

TUGAS AKHIR

ANALISIS METODE PRELOADING PADA PERBAIKAN TANAH LUNAK MENGGUNAKAN PROGRAM NUMERIK

Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan dalam Menyelesaikan

Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil

Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung



Disusun Oleh :

Duta Dewa Suganda

NIM : 30201900071

Fajar Dwi Saputra

NIM : 30201900085

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG**

2025

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS METODE PRELOADING PADA PERBAIKAN TANAH LUNAK MENGUNAKAN PROGRAM NUMERIK



Duta Dewa Suganda
NIM : 30201900071



Fajar Dwi Saputra
NIM : 30201900085

Telah disetujui dan disahkan di Semarang, 26 November 2025

Tim Penguji

1. **Dr. Abdul Rochim, ST, MT**
NIDN: 068067601
2. **Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng.**
NIDN: 0625059102

Tanda Tangan

Ketua Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas Islam Sultan Agung



Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng.
NIDN: 0625059102

BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR

No: 02 / A.2 / SA-T / VII / 2025

Pada hari ini tanggal 26 November 2025 berdasarkan surat keputusan Dekan Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung perihal penunjukan Dosen Pembimbing Utama dan Dosen Pembimbing Pendamping:

1. Nama : Dr. Abdul Rochim, ST, MT
Jabatan Akademik : Lektor Kepala
Jabatan : Dosen Pembimbing Utama

Dengan ini menyatakan bahwa mahasiswa yang tersebut di bawah ini telah menyelesaikan bimbingan Tugas Akhir:

Duta Dewa Suganda
NIM : 30201900071

Fajar Dwi Saputra
NIM : 30201900085

Judul : Analisis Metode Preloading Pada Perbaikan Tanah Lunak Menggunakan Program Numerik

Dengan tahapan sebagai berikut :

No	Tahapan	Tanggal	Keterangan
1	Penunjukan dosen pembimbing		
2	Seminar Proposal	28/08/2025	ACC
3	Pengumpulan data		
4	Analisis data		
5	Penyusunan laporan		
6	Selesai laporan	26/11/2025	ACC

Demikian Berita Acara Bimbingan Tugas Akhir / Skripsi ini dibuat untuk diketahui dan dipergunakan seperlunya oleh pihak-pihak yang berkepentingan

Dosen Pembimbing Utama

Dr. Abdul Rochim, ST, MT

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

Muhammad Rusli Ahyar, ST., M.Eng.

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Kami yang bertanda tangan di bawah ini:

1. NAMA : Duta Dewa Suganda
NIM : 30201900071
2. NAMA : Fajar Dwi Saputra
NIM : 30201900085

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang berjudul:

**ANALISIS METODE PRELOADING PADA PERBAIKAN TANAH LUNAK
MENGUNAKAN PROGRAM NUMERIK**

Benar bebas dari plagiat, dan apabila pernyataan ini terbukti tidak benar maka kami bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini kami buat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Semarang, 26/11/2025

Yang membuat pernyataan, 1

Yang membuat pernyataan, 2

Duta Dewa Suganda
NIM : 30201900071

Fajar Dwi Saputra
NIM : 30201900085



PERNYATAAN KEASLIAN

Kami yang bertanda tangan di bawah ini:

1. NAMA : Duta Dewa Suganda
NIM : 30201900071
2. NAMA : Fajar Dwi Saputra
NIM : 30201900085

**JUDUL TUGAS AKHIR: ANALISIS METODE PRELOADING PADA
PERBAIKAN TANAH LUNAK MENGGUNAKAN PROGRAM NUMERIK**

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tugas Akhir ini merupakan hasil penelitian, pemikiran dan pemaparan asli kami sendiri. Kami tidak mencantumkan tanpa pengakuan yang telah dipublikasikan sebelumnya atau ditulis oleh orang lain, atau sebagai bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijazah pada Universitas Islam Sultan Agung Semarang atau perguruan tinggi lainnya.

Apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka kami bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Demikian pernyataan ini kami buat.

Semarang, 26/11/2025

Yang membuat pernyataan, 1

Yang membuat pernyataan, 2

Duta Dewa Suganda
NIM : 30201900071

Fajar Dwi Saputra
NIM : 30201900085



MOTTO

“Kamu adalah umat yang terbaik yang dilahirkan untuk manusia, menyuruh kepada yang makruf, dan mencegah dari yang munkar, dan beriman kepada Allah. Sekiranya Ahli Kitab beriman, tentulah itu lebih baik bagi mereka, di antara mereka ada yang beriman, dan kebanyakan mereka adalah orang-orang fasik.”

(Q.S Ali ‘Imron: 110)

“Wahai orang-orang yang beriman, jadikanlah sabar dan shalat sebagai penolongmu, sesungguhnya Allah beserta orang-orang yang sabar.”

(Q.S Al Baqarah: 153)

“Sesungguhnya Allah tidak merubah keadaan sesuatu kaum sehingga mereka merubah keadaan yang ada pada diri mereka sendiri.”

(Q.S Ar Rad: 11)

“Sesungguhnya hanya orang-orang yang bersabarlah Yang dicukupkan pahala mereka tanpa batas.”

(Q.S Az-Zumar: 10)

“Janganlah kamu berduka cita, sesungguhnya Allah beserta kita”

(Q.S At-Taubah: 40)

PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, Segala puji bagi Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya, kami memuji-Nya dan meminta pertolongan, pengampunan serta petunjuk kepada-Nya. Saya persembahkan Laporan Tugas Akhir ini kepada:

1. Kedua orang tua saya yang saya cintai, dan bangga Bapak Suwondo dan Ibu Suliyem, yang senantiasa memberikan doa, dukungan, kasih sayang, serta motivasi baik secara moril maupun materil.
2. Kedua kakak saya, Ady Yudha Pratama dan Danu Dewantara yang memberikan dukungan serta semangat agar dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. Abdul Rochim, ST, MT, selaku dosen pembimbing yang tidak pernah lelah memberikan ilmunya serta memberikan arahan semangat dan dorongan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Dosen dan Staff Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang telah memberikan ilmu serta arahan kepada saya.
5. Teman dekat saya, Totti Aditya Susanto, yang banyak memberi arahan serta bantuan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Para sahabat saya Penghuni Kost Dhor dan Kost Nyell yang selalu menemani dan mendengarkan keluh kesah saya.
7. Terakhir, untuk diri saya sendiri, Duta Dewa Suganda terimakasih sudah berjuang sejauh ini mampu mengendalikan diri dari tekanan diluar keadaan dalam proses menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.

Duta Dewa Suganda
30201900071

PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, Segala puji bagi Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya, kami memuji-Nya dan meminta pertolongan, pengampunan serta petunjuk kepada-Nya. Saya persembahkan Laporan Tugas Akhir ini kepada:

1. Kedua orang tua tercinta atas doa yang tiada henti, cinta dan kasih sayang yang tulus, serta pengorbanan yang tidak pernah dapat tergantikan.
2. Kakak dan adik saya yang selalu memberikan dukungan dan semangat.
3. Dosen pembimbing dan seluruh dosen di fakultas teknik yang telah memberikan ilmu, bimbingan, dan arahan selama masa studi.
4. Sahabat sahabat fakultas teknik sipil yang telah menemani dalam perjuangan, kerja keras dan suka duka selama kuliah hingga penyusunan skripsi ini.
5. Patner skripsi saya Duta Dewa Suganda yang menemani berjuang skripsi dari awal sampai saat ini.
6. Tim sepak bola Manchester united dan Persija yang selalu menjadi sumber inspirasi dan motivasi.
7. Tak lupa berterimakasih pada diri sendiri yang tidak menyerah dan terus berjuang sampai saat ini.

Fajar Dwi Saputra
30201900085

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT, karena hanya dengan rahmat dan karunia-Nya laporan Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik tentang “ANALISIS METODE PRELOADING PADA PERBAIKAN TANAH LUNAK MENGGUNAKAN PROGRAM NUMERIK”, guna memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Program Sarjana Teknik Sipil di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Pada Kesempatan ini, penulis hendak menyampaikan ucapan terimakasih yang sebesar- besarnya kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyusunan tugas akhir ini, yaitu:

1. Bapak Dr. Abdul Rochim, ST, MT selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang serta sebagai Dosen Pembimbing Tugas Akhir, yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk memberikan bimbingan pada kami agar bias menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
2. Bapak M. Rusli Ahyar, ST., MT.Eng selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang telah memberikan ilmunya kepada penulis.
4. Semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini tidak dapat kami sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih banyak kekurangan baik isi maupun susunannya, semoga tugas akhir ini bermanfaat tidak hanya bagi penulis juga bagi para pembacanya.

Semarang, 26 November 2025

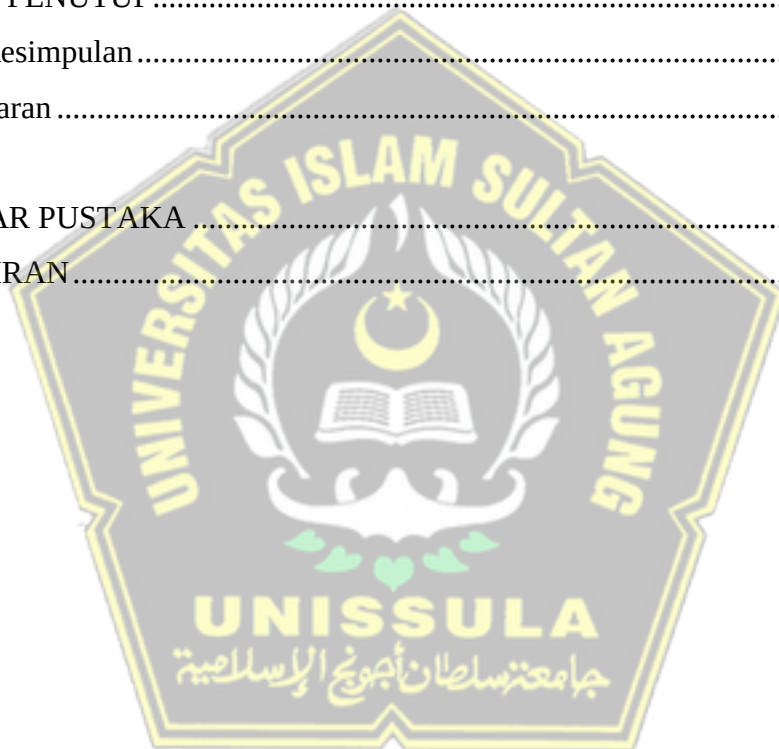
Penulis

DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	iv
PERNYATAAN KEASLIAN.....	v
MOTTO.....	vi
PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
ABSTRAK	xvi
ABSTRACT.....	xvii
 BAB I PENDAHULUAN.....	 1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	2
1.5 Batasan Masalah.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
 BAB II KAJIAN TEORI.....	 5
2.1 Tanah	5
2.2 Klasifikasi Tanah.....	7
2.3 Pengujian Lapangan dan Laboratorium.....	8
2.4 Tanah Lunak	11
2.4.1 Karakteristik Tanah Lunak	12
2.4.2 Tipe Tanah Lunak.....	13
2.5 Permasalahan Tanah Lunak.....	14

2.6	Metode Perbaikan Tanah lunak	16
2.7	Parameter Tanah	16
2.7.1	Klasifikasi Tanah dari Data Sondir.....	16
2.7.2	Klasifikasi Tanah Berdasarkan SPT (<i>Standart Penetration Test</i>)	18
2.7.3	Permeabilitas (<i>Permeability</i>)	19
2.7.4	<i>Modulus Young</i> dan <i>Pisson Ratio</i> (v)	20
2.7.5	Sudut Geser Dalam Tanah.....	20
2.7.6	Kohesi	21
2.8	Penurunan (<i>Settlement</i>).....	22
2.8.1	Penurunan Konsolidasi (<i>Consolidation Settlement – Sc</i>)	23
2.8.2	Penurunan Segera (<i>Immediate Settlement – Si</i>)	24
2.8.3	Penurunan Sekunder (<i>Secondary Settlement – Ss</i>)	24
2.9	Dasar Konsolidasi.....	25
2.9.1	Uji Konsolidasi Satu Dimensi	26
2.9.2	Derajat Konsolidasi Arah Vertikal	28
2.9.3	Koefisien Konsolidasi Vertikal	30
2.9.4	Lempung yang Terkonsolidasi Secara Normal (<i>Normally Consolidated</i>) dan Terlalu Terkonsolidasi (<i>Over Consolidated</i>)	30
2.9.5	Analisis Perhitungan Penurunan yang Disebabkan oleh Konsolidasi Primer Satu Dimensi.....	31
2.9.6	Indeks Pemampatan (<i>Compression Index, Cc</i>).....	34
2.10	Pembebanan Awal (<i>Preloading</i>).....	35
2.11	Analisis Menggunakan Program Numerik	40
BAB III METODE PENELITIAN.....		41
3.1	Pendahuluan.....	41
3.2	Studi Literatur	41
3.3	Pengumpulan Data.....	41
3.4	Pengolahan Data	42
3.5	Permodelan Tanah dengan Program Numerik.....	42
3.6	Kesimpulan dan Saran	42
3.7	Alur Penelitian.....	42

BAB IV HASIL PEMBAHASAN	44
4.1 Pendahuluan.....	44
4.2 Analisis Tinggi Kritis Timbunan vs N-SPT	44
4.2.1 Gamma Saturated	44
4.2.2 H Kritis Timbunan.....	45
4.2.3 Grafik H Kritis Timbunan vs N-SPT	48
4.3 Analisis Program Numerik	48
4.4 Hasil Analisis Program Numerik.....	50
 BAB V PENUTUP.....	 52
5.1 Kesimpulan.....	52
5.2 Saran	53
 DAFTAR PUSTAKA	 xviii
LAMPIRAN.....	xix



DAFTAR TABEL

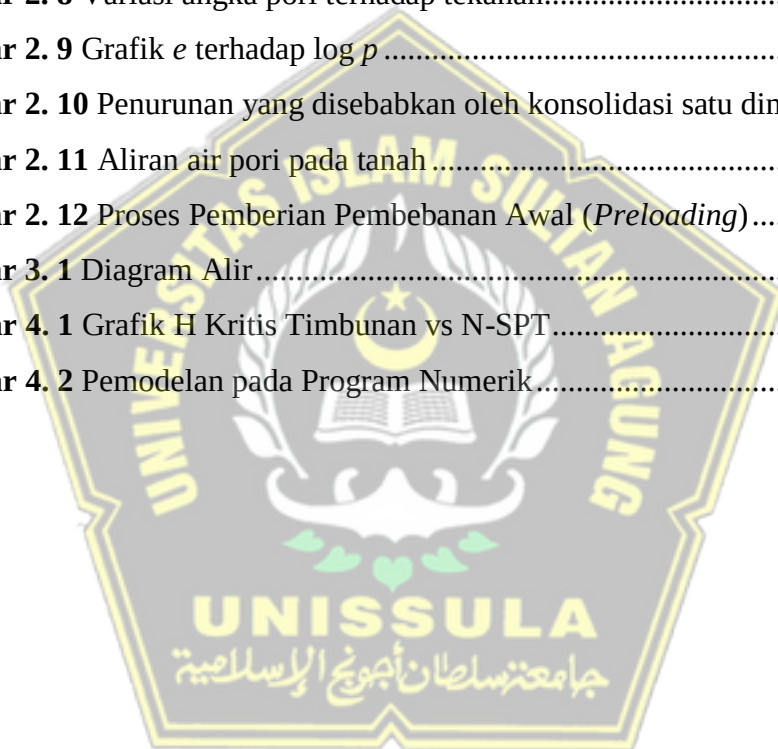
Tabel 2. 1 Klasifikasi butiran berdasarkan ukuran butiran disajikan menurut sistem Unified, ASTM, MIT, Nomenclature, dan International Nomenclature	6
Tabel 2. 2 Ukuran Batasan Golongan Tanah.....	8
Tabel 2. 3 Berat Jenis (G_s) berbagai jenis tanah	12
Tabel 2. 4 Tekstur tanah melalui klasifikasi tanah	13
Tabel 2. 5 Hubungan antara konsistensi dan kuat tekan bebas (q_u).....	13
Tabel 2. 6 kadar serat melalui klasifikasi tanah gambut	14
Tabel 2. 7 Data Sondir melalui Klasifikasi Tanah	17
Tabel 2. 8 Hubungan kepadatan, berat jenis tanah kering, N-SPT, q_c , ϕ	18
Tabel 2. 9 Hubungan antar berat jenis tanah jenuh dan nilai N-SPT (γ_{sat}).....	19
Tabel 2. 10 Hubungan antar Nilai Tipikal dan	19
Tabel 2. 11 Permeabilitas (k) dalam satuan (m/s)	20
Tabel 2. 12 Hubungan Modulus Elastisitas (E_s) dan Nilai <i>Pisson Ratio</i>	20
Tabel 2. 13 Jenis tanah menjadi acuan untuk hubungan dengan sudut geser dalam.....	21
Tabel 2. 14 Hubungan Sudut Geser Dalam, Tingkat Plastisitas, Jenis Tanah.....	21
Tabel 2. 15 Hubungan N-SPT, Kohesi,	22
Tabel 2. 16 Variasi faktor waktu terhadap derajat konsolidasi	29
Tabel 2. 17 Penentuan nilai indeks kompresi (C_c) dilakukan berdasarkan korelasi empiris	35
Tabel 4. 1 Nilai N-SPT dan Gamma Saturated Berdasarkan Klasifikasi Konsistensi Tanah	44
Tabel 4. 2 Perhitungan H Kritis Timbunan Lapis Satu	45
Tabel 4. 3 Nilai Delta Tegangan Vertikal ($\Delta\sigma_1$ & $\Delta\sigma_2$)	46
Tabel 4. 4 Kenaikan Kuat Geser Undreined (C_1)	46
Tabel 4. 5 Perhitungan Tinggi Kritis Timbunan Lapis Kedua	47
Tabel 4. 6 Kenaikan Kuat Geser Undreined (C_2)	47
Tabel 4. 7 Perhitungan Tinggi Kritis Timbunan Lapis Ketiga	47
Tabel 4. 8 Settlement γ_{timb} 16.....	50

