35.00		Lempung	Tersisipi kerikil, warna abu-abu, teguh sampai kaku	32.00 32.45 34.00 34.45 36.00 36.45 38.00 38.45 40.00 40.45 42.00 42.45 44.00 44.45 46.00 46.45 48.00 48.45 50.00 50.45 52.00 52.45 54.00 54.45 56.00 56.45 58.00 58.45 60.00 60.45	17 22 20 25 24 21 18 13 20 24 24 22 25 24 24			
2.00	49.50 50.00		Lempung	Warna coklat, kaku					
2.00	50.00		Lempung Lanauan	Warna abu-abu coklatan, kaku					
6.00	54.50 55.00		Lempung	Tersisipi kerikil, warna abu-abu, kaku sampai sangat kaku					
2.00	59.50 60.00		Lempung Lanauan	Warna abu-abu putihan, kaku					
End Off Boring									

* N-Spt Terkoreksi



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL - FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG



FIELD VANE SHEAR TEST

Object : Pada Pekerjaan Pembangunan Jalan Tol Semarang - Demak Paket 1A
Location : Jl. Yos Sudarso, Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah
Date : 6 s/d 7 April 2023
Point : BH. 1 / P. 9
Test By : Sugeng K & Anggiet Wyka

Elevation :
Coordinate X : -6.9510296
Y : 110.4479448

Depth (m)	Torque Meter Reading			Torque Moment (Nmm)			C_u (kPa)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
5	44.00			4.73			3.71		
10	114.00			18.61			14.58		
15	108.00			17.42			13.65		
20	108.00			17.42			13.65		
25	102.00			16.23			12.72		
30	98.00			15.43			12.10		
35									
40									
45									
50									
55									
60									

Documentation





LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL - FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG

SOIL TEST

PROYEK : Pada Pekerjaan Pembangunan Jalan
Tol Semarang - Demak Paket 1A
LOKASI : Jl. Yos Sudarso, Terboyo Kulon, Kec.
Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah
SAMPEL : BH. 1
LABORAN : Solikhin Hari Raharja

No.	Boring / Sample	Sample Code	Depth (m)	Water Content (w) %	Specific Gravity Of Solid (Gs)	Unit Weight γ gr/cm ³	Dry Unit Weight γ_s gr/cm ³	Porosity (n) %	Void Ratio (e)
1	BH. 1	1	04.50 - 05.00	60.55	2.6115	1.6067	1.0007	61.68	1.6096
2		2	09.50 - 10.00	69.19	2.6006	1.5843	0.9364	63.99	1.7771
3		3	14.50 - 15.00	64.65	2.6013	1.5984	0.9708	62.68	1.6796



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL - FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG

SOIL TEST

PROYEK : Pada Pekerjaan Pembangunan Jalan
Tol Semarang - Demak Paket 1A
LOKASI : Jl. Yos Sudarso, Terboyo Kulon, Kec.
Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah
SAMPLER : BH. 1
LABORAN : Solikhin Hari Raharja

No.	Boring / Sample	Sample Code	Depth (m)	Water Content (w) %	Specific Gravity Of Solid (Gs)	Unit Weight γ gr/cm ³	Dry Unit Weight γ_s gr/cm ³	Porosity (n) %	Void Ratio (e)
4	BH. 1	4	19,50 - 20,00	61.67	2.6054	1.6081	0.9947	61.82	1.6194
5		5	24,50 - 25,00	59.25	2.6194	1.6215	1.0182	61.13	1.5726
6		6	29,50 - 30,00	50.42	2.6462	1.6590	1.1029	58.32	1.3994



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL - FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG

SOIL TEST

PROYEK : Pada Pekerjaan Pembangunan Jalan
Tol Semarang - Demak Paket 1A
LOKASI : Jl. Yos Sudarso, Terboyo Kulon, Kec.
Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah
SAMPEL : BH. 1
LABORAN : Solikhin Hari Raharja

No.	Boring / Sample	Sample Code	Depth (m)	Water Content (w) %	Specific Gravity Of Solid (Gs)	Unit Weight γ gr/cm ³	Dry Unit Weight γ_d gr/cm ³	Porosity (n) %	Void Ratio (e)
7	BH. 1	7	34,50 - 35,00	36,57	2,6675	1,6802	1,2303	53,88	1,1682
8		8	39,50 - 40,00	36,35	2,6746	1,6849	1,2357	53,80	1,1645
9		9	44,50 - 45,00	38,79	2,6639	1,6659	1,2003	54,94	1,2194



LABORATORIUM MEKANIKA TANAH
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL - FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG

SOIL TEST

PROYEK : Pada Pekerjaan Pembangunan Jalan
Tol Semarang - Demak Paket 1A
LOKASI : Jl. Yos Sudarso, Terboyo Kulon, Kec.
Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah
SAMPEL : BH. 1
LABORAN : Solikhin Hari Raharja

No.	Boring / Sample	Sample Code	Depth (m)	Water Content (w) %	Specific Gravity Of Solid (Gs)	Unit Weight γ gr/cm ³	Dry Unit Weight γ_d gr/cm ³	Porosity (n) %	Void Ratio (e)
10	BH. 1	10	49,50 - 50,00	32.83	2.6710	1.6788	1.2638	52.68	1.1134
11		11	54,50 - 55,00	36.46	2.6761	1.6710	1.2245	54.24	1.1854
12		12	59,50 - 60,00	35.22	2.6710	1.6622	1.2292	53.98	1.1729