Tabel 4. 9 Settlement γtimb 17.....	50
Tabel 4. 10 Settlement γtimb 18.....	50
Tabel 4. 11 Settlement γtimb 19.....	51
Tabel 4. 12 Settlement γtimb 20.....	51



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Ilustrasi Tes Boring.....	9
Gambar 2. 2 Ilustrasi Uji Konsolidasi	11
Gambar 2. 3 Tekanan Conus dan Perlawanan Geser ditampilkan dalam grafik ..	17
Gambar 2. 4 Tahap penurunan tanah.....	25
Gambar 2. 5 Konsolidometer.....	27
Gambar 2. 6 Grafik Waktu – Pemampatan konsolidasi untuk penimbunan	27
Gambar 2. 7 Grafik variasi derajat konsolidasi terhadap faktor waktu	29
Gambar 2. 8 Variasi angka pori terhadap tekanan.....	31
Gambar 2. 9 Grafik e terhadap $\log p$	31
Gambar 2. 10 Penurunan yang disebabkan oleh konsolidasi satu dimensi	32
Gambar 2. 11 Aliran air pori pada tanah	36
Gambar 2. 12 Proses Pemberian Pembebanan Awal (<i>Preloading</i>)	39
Gambar 3. 1 Diagram Alir	43
Gambar 4. 1 Grafik H Kritis Timbunan vs N-SPT	48
Gambar 4. 2 Pemodelan pada Program Numerik	49



ANALISIS METODE PRELOADING PADA PERBAIKAN TANAH LUNAK MENGGUNAKAN PROGRAM NUMERIK

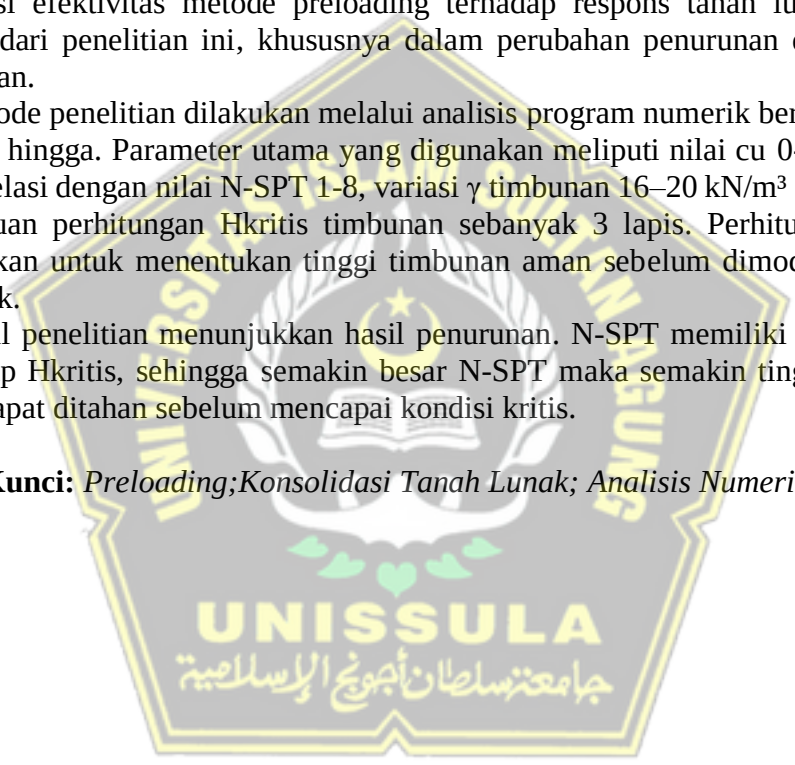
Abstrak

Tanah lunak memiliki karakteristik geoteknik yang kurang menguntungkan seperti daya dukung rendah, kompresibilitas tinggi, dan laju konsolidasi yang lambat, sehingga sering menimbulkan masalah dalam perencanaan infrastruktur. Preloading menjadi metode untuk memperbaiki karakteristik tersebut, yaitu pemberian beban awal untuk mempercepat konsolidasi sebelum konstruksi utama. Evaluasi efektivitas metode preloading terhadap respons tanah lunak menjadi tujuan dari penelitian ini, khususnya dalam perubahan penurunan dan stabilitas timbunan.

Metode penelitian dilakukan melalui analisis program numerik berbasis metode elemen hingga. Parameter utama yang digunakan meliputi nilai c_u 0-50 kPa yang berkorelasi dengan nilai N-SPT 1-8, variasi γ timbunan 16–20 kN/m³ sebagai dasar penentuan perhitungan H_{kritis} timbunan sebanyak 3 lapis. Perhitungan H_{kritis} digunakan untuk menentukan tinggi timbunan aman sebelum dimodelkan secara numerik.

Hasil penelitian menunjukkan hasil penurunan. N-SPT memiliki korelasi kuat terhadap H_{kritis} , sehingga semakin besar N-SPT maka semakin tinggi timbunan yang dapat ditahan sebelum mencapai kondisi kritis.

Kata Kunci: *Preloading; Konsolidasi Tanah Lunak; Analisis Numerik*



ANALYSIS OF THE PRELOADING METHOD FOR SOFT SOIL IMPROVEMENT USING NUMERICAL MODELING

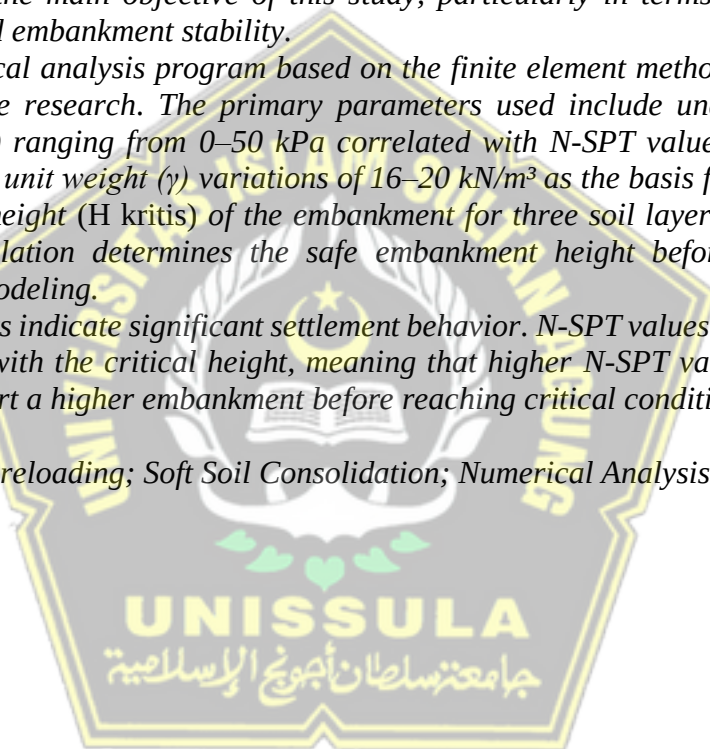
Abstract

Soft soil generally exhibits unfavorable geotechnical characteristics such as low bearing capacity, high compressibility, and slow consolidation rates, which often create challenges in infrastructure development. One method commonly used to improve these conditions is preloading, namely the application of an initial temporary load to accelerate soil consolidation before the main construction begins. The evaluation of the preloading method's effectiveness on soft soil response is the main objective of this study, particularly in terms of settlement behavior and embankment stability.

A numerical analysis program based on the finite element method was used to carry out the research. The primary parameters used include undrained shear strength (c_u) ranging from 0–50 kPa correlated with N-SPT values of 1–8, and embankment unit weight (γ) variations of 16–20 kN/m³ as the basis for calculating the critical height (H_{kritis}) of the embankment for three soil layers. The critical height calculation determines the safe embankment height before conducting numerical modeling.

The results indicate significant settlement behavior. N-SPT values show a strong correlation with the critical height, meaning that higher N-SPT values allow the soil to support a higher embankment before reaching critical conditions.

Keywords: Preloading; Soft Soil Consolidation; Numerical Analysis



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jenis tanah berkarakteristik teknis kurang menguntungkan seperti daya dukung rendah, kompresibilitas tinggi, dan permeabilitas rendah disebut tanah lunak. Kondisi ini menyebabkan struktur bangunan yang dibangun di atasnya rentan terhadap penurunan diferensial, ketidakstabilan, dan kerusakan jangka panjang (Das, 2022). Tanah lunak biasanya didominasi oleh fraksi lempung dengan kadar air tinggi dan indeks plastisitas yang signifikan, yang menyebabkan daya dukung tanah menurun secara drastis ketika mengalami pembebanan. Sebagai akibatnya, pembangunan infrastruktur di atas tanah lunak memerlukan upaya perbaikan khusus agar dapat menjamin stabilitas dan keamanan struktur (Bowles, 1984).

Salah satu metode perbaikan tanah yang umum diterapkan sebagai upaya adalah metode *preloading*. Metode ini menggunakan beban awal untuk tanah lunak sebelum pembangunan struktur utama, dengan tujuan mempercepat proses konsolidasi serta mengurangi besarnya penurunan pada masa mendatang (Holtz & Kovacs, 1981). Keberhasilan metode *preloading* sangat tergantung pada karakteristik tanah, besarnya beban awal dan durasi konsolidasi. Sehingga, diperlukan pendekatan analisis karena mampu mengevaluasi efektivitas metode ini secara komprehensif.

Dalam beberapa dekade terakhir, pemodelan numerik telah menjadi metode unggulan dalam mengevaluasi kinerja perbaikan tanah. Perangkat lunak berbasis metode elemen sangat populer di bidang geoteknik untuk mensimulasikan deformasi, konsolidasi, dan stabilitas tanah secara dua dimensi. Melalui perangkat lunak analisis numerik tersebut, pengaruh metode *preloading* terhadap penurunan tanah lunak dapat dianalisis secara komprehensif. Pendekatan numerik ini memungkinkan prediksi perubahan tegangan, regangan, serta waktu konsolidasi dilakukan dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi.

Berdasarkan permasalahan tersebut, peningkatan kondisi teknis tanah lunak melalui metode *preloading* menjadi fokus evaluasi dalam penelitian ini, melalui pendekatan simulasi numerik menggunakan perangkat lunak. Penelitian ini akan difokuskan pada analisis penurunan dan distribusi tekanan air pori dalam proses

preloading, guna mengetahui sejauh mana metode ini dapat meningkatkan karakteristik daya dukung tanah. Diharapkan menjadi acuan teknis pada perencanaan perbaikan tanah lunak, khususnya pada proyek infrastruktur bangunan yang berada di atas tanah dengan karakteristik lempung jenuh.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik tanah lunak yang menjadi objek penelitian dalam kaitannya dengan kebutuhan perbaikan tanah?
2. Berapakah tinggi kritis timbunan yang dapat ditahan oleh tanah dasar lempung dengan variasi konsistensi tanah lempung?
3. Berapa besar faktor keamanan dan besarnya penurunan yang dihasilkan setelah perlakuan *preloading* berdasarkan hasil analisis program numerik?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui karakteristik tanah lunak sebagai objek penelitian.
2. Menganalisis tinggi timbunan kritis yang dapat ditahan oleh tanah dasar lempung dengan variasi konsistensi tanah lempung.
3. Menganalisis faktor keamanan dan penurunan tanah lempung lunak setelah diberi *preloading* menggunakan metode analisis numerik.

1.4 Manfaat Penelitian

Kontribusi terhadap pengembangan ilmu geoteknik menjadi harapan utama dari penelitian ini, khususnya terkait metode perbaikan tanah lunak melalui mitigasi *preloading*. Penelitian ini memperkaya literatur mengenai efektivitas *preloading* yang dianalisis melalui pemodelan numerik berbasis metode elemen hingga dengan simulasi dua dimensi (2D). Hasil penelitian ini dapat menjadi acuan bagi perencana dan pelaksana proyek dalam memilih metode perbaikan tanah yang tepat serta efisien. Evaluasi terhadap nilai stabilitas dan penurunan tanah melalui simulasi

numerik diharapkan dapat membantu mengurangi risiko kegagalan konstruksi pada proyek yang dibangun.

1.5 Batasan Masalah

Batasan – batasan berikut ditetapkan untuk memastikan ruang lingkup penelitian lebih terfokus dan terarah, yaitu :

1. Penelitian difokuskan pada analisis karakteristik tanah lempung lunak sebagai tanah dasar.
2. Kajian dilakukan untuk menentukan tinggi timbunan kritis yang dapat ditahan oleh tanah dasar lempung dengan batasan nilai *safety factor* 1,5.
3. Metode perbaikan tanah digunakan dibatasi pada metode preloading, tanpa membahas metode lain seperti *stone column*, *vertical drain*, *deep mixing*, maupun penggunaan *geosintetik*.
4. Analisis faktor keamanan dan penurunan tanah dilakukan melalui pendekatan numerik penggunaan perangkat lunak berbasis metode elemen sampai dengan simulasi dua dimensi (2D).
5. Penelitian ini hanya membahas aspek teknis dari perilaku tanah dan efektivitas preloading, tanpa meninjau aspek non-teknis seperti biaya konstruksi maupun dampak lingkungan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab yang disusun secara sistematis sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Uraian mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan laporan tugas akhir disajikan dalam bab ini.

BAB II KAJIAN TEORI

Bab ini membahas teori-teori dan konsep dasar yang menjadi landasan dalam penelitian, mencakup karakteristik tanah, tanah

lunak, metode *preloading*, teori konsolidasi, serta pendekatan numerik dengan metode elemen hingga (FEM).

BAB III METODE PENELITIAN

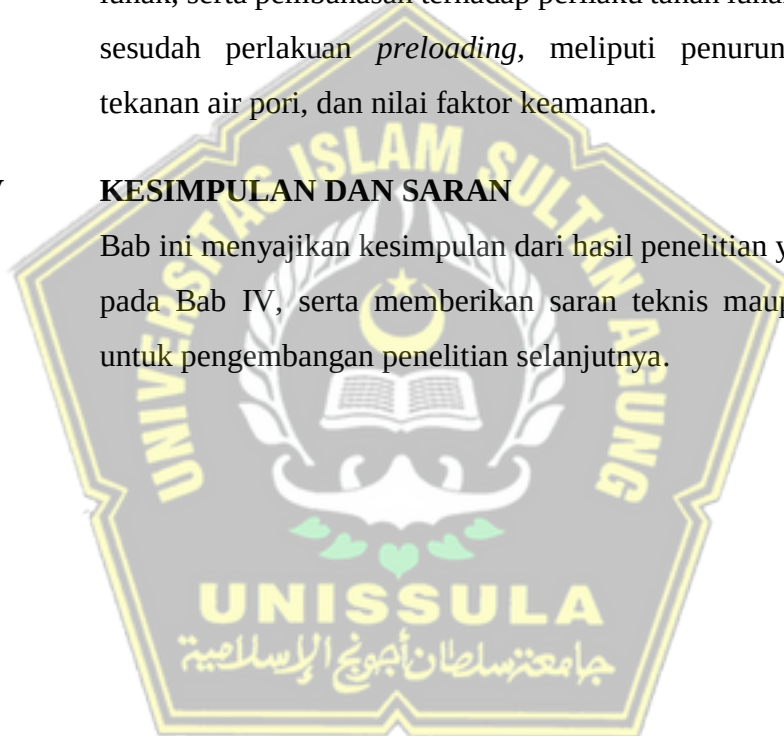
Bentuk dan lokasi penelitian, langkah-langkah pelaksanaan, teknik pengumpulan dan analisis data, dan alur dan jadwal penelitian dibahas dalam bab ini.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memuat hasil simulasi numerik menggunakan perangkat lunak, serta pembahasan terhadap perilaku tanah lunak sebelum dan sesudah perlakuan *preloading*, meliputi penurunan, distribusi tekanan air pori, dan nilai faktor keamanan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menyajikan kesimpulan dari hasil penelitian yang diperoleh pada Bab IV, serta memberikan saran teknis maupun akademik untuk pengembangan penelitian selanjutnya.



BAB II KAJIAN TEORI

2.1 Tanah

Tanah pada Teknik sipil adalah material alam terdiri atas campuran bahan organik, partikel mineral, udara serta air, yang terletak di atas batuan induk (Hardiyatmo, 2002a). Tanah berfungsi sebagai media pendukung struktur dan memainkan peran penting dalam menentukan stabilitas dan deformasi pondasi. Ketika seluruh rongga antarpartikel tanah terisi air, tanah berada pada situasi jenuh. Sebaliknya, jika hanya sebagian sisanya udara lalu rongga terisi air, tanah disebut tidak jenuh. Sedangkan bila tidak mengandung air, tanah dikondisi kering (Das, 2022).

Menurut ukuran partikelnya, dibagi dua kelompok utama: tanah berbutir halus (lempung, lanau) serta berbutir kasar (pasir, kerikil) (Bowles, 1984). Tanah berbutir halus, khususnya lempung, sifat plastisitas dan kompresibilitas yang tinggi, serta permeabilitas rendah. Karakteristik ini menjadikannya tergolong sebagai tanah lunak, yang umumnya diperlukan metode perbaikan tanah, seperti *preloading*, agar adanya peningkatan daya dukung serta mengurangi potensi penurunan jangka panjang.

Sifat khas tanah lunak lempung antara lain:

1. Memiliki kadar air tinggi, dengan tingkat kejenuhan mendekati 100%.
2. Memiliki kompresibilitas tinggi, menyebabkan penurunan konsolidasi signifikan.
3. Memiliki kuat geser rendah, sehingga tidak mampu menahan beban struktur yang besar.
4. Memiliki permeabilitas sangat rendah, sehingga proses konsolidasi berlangsung lambat tanpa adanya intervensi atau metode percepatan.
5. Berpotensi mengalami ekspansi dan penyusutan akibat perubahan kadar air.

Ukuran partikel tanah juga menjadi faktor penting dalam menentukan perilaku geoteknik. Menurut Hardiyatmo (2002a), klasifikasi ukuran butir mencakup:

1. Kerikil (*gravel*): partikel mineral berukuran $> 4,75$ mm.
2. Pasir (*sand*): berukuran antara $0,075$ mm – $4,75$ mm.
3. Lanau (*silt*): butiran halus dengan ukuran antara $0,002$ mm – $0,075$ mm.

4. Lempung (*clay*): partikel sangat halus berukuran $< 0,002$ mm, dengan kemampuan menyerap air dan membentuk struktur koloid.

Tabel 2. 1 Klasifikasi butiran berdasarkan ukuran butiran disajikan menurut sistem Unified, ASTM, MIT, Nomenclature, dan International Nomenclature

	1,7 mm	0,38	0,075								
Unified Class system	kasar	sedang	halus	Butiran halus (lanau dan lempung)							
	pasir										
	2,0 mm	0,42	0,075	0,005	0,001						
ASTM	pasir sedang		pasir halus		Lanau		Lempung		Lempung kolosoidal		
	2,0 mm	0,6	0,2	0,06	0,02	0,006	0,002	0,0006	0,0002 mm		
MIT nomenclature	kasar	sedang	halus	kasar	sedang	halus	kasar	sedang	halus		
	pasir			Lanau			Lempung				
	2,0 mm	1,0	0,5	0,2	0,1	0,05	0,02	0,006	0,002	0,0006	0,0002 mm
International nomenclature	sangat kasar	kasar	sedang	halus	kasar	halus	kasar	halus	kasar	halus	sangat halus
	pasir				Mo		Lanau		Lempung		

Selain digunakan untuk membandingkan berbagai jenis tanah, klasifikasi berdasarkan ukuran butiran ditentukan melalui grafik distribusi. Koefisien keseragaman dan gradasi dihitung dengan menggunakan nilai diameter butiran yang berkorelasi dengan persentase lolos 10%, 30%, dan 60%. Ini dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots \dots \dots (2.1)$$

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana,

C = Koefisien Keseragaman

Cc = Koefisien Gradasi

D₁₀ = Persentase butiran berdiameter 10% yang lolos ayakan ditentukan melalui grafik distribusi ukuran butiran

D₃₀ = Persentase butiran berdiameter 30% yang lolos ayakan ditentukan melalui grafik distribusi ukuran butiran

D60 = Persentase butiran berdiameter 60% yang lolos ayakan ditentukan melalui grafik distribusi ukuran butiran

Nilai C_u menunjukkan bahwa rentang distribusi partikel tanah lebih besar, serta tanah berdegradasi baik memiliki C_c antara 1 dan 3. Sementara itu, menemukan nilai tegangan efektifnya, tegangan total, dan tegangan air pori, persamaan berikut harus digunakan:

$$\sigma = h \times \gamma \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\mu = hw \times \gamma \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\sigma' = hw \times \gamma \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana,

σ = Tegangan Total (kN/m^2)

h = Jarak antar titik lapisan tanah dengan muka air (m)

γ = Berat Volume tanah (kN/m^3)

μ = Tekanan air pori (kN/m^2)

σ' = Tegangan efektif (kN/m^2)

hw = Tinggi muka air diukur dari permukaan tanah (m)

γ_w = Berat Volume air (kN/m^3)

2.2 Klasifikasi Tanah

Metode untuk mengelompokkan berbagai jenis tanah atas dasar kesamaan sifat fisiknya, terutama yang berkaitan dengan penggunaannya di bidang teknik sipil. Sistem ini bertujuan untuk menyederhanakan penyajian karakteristik tanah yang sangat beragam dalam bentuk deskripsi yang ringkas dan mudah dipahami (Das, 2022).

Pengelompokan tanah ditetapkan berdasarkan hasil analisis distribusi ukuran partikel serta nilai Batas *Atterberg*. Berbagai sistem klasifikasi telah dikembangkan untuk menyederhanakan identifikasi sifat-sifat dasar tanah. Beberapa sistem diterima secara luas meliputi sistem Departemen Pertanian Amerika Serikat (USDA), *Unified Soil Classification System* (USCS), *American Association of State*

Highway and Transportation Officials (AASHTO), sistem *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*, serta klasifikasi sederhana dari Inggris (Pratikso, 2017).

Salah satu dasar utama dalam sistem tersebut adalah ukuran partikel tanah itu sendiri. Ukurannya sangat bervariasi dan menjadi faktor penting dalam pengelompokan jenis tanah. Tanah biasanya dibagi menjadi empat jenis utama: pasir (sand), kerikil (gravel), lempung (clay) serta lanau (silt). Klasifikasi ini didasarkan pada dominasi ukuran partikel tanah. Rentang ukuran tertentu biasanya digunakan untuk menentukan kategori ini, ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 2. 2 Ukuran Batasan Golongan Tanah

Nama Golongan	Ukuran Butiran (mm)			
	Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung
Massacutes Institute of Technology (MIT)	>2	2 – 0,06	0,06 – 0,002	<0,002
U.S. Department of Agriculture (USDA)	>2	2 – 0,075	0,05 – 0,002	<0,002
American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	76,2 - 2	2 – 0,075	0,075 – 0,002	<0,002
Unified Soil Classification System (U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Borreauof Reclamation)	76,2 – 4,75	4,75 – 0,075	Halus (yaitu lanau danlempung) <0,0075.	

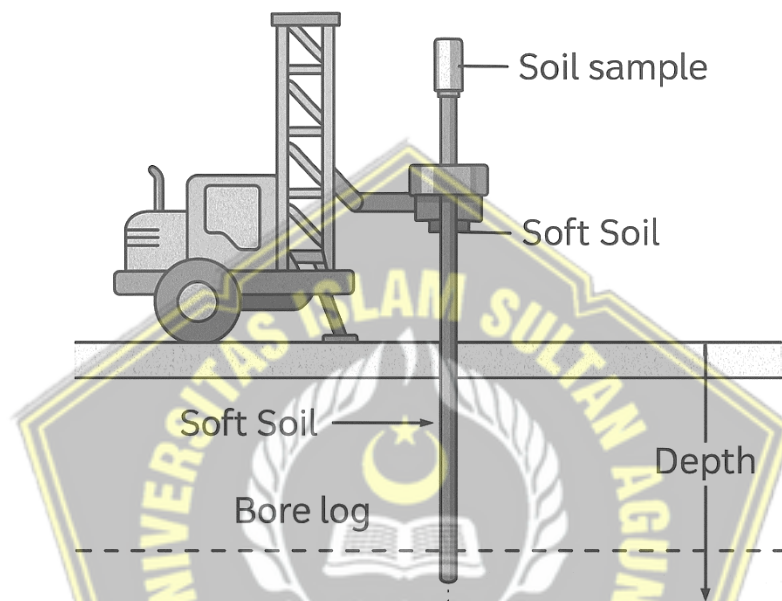
2.3 Pengujian Lapangan dan Laboratorium

1. Tes Boring

Pengujian boring merupakan metode investigasi tanah yang penting dalam tahap awal analisis perbaikan tanah lunak. Proses melalui tahap pengeboran vertikal ke dalam tanah untuk memperoleh informasi langsung mengenai kondisi lapisan tanah secara stratigrafi. Sampel tanah diambil untuk digunakan mengidentifikasi jenis

tanah, sifat fisik, serta parameter geoteknik utama yang diperlukan dalam permodelan numerik. Data dari hasil *bore log* menjadi dasar dalam kalibrasi parameter input untuk simulasi menggunakan perangkat lunak program numerik, evaluasi efektivitas metode preloading dalam mempercepat konsolidasi serta meningkatkan stabilitas tanah lunak menjadi fokus utamanya.

Tes Boring



Gambar 2. 1 Ilustrasi Tes Boring

Setelah proses pengeboran selesai dan sampel tanah diperoleh dari berbagai kedalaman, langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian laboratorium guna memperoleh data teknis tanah secara rinci. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan parameter-parameter fisis dan mekanis tanah yang digunakan dalam analisis perencanaan geoteknik.

2. Uji Konsolidasi

Uji konsolidasi merupakan salah satu pengujian laboratorium yang penting dalam evaluasi perilaku tanah lunak jenuh, khususnya tanah lempung, terhadap beban luar. Dalam perbaikan tanah menggunakan metode *preloading*, besaran dan laju penurunan (*settlement*) akibat pembebanan bertahap menjadi tujuan utama dari uji ini untuk diketahui. Sampel tanah jenuh ditempatkan dalam alat konsolidasi, kemudian dibebani secara vertikal dalam tahapan tertentu. Selama proses tersebut, perubahan tinggi sampel dicatat untuk menghitung parameter geoteknik, seperti:

- Koefisien Konsolidasi (C_v)

$$C_v = \frac{T_v \cdot H^2}{t} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana,

- C_v = Koefisien konsolidasi (cm^2/detik atau m^2/tahun)
- T_v = Nilai waktu konsolidasi (biasanya 0,197 untuk 50% konsolidasi)
- H = tinggi sampel setengah (drainase satu arah) atau penuh (dua arah)
- t = waktu konsolidasi (detik atau menit)

- Indeks Kompresi (C_c)

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log\left(\frac{\sigma_2'}{\sigma_1'}\right)} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana,

- C_c = Indeks kompresi
- e_1 = Rasio void pada tekanan efektif awal dan akhir
- e_2 = Rasio void pada tekanan efektif awal dan akhir
- σ_1' = Tekanan efektif awal dan akhir
- σ_2' = Tekanan efektif awal dan akhir

- Rasio Void

$$e = \frac{V_v}{V_s} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana,

- e = Koefisien konsolidasi (cm^2/detik atau m^2/tahun)
- V_v = Volume void (pori-pori)
- V_s = Volume partikel padat

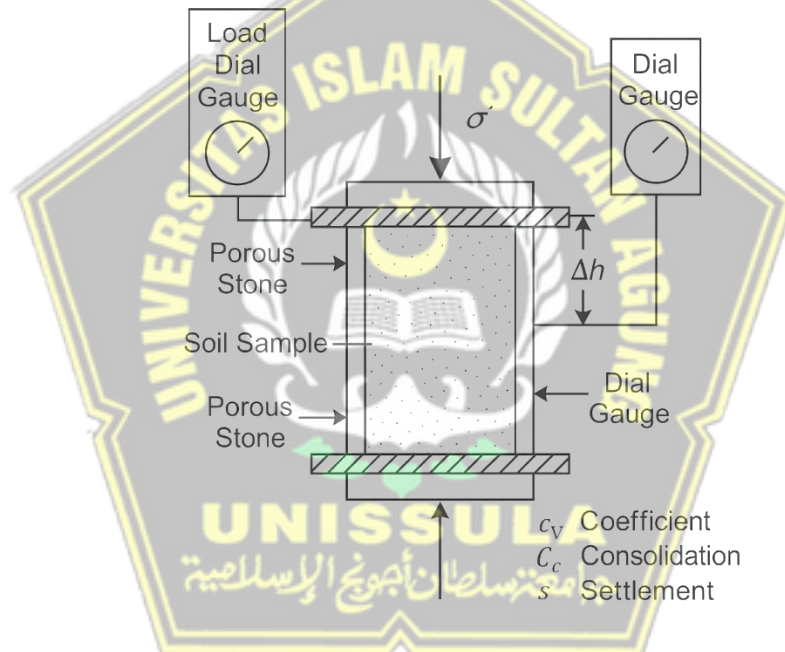
- *Settlement Primer* (S)

$$S = \frac{C_c \cdot H_0}{1 + e_0} \cdot \log\left(\frac{\sigma_0' + \Delta\sigma}{\sigma_0'}\right) \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana,

S	=	Penurunan konsolidasi primer
C_c	=	Indeks kompresi
H_0	=	Tinggi lapisan tanah terkompresi
e_0	=	Rasio void awal
σ'_0	=	Tekanan efektif awal
$\Delta\sigma$	=	Tambahan tekanan akibat <i>preloading</i>

Perhitungan ini menjadi dasar penting dalam pemodelan numerik untuk memprediksi efektivitas metode *preloading* dalam mempercepat konsolidasi dan mengurangi penurunan tanah jangka panjang.



Gambar 2. 2 Ilustrasi Uji Konsolidasi

2.4 Tanah Lunak

Mineral lempung tinggi kadar airnya menjadi penyusun utama tanah lunak. Di Indonesia, sebaran jenis tanah ini mencakup lebih dari 20 juta hektar, yakni sekitar 10% dari total luas daratan (Hardiyatmo, 2002b).

Lapisan tanah lunak biasanya terdiri dari lanau (silt) atau lempung (clay) dengan nilai uji penetrasi standar (Standard Penetration Test / N-SPT) kurang dari 4, dan juga terdiri dari tanah organik, contohnya gambut, dengan kadar air alami tinggi. Tanah pasir berada pada kondisi lepas dengan nilai N-SPT di bawah 10 juga

dianggap lunak. Tanah jenis ini tergolong tanah kohesif, yang didominasi oleh partikel halus seperti lempung dan lanau.

Menurut Hardiyatmo (2002b), sifat tanah lempung lunak sebagai berikut:

- a) Ukuran butir halus, kurang dari 0,002 mm
- b) Probabilitas rendah
- c) Tingginya kenaikan air kapiler
- d) Sifat tanah yang sangat kohesif
- e) Tingginya kadar kembang susut
- f) Lambanya proses konsolidasi.

Sebagian besar jenis ini merupakan campuran dari berbagai ukuran partikel. Tanah lempung tidak selalu tersusun murni dari partikel lempung, melainkan bisa mengandung partikel berukuran lanau, pasir, serta kemungkinan adanya bahan organik di dalamnya.

2.4.1 Karakteristik Tanah Lunak

Ciri khas tanah lunak berupa kuat geser rendah, daya dukung kecil, pemampatan besar, serta koefisien permeabilitas yang sangat rendah. Bila tanah ini diberi beban melebihi kapasitas dukungnya, dapat terjadi kerusakan pada tanah pondasi. Bahkan pada beban yang lebih kecil dari daya dukung kritis, penurunan jangka panjang tetap bisa terjadi dan menyebabkan kerusakan struktur. Oleh karena itu, tanah lunak dianggap kurang ideal sebagai lapisan dasar konstruksi.

Menurut Darwis (2018), tanah tergolong lunak bila memiliki koefisien rembesan (k) $\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/detik, berat spesifik (Gs) berkisar 2,6–2,9, angka pori (e) antara 2,5–3,2, kadar air jenuh 90–120%, serta batas cair (LL) $\geq 50\%$. Secara fisik, tanah ini mudah diremas dengan tangan saat uji lapangan. Nilai berat jenis berbagai tanah pada tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Berat Jenis (Gs) berbagai jenis tanah

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

2.4.2 Tipe Tanah Lunak

Menurut klasifikasi USDA, kategori tanah ada tiga kelompok, yaitu tanah berbutir halus, tanah dengan tinggi kadar organik dan tanah berbutir kasar. Menjelaskan bahwa tanah berbutir halus dapat dibedakan tiga jenis berdasarkan tingkat organik yang terkandung, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Tekstur tanah melalui klasifikasi tanah

Ukuran Butiran (mm)	Kelompok Tanah
2,0 – 0,05	Pasir
0,05 – 0,002	Lanau
< 0,002	Lempung

Tipe tanah lunak idibagi menjadi 3 jenis, yaitu:

1. Tanah Organik

Diklasifikasikan berdasarkan kadar material organik yang terkandung di dalamnya, yakni antara 25% hingga 75%. Jenis tanah ini dibedakan lebih lanjut menjadi dua kelompok, yaitu OH serta OL, dari tingkat plastisitasnya. Simbol L menunjukkan plastisitas rendah (bila batas cair atau *liquid limit* < 50), sedangkan H menunjukkan plastisitas tinggi (LL > 50).

2. Tanah Inorganik Berbutir Halus

Baik yang bersifat inorganik maupun organik, klasifikasi tanah halus mengacu pada sistem USDA yang membagi tanah berbutir halus ke dalam dua subkelompok, yaitu lempung (C) serta lanau (M). Lanau merupakan tanah halus dengan indeks plastisitas serta nilai batas cair yang jika diplot pada grafik, posisinya berada di bawah garis A. Di atas garis tersebutlah tanah lempung berada. Sementara itu, hubungan antar konsistensi tanah sserta kuat tekan bebas (q_u) pada tanah lempung ditampilkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Hubungan antara konsistensi dan kuat tekan bebas (q_u)

Konsistensi	q_u (kN/m ²)
Sangat lunak	< 25
Lunak	25 – 50
Sedang	50 – 100

Konsistensi	qu (kN/m ²)
Kaku	100 – 200
Sangat kaku	200 – 400
Keras	> 400

(Lanjutan)

3. Gambut

Jenis tanah dengan kandungan bahan organik melebihi 75%. Didasari proporsi serat yang dikandungnya, tanah gambut dibagi lagi menjadi dua jenis, sebagaimana ditampilkan dalam Tabel 2.6.

Tabel 2. 6 kadar serat melalui klasifikasi tanah gambut

Kadar Serat	Kelompok Gambut
> 20%	Armoft
< 20%	Berserat (fibrous)

2.5 Permasalahan Tanah Lunak

Dalam perencanaan konstruksi, penting mempertimbangkan daya dukung dan perubahan volume tanah akibat konsolidasi, pada tanah lunak berkekuatan geser rendahlah perhatian utama diarahkan, permeabilitas kecil, serta kompresibilitas tinggi. Untuk mencapai elevasi desain perkerasan, tanah dasar perlu ditimbun atau digali, terutama pada lokasi bertanah lunak, yang memerlukan tambahan timbunan guna menahan beban struktur di atasnya. Maka hal yang diperhatikan pelaksanaan proyek, yaitu:

1. Penurunan Tanah Besar

Penurunan (settlement) tanah lunak biasanya akibat pemberian beban timbunan awal (preloading) di atas tanah dasar yang sangat lunak. Fenomena ini karena deformasi dan relokasi butiran tanah serta keluarnya fluida dari dalam pori-pori tanah, yang menghasilkan penurunan volume total. Dua jenis penurunan akan terjadi pada tanah lempung jenuh: penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*) serta penurunan segera (*immediate settlement*).

Karena nilai koefisien permeabilitas tanah lempung relatif kecil dibandingkan pasir, maka proses disipasi tekanan air pori berlangsung sangat

lambat. Perubahan volume akibat konsolidasi terjadi setelah penurunan awal berlangsung. Penurunan total akibat pembebanan pada tanah dapat diklasifikasikan menjadi tiga komponen utama, yaitu:

- a. Penurunan Konsolidasi (*Consolidation Settlement*): keluar-nya air dari pori-pori tanah jenuh respons terhadap peningkatan tegangan efektif menjadi penyebab terjadinya proses tersebut.
- b. Penurunan Segera (*Immediate Settlement*): terjadinya deformasi elastis tanah segera setelah pembebanan, tidak disertai perubahan kadar air, menjadi karakteristik utama dari fase ini.
- c. Penurunan Sekunder (*Secondary Settlement*): penurunan lanjutan setelah konsolidasi selesai, yang diakibatkan oleh rekonsolidasi struktural atau deformasi viskoplastik dari rangka butiran tanah.

Settlement total yang terjadi pada tanah lunak yang dibebani S_{total} mempunyai 3 komponen:

$$S_{total} = S_i + S_c + S_s \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana,

S_i = *Immediate Settlement* (cm)

S_c = *Consolidation Settlement* (cm)

S_s = *Secondary settlement* (cm)

2. Daya Dukung Tanah Rendah

Kapasitas tanah dalam menahan beban struktur tanpa mengalami kegagalan geser (*shear failure*), dipengaruhi kekuatan geser dan kadar air tanah. Rendahnya kadar air, umumnya daya dukung tanah meningkat. Parameter ini merupakan aspek krusial dalam perencanaan fondasi maupun konstruksi jalan.

Dalam pelaksanaan konstruksi, evaluasi daya dukung tanah sangat penting untuk menjamin kestabilan struktur di atasnya. Daya dukung yang rendah dapat menyebabkan ketidakstabilan timbunan, terutama pada tanah lunak. Oleh karena itu, timbunan tinggi di atas tanah dengan daya dukung rendah harus dilakukan secara bertahap (*stage construction*) atau dilengkapi dengan perkuatan tambahan seperti dinding penahan.

2.6 Metode Perbaikan Tanah lunak

Tanah lunak memiliki sifat mudah mengalami pemampatan serta rendahnya daya dukung, sehingga perlu perbaikan agar meningkatkan kekuatannya. Perbaikan tanah bertujuan meningkatkan parameter kuat geser, menambah stabilitas timbunan atau struktur di atasnya, serta mengurangi potensi penurunan berlebih. Secara umum, tanah lunak diperbaiki dapat meningkatkan kekuatan, stabilitas, serta kinerja tanah sebagai dasar konstruksi.

1. Peningkatan kuat geser serta daya dukung tanah.
2. Peningkatan modulus tanah menjadi tujuan yang ingin dicapai.
3. Pengurangan sifat kompresibilitas tanah.
4. Agar volume stabil (*shrinking dan swelling*).
5. Peningkatan kualitas material dalam pekerjaan lapangan .
6. Peurunan kerusakan sekeliling konstruksi (*heaving*).
7. Pengurangan kerentanan pada likuifaksi .

Metode perbaikan tanah yang dipilih sesuai dengan kondisi lapangan dan berbagai kriteria teknis, seperti jenis dan sifat tanah, kondisi aliran air, tingkat perbaikan yang diperlukan, ketersediaan peralatan dan material, biaya, waktu pelaksanaan, serta ketahanan material. Berdasarkan pertimbangan tersebut, sejumlah metode umum dapat diterapkan untuk menangani tanah lunak.

1. Perkuatan dengan Geotekstil.
2. Perbaikan tanah dengan *Preloading Conventional*.
3. Perbaikan tanah dengan PVD (*Prefabricated Vertical Drain*).
4. Perkuatan dengan Cermaton (Cerucuk Matras Beton)
5. Perkuatan tanah dengan *Pile*.
6. Perbaikan tanah dengan *Vacuum Preloading*.

2.7 Parameter Tanah

2.7.1 Klasifikasi Tanah dari Data Sondir

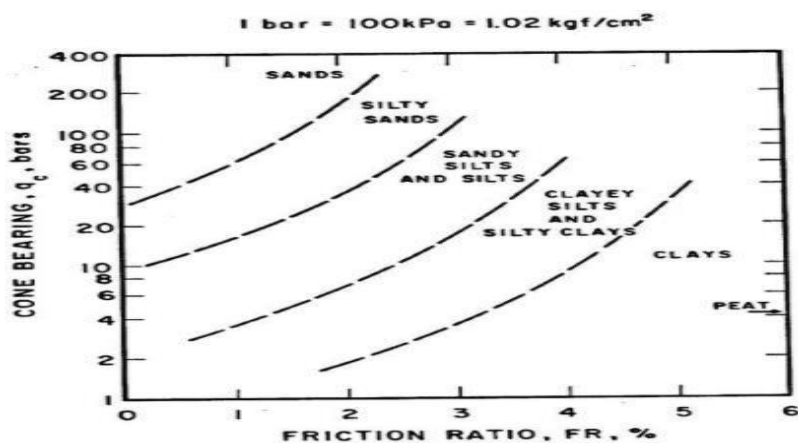
Instrumen berbentuk kerucut di ujungnya cara penggunaan ditekan secara terus-menerus ke dalam tanah pada kecepatan konstan sebesar 20 mm/detik disebut Alat *Cone Penetration Test* (CPT). Alat ini mengukur tekanan ujung konus baik dengan maupun tanpa hambatan gesekan. Ini melakukan ini untuk menghubungkan

berbagai parameter tanah, seperti tingkat kompresibilitas tanah, kuat geser tak terkuras (undrained shear strength), dan jenis lapisan tanah. Data dari pengujian sondir di lapangan diukur dengan manometer pada setiap interval 20 cm hingga konus mencapai akhir penetrasinya. Nilai tekanan konus (Q_c) adalah data awal; setelah itu, pembacaan perlawanan geser ($Q_c + F_s$) didapat. Tabel 2.7 menjelaskan penggunaan informasi untuk jenis tanah yang ditentukan.

Tabel 2. 7 Data Sondir melalui Klasifikasi Tanah

Hasil Sondir		Klasifikasi
Q_c	F_s	
6,0	0,15-0,40	Tanah humus, tanah lempung yang Lunak
6,0-10,0	0,20	Pasir lanau lepas
	0,20-0,60	Lempung lanau lembek
10,0-30,0	0,10	Kerikil lepas
	0,10-0,40	Pasir lepas
	0,40-0,80	lempung kelanauan
	0,80-2,00	Lempung sedikit kenyal
30-60	1,50	Pasir lanau, pasir sedikit padat
	1,0-3,0	lempung kelanauan kenyal
60-150	1,0	Kerikil pasir lepas
	1,0-3,0	pasir lanau atau lempung padat dan lempung lanau
	3,0	Lempung kerikil kenyal
150-300	1,0-2,0	Pasir padat, pasir kekerikilan, pasir kasar, pasir lanau padat

Grafik hubungan antar tekanan konus (Q_c) dengan perlawanan geser (F_r) seperti pada Gambar 2.3 menjadi acuan dalam penentuan jenis tanah.



Gambar 2. 3 Tekanan Conus dan Perlawanan Geser ditampilkan dalam grafik

2.7.2 Klasifikasi Tanah Berdasarkan SPT (*Standart Penetration Test*)

Selain metode pengujian penetrasi cone (CPT), Standard Penetration Test (SPT) adalah metode pengujian tanah paling umum pengukur daya dukung tanah. Pengujian ini di Indonesia mengacu pada SNI 4153-2008, yang merujuk pada standar ASTM D 1586-84 berjudul '*Standard Penetration Test and Split Barrel Sampling of Soils*'.

Pengujiannya dilakukan dengan alat sampel pipa terpisah yang dipukul ke dalam tanah menggunakan palu (hammer) dengan berat 63,5 kg dari ketinggian 75 cm. Alat ini ditumbuk hingga kedalaman 150 mm ke dalam tanah. Dicatat berapa banyak pukulan diperlukan agar menembus hingga kedalaman total 450 mm dari setiap 150 mm. Nilai N-SPT, atau tahanan penetrasi tanah, adalah banyaknya kebutuhan pukulan agar menembus kedalaman terakhir 30 cm.

Data dalam Tabel 2.8, 2.9, dan 2.10 menunjukkan bahwa terdapat hubungan proporsional antara tingkat kepadatan tanah, berat jenis tanah kering dan jenuh, nilai N-SPT, nilai konus (q_c), serta sudut geser dalam tanah (ϕ).

Tabel 2. 8 Hubungan kepadatan, berat jenis tanah kering, N-SPT, q_c , ϕ

Kepadatan	Berat Jenis Tanah Kering	Nilai N SPT	Tekanan Conus q_c (kg/cm ²)	Sudut Geser (ϕ)
Very Loose	< 0,2	< 4	< 20	< 30°
Loose	0,2 – 0,4	4 – 10	20 – 40	30° – 35°
Medium Dense	0,4 – 0,6	10 – 30	40 – 120	35° – 40°
Dense	0,6 – 0,8	30 – 50	120 – 200	40° – 45°
Very Dense	0,8 – 1,0	> 50	> 200	> 45°

Hubungan antar berat jenis tanah jenuh serta nilai N-SPT ditampilkan pada Tabel 2.9.

Tabel 2. 9 Hubungan antar berat jenis tanah jenuh dan nilai N-SPT (γ_{sat})

N-SPT (blows/ft)	Konsistensi	q_u (Unconfined Compressive Strength) ton/ft ²	γ_{sat} (kN/m ³)
< 2	Very soft	< 0,25	16 – 19
2 – 4	Soft	0,25 – 0,50	16 – 19
4 – 8	Medium	0,5 – 1,00	17 – 20
8 – 15	Stiff	1,00 – 2,00	19 – 22
15 – 30	Very stiff	2,00 – 4,00	19 – 22
> 30	Hard	>4,00	19 – 22

Terjadinya deformasi elastis tanah segera setelah pembebanan, tanpa perubahan kadar air, menjadi karakteristik utama proses ini.

Tabel 2. 10 Hubungan antar Nilai Tipikal dan Berat Volume Kering

Jenis Tanah	γ_{sat} (kN / m ³)	γ_{dry} (kN / m ³)
Kerikil	20 – 22	15 – 17
Pasir	18 – 20	13 – 16
Lanau	18 – 20	14 – 18
Lempung	16 – 22	14 – 21

2.7.3 Permeabilitas (*Permeability*)

Permeabilitas tanah mengacu pada sejauh mana tanah dapat menghantarkan udara atau air melaluinya. permeabilitas berdasarkan pergerakan air dalam tanah selama periode waktu tertentu, dan satuannya biasanya dinyatakan dalam cm/jam (Stamatopoulos & Kotzias, 1985). Aliran ini melewati pori-pori tanah secara horizontal dan vertikal. Tekstur tanah memengaruhi kecepatan aliran air. Hasil penelitian Wesley pada tahun 1977, yang mengkaji sifat permeabilitas berbagai

jenis tanah, memungkinkan kita untuk mengetahui nilai koefisien permeabilitas tanah. Hasil ditunjukkan dalam Tabel 2.11.

Tabel 2. 11 Permeabilitas (k) dalam satuan (m/s)

Ukuran Partikel	Koefisien Permeabilitas,k (m/s)
Pasir lempung dan pasir lanau	$5 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$
Pasir halus	$1 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-5}$
Pasir agak lanau	$1 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-5}$
Lanau	$1 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-6}$
Lempung	$1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-8}$

2.7.4 Modulus Young dan Pisson Ratio (v)

Rasio tegangan-regangan yang menunjukkan elastisitas tanah disebut Modulus Young. Tabel 2.12 menunjukkan jenis tanah yang dapat digunakan untuk menentukan nilai modulus elastisitas (Es) dan rasio Poisson.

Tabel 2. 12 Hubungan Modulus Elastisitas (Es) dan Nilai *Pisson Ratio*

Type of soil	Young's modulus, Es		Poisson's ratio
	MN/m ²	lb/in ²	
Loose sand	10,35 – 24,15	1500 – 3500	0,20 – 0,40
Medium dense sand	17,25 – 27,60	2500 – 4000	0,25 – 0,40
Dense sand	34,50 – 55,20	5000 – 8000	0,30 – 0,45
Silty sand	10,35 – 17,25	1500 – 2500	0,2 – 0,40
Sand and Gravel	69,00 – 172,50	10000 – 25000	0,15 – 0,35
Soft clay	2,07 – 5,18	300 – 750	0,20 – 0,50
Medium clay	5,18 – 10,35	750 – 1500	
Stiff clay	10,35 – 24,15	1500-3500	

2.7.5 Sudut Geser Dalam Tanah

Dua faktor utama yang menentukan kekuatan geser tanah Adalah kohesi dan sudut geser. Keduanya mempengaruhi daya tahan tanah terhadap tegangan. Sudut geser

langsung dan triaxial adalah sifat rekayasa tanah yang diuji. Tabel 2.13 dan 2.14 menunjukkan hubungan antara kedua parameter tersebut.

Tabel 2. 13 Jenis tanah menjadi acuan untuk hubungan dengan sudut geser dalam

Jenis Tanah	Sudut Geser Dalam
Kerikil kepasiran	35-40
Kerikil kerakal	35-40
Pasir padat	35-40
Pasir lepas	30
Lempung kelanauan	25-30
Lempung kelanauan	20-25

Tabel 2.14 berikut menunjukkan hubungan antar sudut geser dengan jenis tanah serta tingkat plastisitas.

Tabel 2. 14 Hubungan Sudut Geser Dalam, Tingkat Plastisitas, Jenis Tanah

Jenis tanah	Tingkat plastisitas	Φ
Lanau	Rendah	35-37
Lanau berlempung	Sedang	31-35
Lempung	Tinggi	<31

2.7.6 Kohesi

Kohesi yang dapat diukur dalam satuan berat persatuan luas, adalah kemampuan untuk menarik dan menarik antar partikel yang ada dalam batuan. Nilai kohesi meningkat dengan kekuatan geser. Triaxial serta ujikuat geser langsung di laboratorium memberikan nilai kohesi (c). Nilai tegangan konus (Q_c) pada data sondir dapat dihitung secara empiris untuk menentukan nilai kohesi. seperti yang ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$C = Q_c \div 20 \dots\dots\dots(2.11)$$

Hubungan kohesi, antar sudut geser dengan N-SPT ditampilkan Tabel 2.15.

Tabel 2. 15 Hubungan N-SPT, Kohesi, Sudut Geser Tanah

N – SPT	C	Φ
0 – 2	12,5	0
2 – 4	12,5 – 25	0
4 – 8	25 – 50	0
8 – 15	50 – 100	0
15 – 30	100 – 200	0
> 30	> 200	0

2.8 Penurunan (*Settlement*)

Pemadatan pada lapisan tanah di bawah permukaan menjadi konsekuensi yang muncul akibat pemberian beban di atasnya. Deformasi partikel tanah, pergeseran posisi antarpartikel, serta keluarnya air atau udara dari rongga porilah yang menjadi penyebab terjadinya pemadatan tersebut. Faktor-faktor tersebut, baik sebagian maupun keseluruhan, berkaitan erat dengan kondisi tanah yang sedang dianalisis (Das, 2022). Penurunan tanah dikarenakan pembebanan dua kategori utama, berikut ini:

1. Penurunan tanah disebabkan oleh keluarnya air melalui pori-pori tanah menyebabkan volume tanah jenuh air menurun dikenal sebagai penurunan konsolidasi.
2. Penurunan segera disebabkan jenis penurunan tanah yang terjadi tanpa perubahan kadar air karena deformasi elastis pada tanah kering, basah, atau jenuh air. Dalam hal ini, perhitungan penurunan ini menggunakan teori elastisitas.

Tekanan air pori meningkat secara tiba-tiba ketika beban tambahan diterapkan pada lapisan tanah jenuh air. Akibat peningkatan tekanan, air pori dapat mengalir keluar dengan cepat dari tanah berpasir yang bersifat tembus air (*permeable*), sehingga terjadi pengurangan volume tanah yang kemudian menimbulkan

penurunan (*settlement*). Karena dengan mudah air keluar dari pori-pori tanah berpasir, konsolidasi serta penurunan segera berlangsung secara bersama.

Sebaliknya, pada tanah lempung jenuh air yang bersifat mudah mampat (*compressible*), langsung terjadinya penurunan awal saat beban diberikan. Namun, karena tanah lempung memiliki koefisien rembesan yang jauh lebih kecil dibanding pasir, air pori keluar sangat lambat sehingga tekanan air pori berkurang perlahan dalam jangka waktu cukup lama. Karena itu, konsolidasi pada tanah lempung terjadi setelah penurunan segera (*Immediate Settlement*), biasanya memiliki besaran yang lebih besar serta memerlukan waktu lebih lama dan diklasifikasikan menjadi 3 bagian.

2.8.1 Penurunan Konsolidasi (*Consolidation Settlement – Sc*)

Penurunan permukaan tanah akibat berkurangnya volume tanah jenuh air karena air di dalam pori-pori mengalir keluar. Ketika suatu lapisan tanah diberikan beban tambahan, air pori secara perlahan keluar dari rongga tanah seiring waktu, sehingga total volume tanah menyusut. Proses ini dikenal sebagai penurunan konsolidasi (*one-dimensional settlement*).

Dua aspek penting dari konsolidasi yang perlu diperhatikan adalah seberapa besar penurunan terjadi serta berapa lama waktu yang dibutuhkan hingga penurunan mencapai nilai tertentu. Pada tanah berpasir, yang memiliki permeabilitas tinggi, air mengalir dengan cepat sehingga penurunan pun berlangsung dalam waktu singkat. Oleh karena itu, pada saat konstruksi selesai di atas tanah pasir, penurunannya umumnya juga telah selesai. Penurunan pada jenis tanah ini disebut penurunan segera, dan dianggap bahwa tidak ada terjadinya konsolidasi terhadap tanah pasir.

Waktu disipasi yang lama menjadi karakteristik tanah lempung akibat permeabilitasnya yang rendah. Proses konsolidasi hanya pada tanah lempung dan sangat lambat. Panjang lintasan aliran air pori mempengaruhi durasi dan kecepatan proses konsolidasi selain permeabilitas. Terzaghi pertama kali membangun teori konsolidasi (1920–1924) dengan beberapa asumsi, seperti:

1. Konsolidasi berlangsung satu dimensi dan hanya ke arah vertikal.
2. Air dianggap tidak dapat dimampatkan (*incompressible*).

3. Tanah lempung berada dalam kondisi jenuh.
4. Permeabilitas tanah dianggap konstan.
5. Deformasi tanah kecil dan linier.
6. Aliran air mengikuti hukum Darcy.
7. Partikel tanah dianggap tidak dapat dimampatkan (*incompressible*).

2.8.2 Penurunan Segera (*Immediate Settlement – Si*)

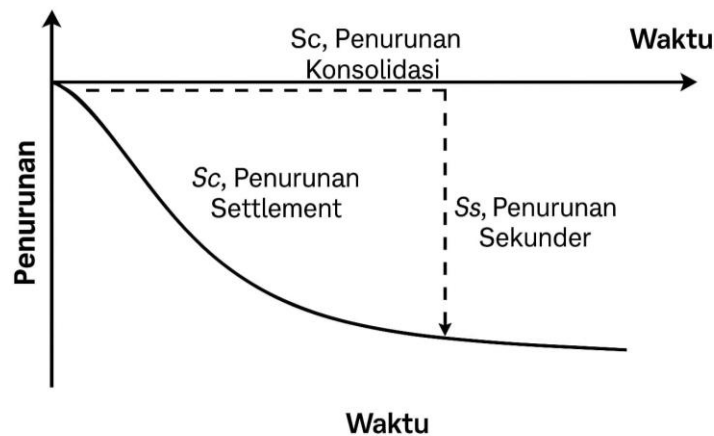
Penurunan segera terjadi ketika lapisan tanah jenuh air mengalami penambahan beban, yang menyebabkan tekanan air pori meningkat secara tiba-tiba. Pada tanah berpasir memiliki permeabilitas tinggi, aliran air pori berlangsung sangat cepat sehingga respon terhadap peningkatan tekanan air pori juga terjadi dalam waktu singkat.

Secara umum, penurunan segera (*immediate settlement*) lebih sering terjadi pada tanah pasir, sementara pada tanah lempung kasus ini sukar ditemukan. Oleh karena itu, dalam analisis atau perhitungan teknik, penurunan segera pada tanah lempung sering kali diabaikan.

2.8.3 Penurunan Sekunder (*Secondary Settlement – Ss*)

Bentuk pemampatan tanah terjadi akibat pergeseran atau penyesuaian butir tanah bersifat plastis pada struktur tanah menjadi proses yang berlangsung di dalamnya. Proses ini juga dikenal dengan istilah penurunan rangkak (*creep*), yang berlangsung setelah fase penurunan konsolidasi selesai.

Disebabkan oleh reorganisasi struktur internal tanah setelah seluruh kelebihan tekanan air pori telah hilang ($U = 0$), berlangsungnya penurunan sekunder pada jangka waktu panjang, dampaknya sulit untuk dihitung atau diperkirakan secara akurat. Gambaran lengkap mengenai komponen penurunan total dilihat Gambar dibawah ini.



Gambar 2. 4 Tahap penurunan tanah

Penurunan tanah, atau pendudukan tanah, bergantung pada jenis tanah. Dalam kebanyakan kasus, dari ketiga jenis penurunan yang ada, hanya satu yang mendominasi jenis tanah tertentu, sementara dua jenis penurunan lainnya biasanya sangat kecil dan dapat diabaikan (Das, 2022). Sebagai contoh, penurunan konsolidasi adalah jenis penurunan yang paling signifikan pada tanah lempung anorganik (tanah lempung anorganik). Penurunan segera dan sekunder biasanya sangat kecil sehingga tidak diperhitungkan dalam analisis teknis.

2.9 Dasar Konsolidasi

Proses berkurangnya volume tanah akibat keluarnya air pori sebagai respons terhadap beban di atas permukaan tanah. Berlangsung secara bertahap seiring waktu karena rendahnya permeabilitas tanah, dan terus terjadi hingga seluruh kelebihan tekanan air pori akibat peningkatan tegangan total terdisipasi sepenuhnya.

Konsolidasi umumnya terjadi secara vertikal (*one-dimensional*), karena tanah di sekelilingnya memberikan tahanan lateral yang mencegah pergerakan horizontal. Beban penyebab konsolidasi bisa berupa timbunan tanah atau bangunan.

Teori konsolidasi klasik yang mengaitkan tegangan efektif serta tekanan air pori dikembangkan oleh Terzaghi antara tahun 1920–1924, dengan sejumlah asumsi dasar sebagai landasannya.

1. Tanah diasumsikan selalu jenuh penuh ($S = 100\%$). Meskipun konsolidasi bisa dihitung pada tanah tak jenuh, prediksi waktunya menjadi tidak akurat.
2. Air dan partikel tanah dianggap tidak dapat dimampatkan.
3. Hubungan antara tekanan dan perubahan volume dianggap linier.

4. Koefisien permeabilitas dianggap tetap, meskipun viskositas air bisa berubah $\pm 30\%$ akibat perubahan suhu dari 10°C ke 20°C
5. Konsolidasi dianggap satu dimensi (vertikal), tanpa aliran air atau deformasi lateral.
6. Sampel tanah yang dianalisis dianggap tidak terganggu (*undisturbed sample*).

2.9.1 Uji Konsolidasi Satu Dimensi

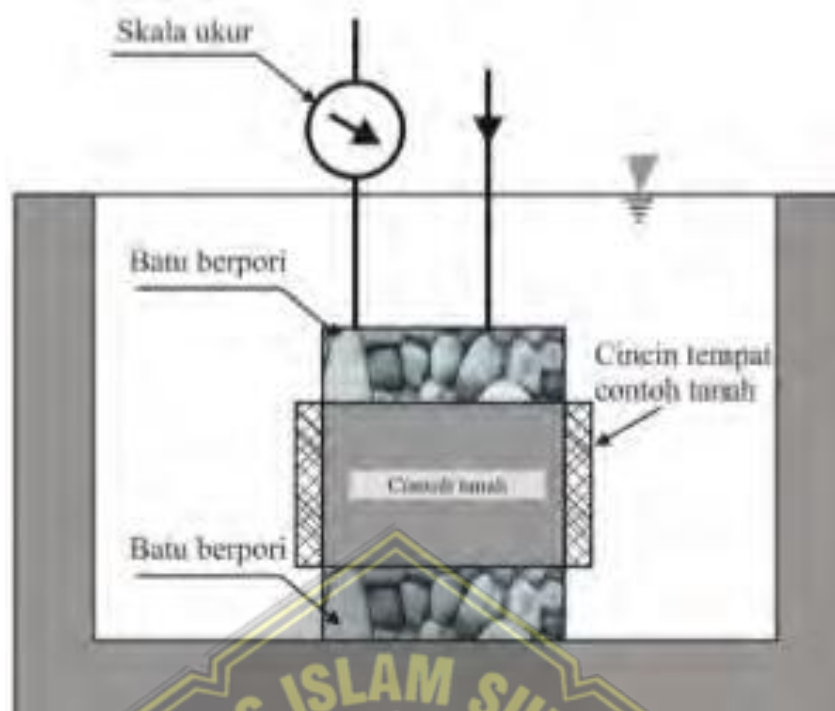
Teori paling umum digunakan untuk memprediksi besar dan lamanya penurunan tanah merupakan teori uji konsolidasi satu dimensi Terzaghi. Menurut teori ini, aliran air dan deformasi hanya terjadi secara vertikal.

Uji konsolidasi 1-D pertama kali dikembangkan oleh Terzaghi dan dilakukan menggunakan alat bernama konsolidometer (*oedometer*). Cincin logam ditaruh sample tanah dengan batu berpori di bagian atas dan bawah, kemudian direndam dalam air selama pengujian. Ukuran sampel umumnya berdiameter 63,5 mm dan tebal 25,4 mm.

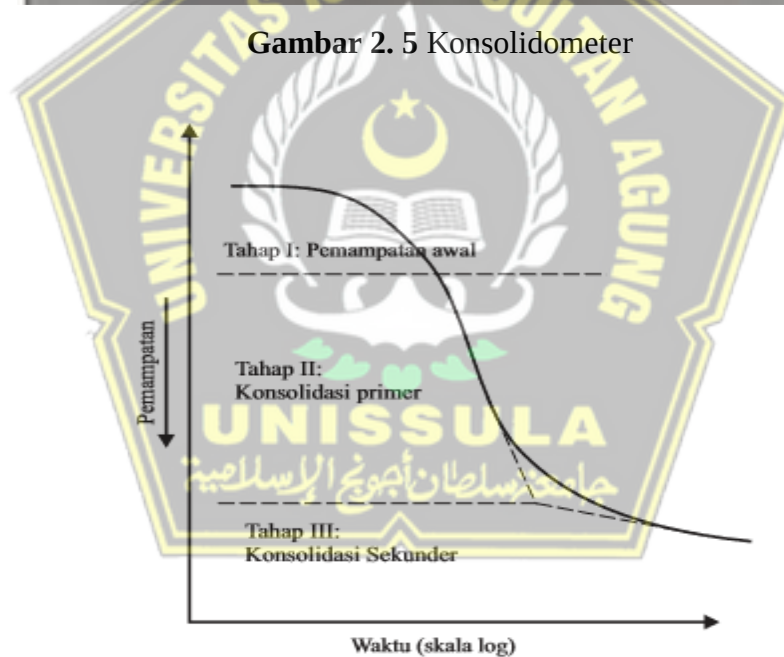
Pembebanan dilakukan bertahap, dengan durasi tiap tahap selama 24 jam lalu beban selanjutnya dua kali lipat dinaikkan dari sebelumnya. Pemampatan diukur menggunakan alat pengukur mikrometer, dan setelah selesai, berat kering tanah ditentukan.

Hasil uji ditampilkan dalam grafik hubungan antar pemampatan dengan waktu, yang terdiri dari tiga tahap utama:

1. Pemampatan awal: akibat langsung beban awal (*preloading*).
2. Konsolidasi primer: saat tekanan air pori secara bertahap berpindah menjadi air keluar dari pori tanah karena tegangan efektif.
3. Terjadinya konsolidasi sekunder setelah tekanan air pori sepenuhnya hilang. Penurunan pada tahap ini dikarenakan penyesuaian plastis antar butiran tanah.



Gambar 2. 5 Konsolidometer



Gambar 2. 6 Grafik Waktu – Pemampatan konsolidasi untuk penimbunan

Dengan asumsi konsolidasi satu dimensi, penurunan akibat konsolidasi primer di lapangan dapat dihitung dari hasil uji laboratorium. Teori pertama tentang laju konsolidasi satu dimensi pada tanah lempung jenuh air dikembangkan oleh Terzaghi dengan sejumlah asumsi dasar berikut ini:

- Homogen merupakan tanah (sistem lempung air).
- Tanah jenuh.

- c. Terabaikan emampatan air.
- d. Terabaikan Kemampatan butiran air diabaikan.
- e. Satu arah aliran air (yaitu pada arah pemampatan).
- f. Berlakunya Hukum Darcy

Persamaan diferensial dasar dari teori konsolidasi oleh Terzaghi disajikan secara matematis sebagai berikut:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana,

- u = tekanan air pori (KN/m²)
- t = waktu peninjauan (s)
- z = kedalaman peninjauan (m)
- $\frac{\partial u}{\partial t}$ = turunan pertama air pori
- $\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ = turunan kedua tekanan air pori terhadap kedalaman

2.9.2 Derajat Konsolidasi Arah Vertikal

Penentuan derajat konsolidasi vertikal (U_v) dalam konsolidasi 1-D menurut formulasi Terzaghi dinyatakan melalui persamaan matematis berikut:

- Jika ($U_v \leq 60\%$) maka:

$$U_v = \frac{\sqrt{\frac{4T_v}{\pi}}}{\left(1 + \left(\frac{4T_v}{\pi} \cdot 2.8\right)^{0.175}\right)} \dots\dots\dots(2.13)$$

- Jika ($U_v \geq 60\%$) maka:

$$U_v = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{1}{(2m+1)^2} \right) \exp \left[\frac{-\pi^2 (2m+1)^2}{4} T_v \right] \dots\dots\dots(2.14)$$

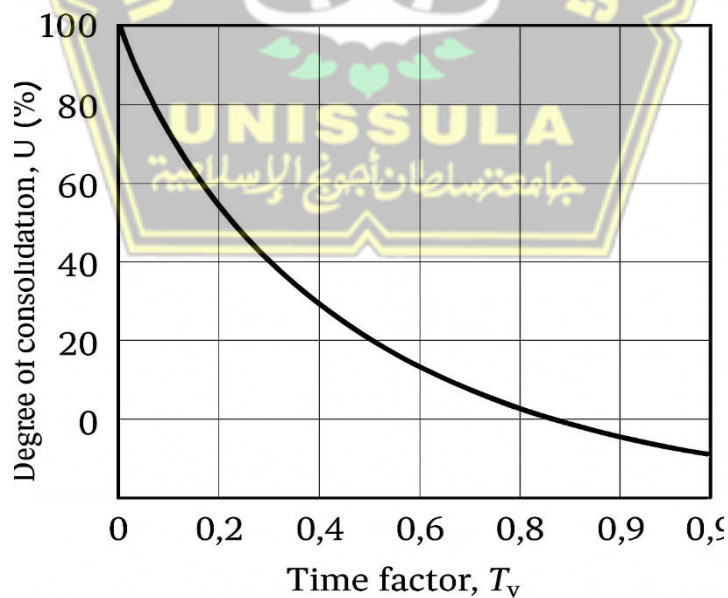
Dimana,

- m = bilangan bulat
- T_v = faktor waktu
- C_v = koefisien konsolidasi arah vertikal (cm²/detik)
- t = waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi (s)
- exp = 2,7182818

Hubungan antara derajat konsolidasi rata-rata dan faktor waktu tak berdimensi T_v tercantum dalam Tabel berikut ini, berlaku saat tekanan air pori awal U_0 seragam di seluruh kedalaman lapisan. Nilai T_v dan derajat konsolidasi rata-rata dalam kondisi ini dapat direpresentasikan melalui persamaan sederhana.

Tabel 2. 16 Variasi faktor waktu terhadap derajat konsolidasi

Derajat Konsolidasi (U%)	Faktor Waktu (T_v)
0	0,000
10	0,008
30	0,071
20	0,031
40	0,126
50	0,197
60	0,287
70	0,403
80	0,567
90	0,848
100	∞



Gambar 2. 7 Grafik variasi derajat konsolidasi terhadap faktor waktu

2.9.3 Koefisien Konsolidasi Vertikal

Umumnya menurun seiring meningkatnya batas cair (LL) tanah. Nilai C_v bervariasi cukup luas untuk suatu LL tertentu dan memengaruhi laju aliran air secara vertikal. Karena konsolidasi biasanya terjadi searah vertikal, maka C_v sangat menentukan kecepatan konsolidasi. Nilainya dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$C_v = \frac{T_v H^2}{t} \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana,

- C_v = koefisien konsolidasi vertikal (cm²/detik)
- T_v = faktor waktu derajat konsolidasi vertikal
- H = panjang aliran air pori selama proses konsolidasi (cm)
- t = waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi U%

2.9.4 Lempung yang Terkonsolidasi Secara Normal (*Normally Consolidated*) dan Terlalu Terkonsolidasi (*Over Consolidated*)

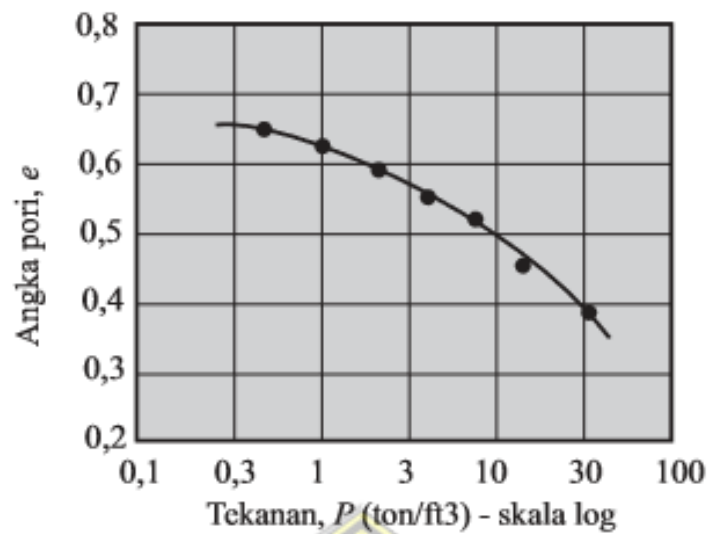
Gambar 2.9 grafik antara angka pori e dan log tekanan $\log p$, di mana bagian awal grafik berbentuk lengkung landai, lalu berlanjut menjadi garis lurus yang lebih curam. Hal ini mencerminkan kondisi tanah yang sebelumnya telah mengalami tekanan efektif *overburden* maksimum dalam sejarah geologinya.

Ketika sampel tanah diambil, ia kehilangan tekanan *overburden* tersebut dan mengembang. Saat dilakukan uji konsolidasi di laboratorium, jika beban yang diberikan masih di bawah tekanan maksimum, hanya terjadi sedikit perubahan pori. Namun, jika beban melebihi tekanan sebelumnya, angka pori berubah signifikan dan grafik menjadi linear dengan kemiringan tajam.

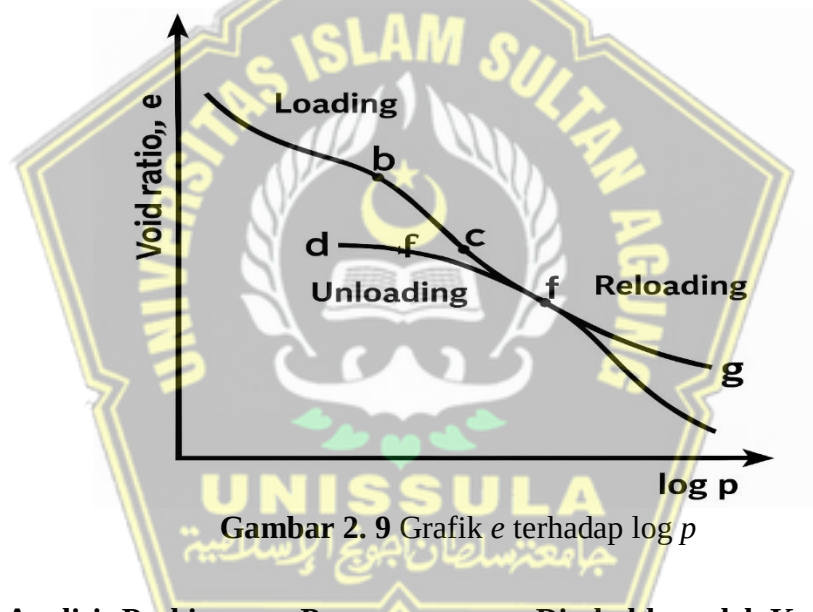
Hal ini dapat diuji dengan siklus pembebanan dan pembebasan beban (*unloading-reloading*). Seperti ditunjukkan pada grafik, bagian *cd* untuk *unloading* dan *dfg* untuk *reloading*.

Kondisi ini menghasilkan dua istilah penting berdasarkan riwayat tekanan:

1. *Normally Consolidated Soil*: Tanah saat ini menahan tekanan maksimum yang pernah dialami.
2. *Overconsolidated Soil*: Tekanan efektif saat ini lebih kecil dari yang pernah dialami sebelumnya, disebut *preconsolidation pressure*.



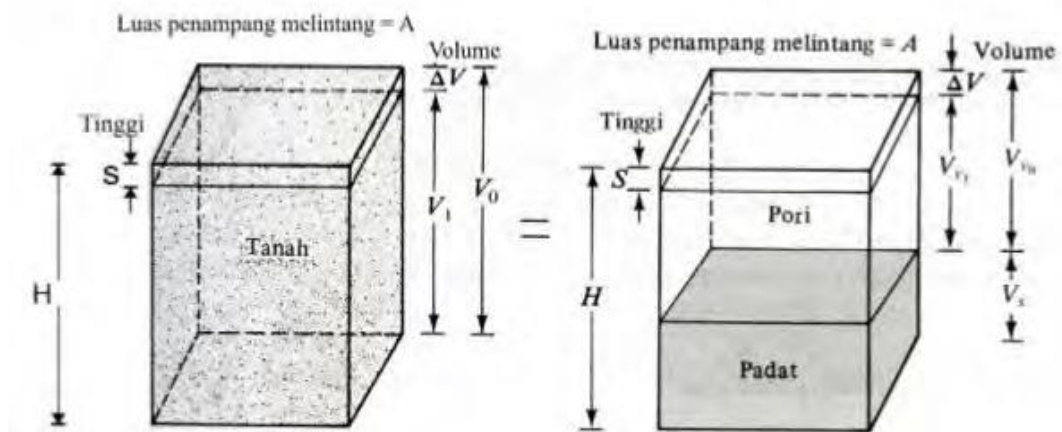
Gambar 2. 8 Variasi angka pori terhadap tekanan



Gambar 2. 9 Grafik e terhadap $\log p$

2.9.5 Analisis Perhitungan Penurunan yang Disebabkan oleh Konsolidasi Primer Satu Dimensi

Berdasarkan hasil uji konsolidasi, penurunan akibat konsolidasi primer di lapangan dihitung dengan asumsi prosesnya berlangsung satu dimensi (Das, 2022). Misalnya, pada lapisan tanah lempung jenuh setebal H dengan luas penampang A , serta tekanan efektif rata-rata P_0 , jika terdapat penambahan tekanan sebesar Δp , maka akan terjadi penurunan primer sebesar S . Ilustrasi dari kondisi ini ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Penurunan yang disebabkan oleh konsolidasi satu dimensi

Volume pori dapat ditentukan dengan menggunakan rumus :

$$S\Delta v = V_0 - V_1 = H \times A - (H - S) \times A = S \times A \dots\dots\dots(2.16)$$

Volume awal (V_0) dan volume akhir (V_1) masing-masing menjadi acuan dalam pernyataan tersebut. Namun, perubahan volume itu sendiri setara dengan perubahan volume pori, Δv_v . Jadi :

$$\Delta V = S \times A = V_{v0} - V_{v1} \dots\dots\dots(2.17)$$

Volume awal dan akhir pori, masing-masing V_{v0} dan V_{v1} , menjadi acuan. Sedangkan angka pori sebagai berikut:

$$\Delta V_v = \Delta e \times V_s \dots\dots\dots(2.18)$$

Dimana Δe = perubahan angka pori, tetapi :

$$V_s = \frac{V_0}{1+e_0} = \frac{AH}{1+e_0} \dots\dots\dots(2.19)$$

Angka pori awal, e_0 , didefinisikan ketika volume tanah berada pada kondisi V_0 . Dengan demikian, hasil yang diperoleh berasal dari penyusunan persamaan tersebut:

$$S = H \frac{\Delta e}{1+e_0} \dots\dots\dots(2.20)$$

Pada lempung yang mengalami konsolidasi normal, hubungan antara angka pori (e) dan logaritma tekanan ($\log p$) membentuk suatu garis lurus, maka :

$$\Delta e = C_c [\log(P_0 + \Delta p) - \log P_0] \dots\dots\dots (2.21)$$

Kemiringan kurva Δe terhadap $\log P_0$, yang dikenal sebagai indeks pemampatan (C_c), menjadi dasar diperolehnya persamaan tersebut:

$$S = \frac{C_c H}{1+e_0} \log \left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \right) \dots\dots\dots (2.22)$$

Disarankan menghitung penurunan secara terpisah tiap lapisan, dan membagi lapisan lempung tebal menjadi beberapa lapisan. Oleh karena itu, total penurunan lapisan tersebut adalah:

$$S = \sum \frac{C_c H_i}{1+e_0} \log \left(\frac{P_{0i} + \Delta P_i}{P_{0i}} \right) \dots\dots\dots (2.23)$$

Dimana,

- S = Penurunan total
- H = Tebal lapisan tanah lunak yang memampat (m)
- H_i = Sub lapisan i
- P_{0i} = Tekanan efektif *overburden* untuk sub-lapisan i (t/m^2)
- P_c = Tegangan perkonsolidasi efektif (t/m^2)
- ΔP_i = Penambahan tekanan vertikal untuk sub-lapisan i (t/m^2)
- C_c = Indeks pemampatan (*compression index*)
- C_s = Indeks pemuai (*swelling index*)
- e_0 = Angka pori awal (*initial void ratio*)

Pada lempung yang terlalu terkonsolidasi (*overconsolidated*), garis CB dengan kemiringan hampir sama seperti kurva pantul (*rebound curve*) dari uji konsolidasi laboratorium menunjukkan variasi e versus $\log p$. Jika $(P_0 + \Delta P) \leq P$ lapangan, variasi e versus $\log p$ akan berada di sepanjang cb .

Indeks pemuai, ditunjukkan oleh kemiringan kurva pantul (C_s), dasar penentuan besarnya penurunan kemudian dihitung melalui persamaan berikut:

- Bila $(P_0 + \Delta P)$ maka :

$$S = \frac{C_s \cdot H}{1+e_0} \log \left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \right) \dots\dots\dots (2.24)$$

- Bila $(P_0 + \Delta P) > P_c$ maka :

$$S = \frac{C_s \cdot H}{1+e_0} \log \left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \right) + \frac{C_c \cdot H}{1+e_0} \log \left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \right) \dots\dots\dots (2.25)$$

Dalam lapangan, $(P_0 + \Delta P) \leq P_c$, dan sepanjang CB lah variasi e versus $\log p$ berada, dengan kemiringan yang hampir sama seperti kurva pantul (*rebound curve*) hasil uji konsolidasi laboratorium. Karena itu, kurva pantul C_s disebut sebagai "indeks pemuaian" Jadi:

$$\Delta e = C_s [\log(P_0 + \Delta p) - \log P_0] \dots\dots\dots (2.26)$$

Jika kurva e versus $\log p$ tersedia, Δe dapat dengan mudah dipilih dari grafik dengan rentang (*range*) tekanan yang sesuai. Selanjutnya, persamaan untuk digunakan untuk menghitung besar penurunan S dengan memasukkan nilai-nilai dari kurva.

2.9.6 Indeks Pemampatan (*Compression Index, C_c*)

Besar penurunan akibat konsolidasi dapat dihitung dengan indeks pemampatan, yang diperoleh dari kurva hubungan tekanan serta angka pori dari hasil uji konsolidasi laboratorium. Konsolidasi sekunder, yang ditunjukkan oleh hubungan linier antar $\log$ waktu (t) dengan deformasi. Dalam tanah anorganik serta organik yang sangat kompresibel, konsolidasi sekunder sangat penting. Namun, dampak pada lempung anorganik yang terlalu konsolidasi biasanya kecil dan dapat diabaikan.

Rasio antara konsolidasi sekunder dan primer bergantung pada perbandingan kenaikan tegangan (Δp) terhadap tegangan efektif awal (P_0). Semakin kecil $\frac{\Delta p}{p_0}$, semakin besar kontribusi konsolidasi sekundernya.

Menuurut Terzaghi & Peck (1967), nilai indeks kompresi (C_c) dapat diperkirakan secara empiris dari nilai batas cair (LL) sebagai berikut:

1. Untuk lempung tak terganggu (undisturbed): $C_c = 0,009 (LL - 10)$
2. Untuk lempung yang telah rusak (remolded): $C_c = 0,007 (LL - 10)$

Ketika data uji laboratorium tidak tersedia, rumus-rumus empiris tersebut menjadi acuan yang kerap digunakan dalam perhitungan konsolidasi primer di lapangan.

Korelasi-korelasi empiris untuk menentukan nilai indeks kompresi (C_c) disajikan pada Tabel 2.17

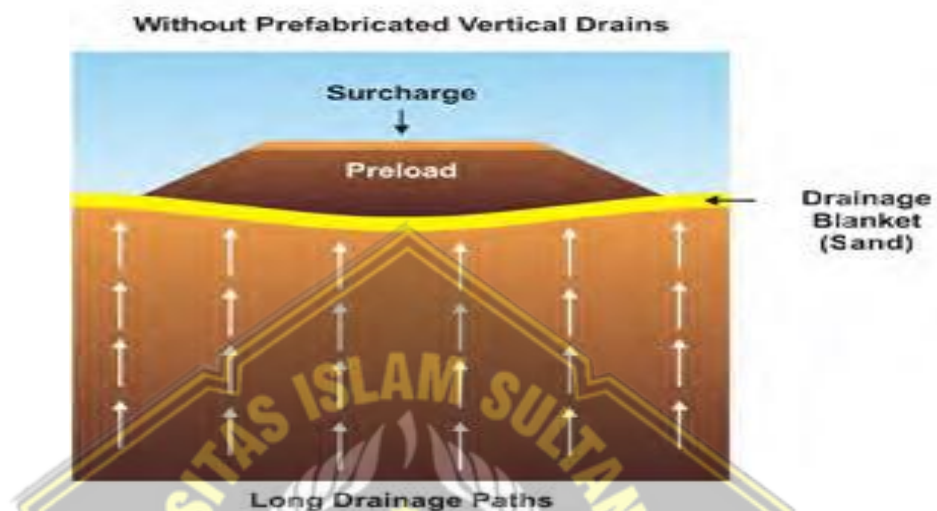
Tabel 2. 17 Penentuan nilai indeks kompresi (C_c) dilakukan berdasarkan korelasi empiris

Kadar organik	Kelompok tanah
$C_c = 0,009 (LL - 10)$	Untuk lempung tak terganggu
$C_c = 0,007 (LL - 10)$	Untuk lempung terbentuk kembali
$C_c = 0,007 (LL - 7)$	Untuk lempung terbentuk kembali
$C_c = 0,0046 (LL - 9)$	Lempung Brazilian
$C_c = 0,01$ on	Lempung Chicago
$C_c = 0,0115$ on	Gambut, lanau organik, dan lempung
$C_c = 1,15 (e_o - 0.27)$	Lempung pada umumnya
$C_c = 0,30 (e_o - 0.27)$	Tanah kohesif non organik, lanau, lempung berlanau, lempung tanah
$C_c = ,75 (e_o - 0.5)$	Tanah berplastisitas rendah
$C_c = 0,208 e_o + 0.0083$	Lempung Chicago
$C_c = 0,156 e_o + 0.0107$	Lempung Pada umumnya

2.10 Pembebanan Awal (*Preloading*)

Tanah lunak umumnya terdiri dari lempung (*clay*) atau lanau (*silt*), yang memiliki permasalahan utama berupa rendahnya daya dukung dan tingginya penurunan (*settlement*). Untuk mengatasi hal ini, berbagai metode perbaikan tanah dapat diterapkan, baik secara mekanis, kimiawi, penggunaan material perkuatan, maupun teknik hidrolis. Pemilihan metode bergantung pada kondisi geologi, karakteristik tanah, efisiensi biaya, dan ketersediaan material.

Preloading, yang bertujuan untuk meningkatkan kekuatan geser dan mengurangi penurunan paska konstruksi. Metode ini bekerja dengan mempercepat proses konsolidasi tanah lunak yang permeabilitasnya rendah, biasanya melalui penimbunan sebagai beban awal. *preloading* telah banyak diterapkan pada proyek tanggul, reklamasi, pelabuhan, dan bandar udara.



Gambar 2. 11 Aliran air pori pada tanah

Preloading metode perbaikan tanah lunak memberikan timbunan sementara atau melebihi atau setara beban struktur rencana. Timbunan ini berperan mempercepat konsolidasi melalui pengeluaran air pori, sehingga meningkatkan kohesi dan kekuatan geser tanah. Kenaikan kekuatan ini memungkinkan tanah menopang beban lebih besar dan menentukan ketinggian timbunan yang optimal.

Tinggi timbunan kritis untuk menghitung preloading dari daya dukung awal tanah lempung dan berbanding dengan beban yang dapat diterima tanah dasa, yaitu H kritis (H_{cr}). Tujuan penentuan tinggi timbunan ini adalah untuk mencegah tanah timbunan terbuang sia-sia. Tahapan pemberian beban preloading sebagai berikut:

- Perhitungan pemampatan yang timbul akibat timbunan setinggi H_{cr} (beban tahap I).
- Perhitungan besar pemampatan untuk U rata-rata sebesar 90% beserta waktu yang dibutuhkan yaitu St_1 dan t_1 .
- Daya dukung meningkat tanah akibat pemampatan sebesar St_1 menjadi besaran yang dihitung dengan menggunakan persamaan yang telah ditetapkan:

$$\frac{\Delta c_u}{P'_{o}} = 0,11 + 0,0037 \text{ PI} \dots\dots\dots(2.27)$$

Dimana,

Δc_u = Peningkatan kuat geser akibat pemampatan (t/m^2)

P'_o = Tegangan overburden setelah pemampatan (t/m^2)

PI = Plasticity Index (%)

c_u = Kuat geser mula-mula (t/m^2)

c'_u = Kuat geser setelah (t/m^2)

- d. Penentuan tinggi timbunan untuk beban tahap II didasarkan pada peningkatan daya dukung tanah yang telah diperoleh pada langkah ke 3.
- e. Penambahan tinggi timbunan pada beban tahap II untuk mencapai U rata-rata sebesar 90% beserta waktu yang dibutuhkan, St1 dan t2.
- f. Peningkatan daya dukung terjadi setelah pemampatan akibat beban tahap II.
- g. Tentukan beban tahap III sesuai dengan langkah sebelumnya sehingga sampai pemampatan total dipenuhi. Saat tahap pemberian beban selesai, tinggi timbunan akhir harus sama dengan tinggi timbunan rencana.

Perhitungan daya dukung tanah lempung pada perencanaan beban preloading menjadi dasar penentuan nilai berikut.:

$$q_u = 2 \cdot C_u \dots\dots\dots(2.28)$$

(kohesi tanah dasar dari tipe material timbunan menjadi acuan pengambilan nilai C_u .)

$$q_u = \gamma_{timb} \cdot H_{cr}$$

Maka:

$$H_{cr} = \frac{5C_u}{\gamma_{timb.SF}} \dots\dots\dots(2.29)$$

Dimana,

q_u = Daya dukung tanah (t/m^2)

C_u = Kohesi tanah dasar (t/m^2)

γ_{timbunan} = Berat volume tanah timbunan (t/m^3)

SF = *Safety Factor*

H_{cr} = Tinggi timbunan kritis (m)

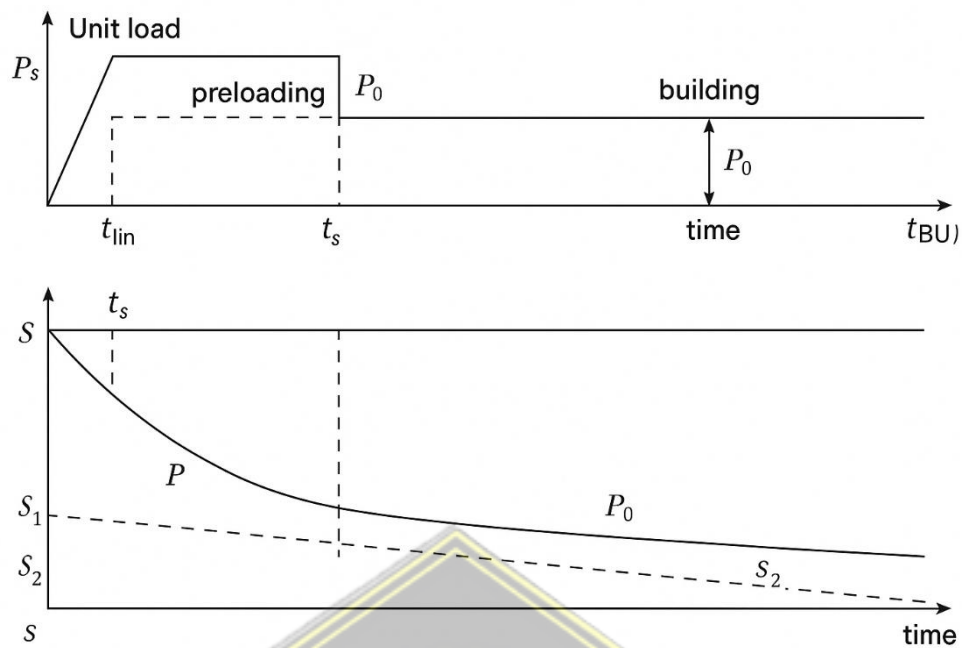
Durasi penurunan akibat metode *preloading* dengan timbunan (*surcharge*) umumnya berlangsung selama 3 hingga 8 bulan, terhitung sejak timbunan ditempatkan hingga diangkat kembali, dengan besar penurunan berkisar antara 0,3 hingga 2,0 meter (Stamatopoulos & Kotzias, 1985).

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji percepatan konsolidasi tanah akibat *preloading* hingga tercapai derajat konsolidasi primer yang sama. Menurut Stamatopoulos & Kotzias (1985), terdapat syarat penting perlu diperhatikan pada penerapan metode *preloading* di suatu tanah, antara lain:

- a. Rentang batas toleransi masih mencakup penurunan yang terjadi.
- b. Lahan luas agar mengakomodir sekitar 10 meter atau lebih di luar parameter struktur rencana menjadi persyaratan utama.
- c. Material untuk timbunan tersedia.
- d. Ketersediaan alat angkut material dengan kapasitas besar.
- e. Penanganan yang baik oleh Engineer.

Prinsip dari *preloading* dijelaskan sebagai berikut:

1. Beban rencana sebesar P_0 diberikan ke tanah lunak, menghasilkan penurunan awal sebesar S_1 dalam waktu t_{BU} . Hal ini digambarkan dengan kurva penurunan P_0 .
2. Kemudian ditambahkan beban sementara (*surcharge*) sebesar P_s , sehingga total beban menjadi $P_v = P_0 + P_s$.
3. Beban total P_v menyebabkan penurunan tanah yang lebih besar, digambarkan oleh kurva P_v dan memungkinkan penurunan rencana sebesar S_1 dicapai dalam waktu yang lebih singkat, yaitu t_s .
4. Setelah penurunan yang ditargetkan tercapai, beban sementara P_s diangkat, dan digantikan dengan beban permanen struktur sebesar P_0 .
5. Perbedaan antara penurunan total tanpa *preloading* dan dengan *preloading* pada waktu t_{BU} sebesar $S_1 - S_2$, menunjukkan efektivitas metode *preloading* dalam mempercepat konsolidasi tanah lunak.



Gambar 2. 12 Proses Pemberian Pembebanan Awal (*Preloading*)

Pemberian beban awal pada permukaan tanah menyebabkan partikel-partikel tanah menjadi lebih rapat, sehingga area kontak antar butiran tanah meningkat. Kondisi ini akan mendorong peningkatan kuat geser (*shear strength*) tanah. Dengan demikian, selama proses pembebanan awal, tanah kohesif mengalami peningkatan kuat geser dan kemampuan daya dukungnya terhadap beban tekan (*compression*) menjadi lebih tinggi.

Proses pembebanan awal (*preloading*) dikatakan berjalan dengan lancar apabila:

1. Jadwal rencana konstruksi sesuai waktu dari *preloading*.
2. Dari tahap awal sampai tahap akhir tidak terjadinya kelongsoran pada bagian dasar preloading (pembangunan konstruksi).

Penyelidikan lokasi dilakukan lebih dulu menjadi langkah awal pada pekerjaan perbaikan tanah agar mengetahui kondisi umum lokasi yang tersedia, seperti:

1. Kondisi lapisan tanah menjadi fokus data yang dikumpulkan.
2. Perubahan volume tanah akibat pengaruh tekanan menjadi batasan (*compressible*).
3. Ketinggian muka air tanah.

2.11 Analisis Menggunakan Program Numerik

Program numerik ini merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan analisis deformasi dan kestabilan dalam bidang rekayasa geoteknik. Input properti material yang digunakan tergolong sederhana, sehingga mempermudah proses pemodelan elemen hingga ke detail yang cukup tinggi. Hasil analisis ditampilkan dalam bentuk output numerik serta grafik berupa kurva. Perangkat lunak ini terdiri atas empat modul utama yang masing-masing memiliki fungsi spesifik dalam mendukung keseluruhan proses analisis geoteknik, yaitu:

1. *Input*

Pemodelan geometrik dan parameter tanah yang telah diklasifikasikan secara dua dimensi menjadi fungsi utama dari program dalam perangkat lunak tersebut.

2. *Calculation*

Merupakan modul dalam perangkat lunak yang berfungsi untuk menjalankan proses perhitungan setelah data input dimasukkan.

3. *Output*

Merupakan bagian dari perangkat lunak yang menyajikan hasil perhitungan dalam bentuk tabel dan grafik setelah tahap input dan kalkulasi selesai dilakukan.

4. *Curve*

Menampilkan hubungan antar waktu dengan beban terhadap penurunan tanah, beserta diagram tegangan hasil tahap perhitungan sebelumnya di modul *calculation*, disajikan melalui program ini.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Pendahuluan

Penelitian ini memiliki tujuan mengevaluasi efektivitas mitigasi metode *preloading* dalam memperbaiki tanah lunak. Analisis dilakukan melalui program simulasi numerik berbasis metode elemen hingga. Model numerik yang disusun merepresentasikan kondisi tanah lunak di lapangan, yang telah mengalami proses *preloading*.

3.2 Studi Literatur

Dalam penyusunan tugas akhir ini, literatur yang digunakan didasarkan pada hasil penelitian para ahli yang telah menyelidiki tanah lunak pada setiap proyek pembangunan dan perencanaan, serta beberapa literatur lain yang relevan dengan topik penelitian ini. Literatur yang digunakan termasuk jurnal, kertas, diktat, makalah, buku, dan laporan data pemerintah dengan mendapatkan literatur tersebut, dasar materi digunakan untuk penyusunan kajian teori dan juga digunakan sebagai acuan untuk menentukan metode yang akan digunakan dalam analisis mitigasi metode *preloading* pada tanah lunak.

3.3 Pengumpulan Data

Menganalisis permasalahan yang ada, memerlukan data lapangan yang diperoleh secara langsung melalui serangkaian kegiatan penelitian dengan metode yang telah ditetapkan. Tujuannya adalah untuk memahami tanah secara aktual di lokasi penelitian. Metode pengumpulan data dibagi dua jenis, yaitu data sekunder serta data primer.

Data primer merupakan data yang diperoleh langsung dari lokasi penelitian melalui observasi, pengukuran, atau wawancara dengan masyarakat di sekitar area studi. Sementara itu, data sekunder adalah data yang dikumpulkan secara tidak langsung, yakni melalui studi literatur dari hasil penelitian terdahulu, jurnal ilmiah, makalah, maupun dokumen teknis lain yang relevan dan dapat dipertanggung jawabkan secara ilmiah. Dalam Tugas Akhir Analisis Metode *Preloading* Pada Perbaikan Tanah Lunak Menggunakan Program Numerik, menggunakan data

sekunder. Data yang dimanfaatkan berupa bore log hasil investigasi tanah pada proyek, yang selanjutnya dijadikan dasar dalam pemodelan analisis.

3.4 Pengolahan Data

Data *bore log* tanah dari data sekunder yang didapatkan lalu diolah, bertujuan untuk mengidentifikasi lapisan struktur tanah pada lokasi penelitian.

3.5 Permodelan Tanah dengan Program Numerik

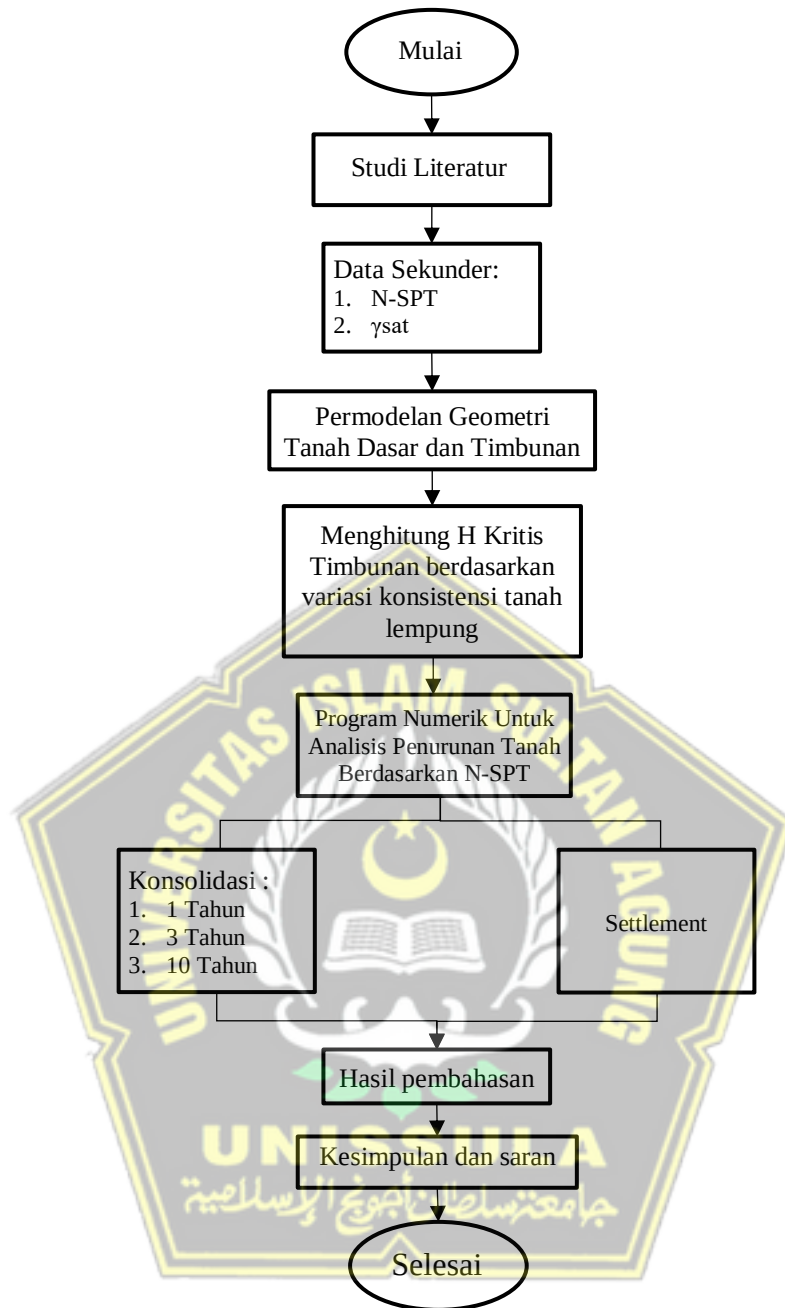
Penggunaan perangkat lunak ini untuk analisis geoteknik serta rekayasa tanah. Aplikasi ini dimaksudkan untuk menangani masalah geoteknik yang rumit seperti analisis stabilitas lereng, deformasi tanah, interaksi tanah dengan struktur, dan proses konsolidasi dan pemadatan tanah.

3.6 Kesimpulan dan Saran

Menyusun simpulan berdasarkan hasil proses analisis dari pengolahan data, disertai sedikit keterangan namun mampu menggambarkan secara jelas hasil akhir dari analisis tersebut.

3.7 Alur Penelitian

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



Gambar 3. 1 Diagram Alir

BAB IV HASIL PEMBAHASAN

4.1 Pendahuluan

Penelitian ini, penulis menghitung tinggi kritis timbunan (H_{Kritis}) untuk menentukan tinggi kritis pada tiga lapisan timbunan. Hasil perhitungan tersebut digunakan sebagai acuan dalam pemodelan numerik untuk menentukan tinggi timbunan yang aman sebelum dilakukan analisis numerik. Berdasarkan hasil analisis tersebut, diperoleh nilai *settlement* pada proses konsolidasi selama 1 tahun, 3 tahun, dan 10 tahun.

4.2 Analisis Tinggi Kritis Timbunan vs N-SPT

Tinggi kritis timbunan (H_{Kritis}) ditentukan berdasarkan nilai N-SPT sebagai parameter kekuatan awal tanah dasar. Nilai N-SPT digunakan untuk perhitungan $\gamma_{saturated}$ dan parameter kekuatan geser (c_u) yang diperlukan dalam perhitungan h_{kritis} . N-SPT memiliki korelasi langsung dengan kondisi kepadatan dan konsistensi tanah.

4.2.1 Gamma Saturated

Penentuan nilai $\gamma_{saturated}$ pada setiap lapisan tanah dilakukan berdasarkan korelasi dengan nilai N-SPT. Semakin besar nilai $\gamma_{saturated}$, semakin besar beban yang bekerja pada tanah lunak, menjadikan tinggi kritis yang diizinkan semakin rendah. Klasifikasi ini digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kepadatan tanah dan memperkirakan berat isi jenuh secara empiris.

Tabel 4. 1 Nilai N-SPT dan Gamma Saturated Berdasarkan Klasifikasi Konsistensi Tanah

No	Konsistensi	N-SPT	Gamma Sat	
			Ton/m ³	kN/m ³
1	Very Soft	1	1,556	15,261
2	Very Soft	2	1,568	15,377
3	Soft	3	1,579	15,493
4	Soft	4	1,591	15,609
5	Medium	5	1,603	15,724
6	Medium	6	1,615	15,840
7	Medium	7	1,627	15,956
8	Medium	8	1,638	16,072

4.2.2 H Kritis Timbunan

Hkritis adalah tinggi timbunan yang menyebabkan tegangan geser tanah mencapai kuat geser maksimumnya, sehingga menjadi batas aman maksimum beban yang dapat diberikan pada tanah lunak. Jika tinggi timbunan lebih kecil dari Hkritis, tanah masih aman dan tidak mengalami keruntuhan, Jika tinggi timbunan mendekati Hkritis, tanah berada pada kondisi marginal (kondisi tanah berada diambang batas kestabilan), Jika tinggi timbunan melebihi Hkritis, akan terjadi *shear failure* (keruntuhan geser) atau timbunan tidak stabil.

Perhitungan dilakukan dengan menggunakan parameter kuat geser (c_u), nilai *safety factor* dan nilai N-SPT serta variasi γ_{timbunan} 16-20 kN/m³ untuk mendapatkan nilai h kritis timbunan. Nilai h kritis yang diperoleh menjadi dasar penentuan batas aman tinggi timbunan sebelum dianalisis dengan program numerik. Hasil perhitungan untuk ketiga lapisan disajikan dalam bentuk tabel pada subbab ini.

a. H Kritis Lapis Pertama

Hasil lengkap perhitungan tinggi kritis timbunan pertama disajikan pada tabel 4.2. Nilai C_0 didapatkan dari c_u tanah dasar.

Tabel 4. 2 Perhitungan H Kritis Timbunan Lapis Satu

no	Konsistensi	N-SPT	$S_u = c'/CO$ (kPa)	SF	Hkritis 1(m)				
					$\gamma_{\text{timb}} = 16 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{\text{timb}} = 17 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{\text{timb}} = 18 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{\text{timb}} = 19 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{\text{timb}} = 20 \text{ kN/m}^3$
1	Very Soft	1	6	1,5	1,250	1,176	1,11	1,053	1,0
2	Very Soft	2	12	1,5	2,500	2,353	2,22	2,105	2,0
3	Soft	3	18	1,5	3,750	3,529	3,33	3,158	3,0
4	Soft	4	24	1,5	5,000	4,706	4,44	4,211	4,0
5	Medium	5	30	1,5	6,250	5,882	5,56	5,263	5,0
6	Medium	6	36	1,5	7,500	7,059	6,67	6,316	6,0
7	Medium	7	42	1,5	8,750	8,235	7,78	7,368	7,0
8	Medium	8	50	1,5	10,417	9,804	9,26	8,772	8,3

b. H Kritis Lapis Kedua

Sebelum menghitung tinggi kritis lapisan kedua, diperlukan perhitungan $\Delta\sigma'$ dan juga kenaikan kuat geser (C_1).

$\Delta\sigma'$ dihitung oleh hasil dari tinggi kritis timbunan pertama dengan variasi γ_{timbunan} dari 16-20 kN/m³. Perhitungan tegangan vertikal serta C_1 menentukan nilai Hkritis untuk lapisan kedua.

Tabel 4. 3 Nilai Delta Tegangan Vertikal ($\Delta\sigma_1$ & $\Delta\sigma_2$)

$\Delta\sigma_1$ & $\Delta\sigma_2$				
16	17	18	19	20
16	17	18	19	20
40	34	36	38	40
56	59,5	54	57	60
80	76,5	72	76	80
96	93,5	99	95	100
120	119	117	114	120
136	136	135	133	140
160	161,5	162	161,5	160

Setelah $\Delta\sigma_1$ dan $\Delta\sigma_2$ dihitung pada tabel 4.3, perhitungan tersebut digunakan untuk mendapatkan nilai C_1 . Nilai C_1 dihitung ditampilkan pada tabel 4.4 dan digunakan sebagai perhitungan pada analisis tinggi kritis lapisan kedua.

Tabel 4. 4 Kenaikan Kuat Geser Undreined (C_1)

C_1 (kPa)				
16	17	18	19	20
9,52	9,74	9,96	10,18	10,4
20,8	19,48	19,92	20,36	20,8
30,32	31,09	29,88	30,54	31,2
41,6	40,83	39,84	40,72	41,6
51,12	50,57	51,78	50,9	52
62,4	62,18	61,74	61,08	62,4
71,92	71,92	71,7	71,26	72,8
85,2	85,53	85,64	85,53	85,2

Langkah selanjutnya menentukan tinggi kritis timbunan lapisan kedua. Perhitungan tinggi kritis untuk mengetahui batas maksimum tinggi timbunan sebelum tanah mengalami potensi keruntuhan. Analisis didapatkan dari variasi γ_{timbunan} 16–20 kN/m³ serta parameter kuat geser C_1 dari tabel 4.4. Hasil perhitungan tinggi kritis lapisan kedua pada tabel 4.5 menjadi acuan keamanan timbunan.

Tabel 4. 5 Perhitungan Tinggi Kritis Timbunan Lapis Kedua

no	Konsistensi	N-SPT	SF	Hkritis 2 (m)				
				$\gamma_{\text{timb}} = 16 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{\text{timb}} = 17 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{\text{timb}} = 18 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{\text{timb}} = 19 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{\text{timb}} = 20 \text{ kN/m}^3$
1	Very Soft	1	1,5	1,983	1,910	1,844	1,786	1,733
2	Very Soft	2	1,5	4,333	3,820	3,689	3,572	3,467
3	Soft	3	1,5	6,317	6,096	5,533	5,358	5,200
4	Soft	4	1,5	8,667	8,006	7,378	7,144	6,933
5	Medium	5	1,5	10,650	9,916	9,589	8,930	8,667
6	Medium	6	1,5	13,000	12,192	11,433	10,716	10,400
7	Medium	7	1,5	14,983	14,102	13,278	12,502	12,133
8	Medium	8	1,5	17,750	16,771	15,859	15,005	14,200

c. H Kritis Lapis Ketiga

Nilai C_2 dihitung ditampilkan pada tabel 4.6 didapatkan dari nilai delta tegangan vertikan dan C_1 . sebagai perhitungan pada analisis tinggi kritis lapisan ketiga.

Tabel 4. 6 Kenaikan Kuat Geser Undreined (C_2)

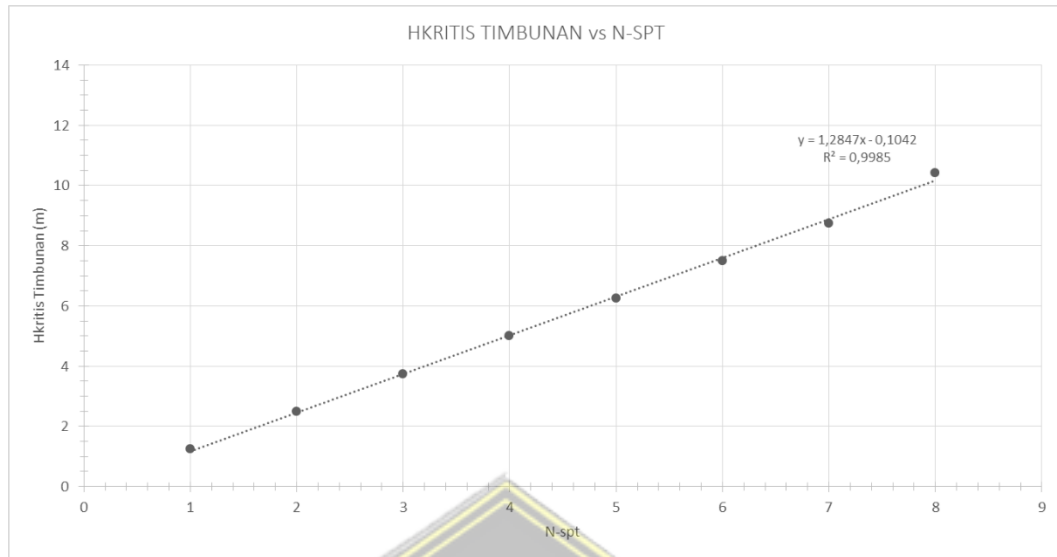
C2 (kPa)				
16	17	18	19	20
13,04	13,48	13,92	14,36	14,8
29,6	26,96	27,84	28,72	29,6
42,64	44,18	41,76	43,08	44,4
59,2	57,66	55,68	57,44	59,2
72,24	71,14	73,56	71,8	74
88,8	88,36	87,48	86,16	88,8
101,84	101,84	101,4	100,52	103,6
120,4	121,06	121,28	121,06	120,4

Perhitungan tinggi kritis lapisan ketiga didapatkan dari nilai C_2 serta nilai *safety factor* bersama dengan variasi γ_{timbunan} 16–20 kN/m³. Hasil tinggi kritis pada lapisan ketiga, sebagaimana ditunjukkan pada tabel 4.7,

Tabel 4. 7 Perhitungan Tinggi Kritis Timbunan Lapis Ketiga

no	Konsistensi	N-SPT	SF	Hkritis 3 (m)				
				$\gamma_{\text{timb}} = 16 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{\text{timb}} = 17 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{\text{timb}} = 18 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{\text{timb}} = 19 \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{\text{timb}} = 20 \text{ kN/m}^3$
1	Very Soft	1	1,5	2,717	2,643	2,578	2,519	2,467
2	Very Soft	2	1,5	6,167	5,286	5,156	5,039	4,933
3	Soft	3	1,5	8,883	8,663	7,733	7,558	7,400
4	Soft	4	1,5	12,333	11,306	10,311	10,077	9,867
5	Medium	5	1,5	15,050	13,949	13,622	12,596	12,333
6	Medium	6	1,5	18,500	17,325	16,200	15,116	14,800
7	Medium	7	1,5	21,217	19,969	18,778	17,635	17,267
8	Medium	8	1,5	25,083	23,737	22,459	21,239	20,067

4.2.3 Grafik H Kritis Timbunan vs N-SPT



Gambar 4. 1 Grafik H Kritis Timbunan vs N-SPT

Dari grafik terlihat peningkatan nilai N-SPT berbanding lurus dengan kenaikan h kritis. Setiap penambahan nilai N-SPT menyebabkan meningkatnya kemampuan tanah untuk menahan tinggi timbunan mencapai kondisi kritis atau maksimal.

Garis regresi linear pada grafik, yaitu $y = 1,2847x - 0,1042$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,9985$, menunjukkan hubungan antara kedua variabel sangat kuat dan linier. Nilai R^2 mendekati 1 mengartikan bahwa variasi h kritis hampir sepenuhnya dapat dijelaskan oleh perubahan nilai N-SPT.

Secara keseluruhan, grafik ini memperlihatkan bahwa semakin padat atau kuat tanah (ditunjukkan oleh nilai N-SPT yang lebih tinggi), maka semakin besar tinggi timbunan yang dapat ditahan oleh tanah tersebut untuk mencapai kondisi kritis.

4.3 Analisis Program Numerik

Pada tahap analisis numerik, pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis Metode Elemen Hingga untuk merepresentasikan respons tanah lunak terhadap beban timbunan. Parameter awal yang digunakan dalam pemodelan diambil dari hasil perhitungan Hkritis 3 lapisan serta N-SPT 1-8, nilai c_u 0-50 kPa, yang dijadikan acuan untuk menentukan tinggi timbunan aman sebelum dilakukan simulasi.

Model geometri disusun dalam bentuk penampang dua dimensi (2D), yang terdiri dari tiga komponen utama: lapisan tanah keras 40 m, tanah lunak 10 m, timbunan 3 lapisan. Kemiringan lereng timbunan bervariasi disesuaikan dengan tinggi timbunan kritis, untuk tinggi timbunan tertentu, digunakan perhitungan kemiringan lereng $>1:5$, terutama pada tinggi timbunan lebih dari 10 m.

Sistem koordinat digunakan untuk mempermudah penentuan arah gaya dan kontrol deformasi, di mana sumbu X merepresentasikan arah horizontal dan sumbu Y menunjukkan arah vertikal.

Setiap lapisan tanah diberikan parameter mekanik sesuai karakteristik hasil korelasi c_u , N SPT dan konsistensi tanah dasar. Kondisi batas (*boundary conditions*) diterapkan dalam bentuk pergerakan lateral terikat pada sisi kiri dan kanan model, serta pergerakan vertikal terikat di dasar model, untuk memastikan tidak terjadi perpindahan bebas yang tidak realistis.

Pembebanan diterapkan secara bertahap (*staged construction*), mengikuti konsep metode preloading, sehingga program numerik dapat mensimulasikan proses konsolidasi akibat beban timbunan. Melalui tahapan tersebut diperoleh nilai penurunan (*settlement*) dan perubahan pola deformasi pada tanah lunak.

Hasil dari pemodelan numerik ini menjadi dasar dalam mengevaluasi efektivitas metode preloading berdasarkan variasi parameter tanah dan karakteristik material timbunan.



Gambar 4. 2 Pemodelan pada Program Numerik

4.4 Hasil Analisis Program Numerik

- a. Gamma Timbunan 16 kN/m³

Tabel 4. 8 Settlement γ_{timb} 16

N-SPT	$\gamma_{timb} = 16 \text{ kN/m}^3$		
	Settlement (cm)		
	1 Tahun	3 Tahun	10 Tahun
1	18,09	21,02	30,04
2	25,37	28,86	38,44
3	42,07	45,86	59,69
4	31,1	33,43	42,84
5	35,12	36,92	44,98
6	38,6	39,92	46,19
7	40,03	46,12	51,25
8	43, 11	49,06	56,71

- b. Gamma Timbunan 17 kN/m³

Tabel 4. 9 Settlement γ_{timb} 17

N-SPT	$\gamma_{timb} = 17 \text{ kN/m}^3$		
	Settlement (cm)		
	1 Tahun	3 Tahun	10 Tahun
1	16,75	19,36	27,36
2	23,52	26,92	32,63
3	37,01	40,57	51,26
4	44,19	49,83	55,36
5	33,66	33,56	43,94
6	36,63	38,04	44,71
7	38,14	39,14	43,94
8	41,23	43,8	48,08

- c. Gamma Timbunan 18 kN/m³

Tabel 4. 10 Settlement γ_{timb} 18

N-SPT	$\gamma_{timb} = 18 \text{ kN/m}^3$		
	Settlement (cm)		
	1 Tahun	3 Tahun	10 Tahun
1	16,75	19,36	27,36
2	23,53	27	32,73
3	28,18	32,07	39,14
4	34,14	37,86	45,37
5	46,19	50,09	57,25
6	31,76	34,74	43,58
7	38	41,88	49,94
8	43,74	45,77	51,12

- d. Gamma Timbunan 19 kN/m³

Tabel 4. 11 Settlement γ_{timb} 19

N-SPT	$\gamma_{\text{timb}} = 19 \text{ kN/m}^3$		
	Settlement (cm)		
	1 Tahun	3 Tahun	10 Tahun
1	17,54	19,08	29,66
2	23,78	26,85	36,51
3	27,23	34,67	41,35
4	43,47	48,34	53,87
5	36,28	42,71	47,42
6	39,18	43,46	50,62
7	44,26	48,21	52,33
8	45,27	49,73	56,47

- e. Gamma Timbunan 20 kN/m³

Tabel 4. 12 Settlement γ_{timb} 20

N-SPT	$\gamma_{\text{timb}} = 20 \text{ kN/m}^3$		
	Settlement (cm)		
	1 Tahun	3 Tahun	10 Tahun
1	16,42	18,96	27,02
2	22,97	26,32	31,85
3	26,23	27,3	33,01
4	29,92	32,54	38,11
5	43,89	49,57	54,93
6	34,18	37,72	43,07
7	36,79	38,39	41,83
8	37,01	40,28	46,24

Berdasarkan variasi γ_{timbunan} 16–20 kN/m³, penurunan tanah menunjukkan peningkatan yang konsisten. Semakin besar gamma timbunan, semakin besar tegangan yang bekerja pada tanah, sehingga settlement meningkat pada seluruh nilai N-SPT dan seluruh periode analisis (1, 3, dan 10 tahun).

Tanah dengan N-SPT rendah selalu menghasilkan settlement terbesar, menunjukkan bahwa tanah lunak sangat sensitif terhadap perubahan beban. Selain itu, seluruh variasi gamma memperlihatkan peningkatan penurunan dari 1 tahun hingga 10 tahun akibat proses konsolidasi yang terus berlangsung.

semakin besar gamma, semakin tinggi N-SPT semakin tinggi c_u , semakin besar settlement yang terjadi.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan parameter nilai N-SPT, kenaikan kuat geser, perhitungan tinggi timbunan kritis, serta pemodelan numerik menggunakan metode *finite element*, maka kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Karakteristik tanah lunak sebagai objek penelitian menunjukkan bahwa tanah dasar berupa lempung memiliki nilai daya dukung yang rendah, tingkat kompresibilitas yang tinggi, dan laju konsolidasi yang lambat. Parameter-parameter geoteknis seperti berat isi tanah (γ_{timbunan}), nilai N-SPT, serta parameter kekuatan geser mengindikasikan bahwa tanah termasuk dalam kategori yang memerlukan upaya perbaikan sebelum digunakan sebagai pondasi timbunan.
2. Hasil analisis tinggi timbunan kritis menunjukkan bahwa kemampuan tanah dasar dalam menahan beban sangat dipengaruhi oleh tingkat konsistensi tanah lempung. Pada nilai N-SPT rendah, tinggi timbunan maksimum yang dapat ditopang tanah dasar tanpa mengalami kegagalan sangat terbatas. Semakin tinggi konsistensi tanah, semakin besar tinggi timbunan yang dapat dipertahankan dalam kondisi aman. Nilai tinggi kritis yang diperoleh menjadi batas awal dalam menentukan tinggi timbunan sebelum dilakukan perbaikan tanah melalui metode preloading.
3. Hasil pemodelan numerik terhadap penurunan tanah setelah dilakukan timbunan, menunjukkan bahwa metode ini efektif dalam meningkatkan stabilitas serta mempercepat proses konsolidasi tanah lunak. Besarnya settlement yang terjadi berada dalam batas yang dapat diterima setelah durasi preloading tercapai, sehingga metode ini terbukti mampu memperbaiki kondisi geoteknis tanah dasar.

5.2 Saran

Saran Serta Masukan dari penelitian tersebut adalah sebagai berikut:

1. Agar mendapatkan hasil yang akurat, data yang digunakan untuk perhitungan sumbernya harus jelas. Usahakan bahwa data yang diperlukan sudah benar dan lengkap sebelum melakukan studi dan analisis proyek konstruksi dengan program numerik. Kesalahan perhitungan numerik akan terjadi karena input data yang tidak cukup. Data yang digunakan harus jelas dari mana sumbernya dan dapat dipercaya.
2. Kesesuaian perancangan dengan prosedur, persyaratan, dan ketentuan yang telah ditetapkan menjadi hal yang wajib dipenuhi saat pelaksanaan perancangan.
3. Kemudahan perhitungan dan proses pengerjaan menjadi tujuan penggunaan pemrograman dalam program numerik.



DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, J. E. (1984). *Physical and Geotechnical Properties of Soils* (2nd ed.). McGraw-Hill, Inc.
- Darwis, H. (2018). *Dasar-dasar Mekanika Tanah*. Pena Indis.
- Das, B. M. (2022). *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage.
<https://books.google.co.id/books?id=JFrBzQEACAAJ>
- Hardiyatmo, H. C. (2002a). *Mekanika Tanah I Jilid III*. Gadjah Mada University Press, 1.
- Hardiyatmo, H. C. (2002b). *Teknik Pondasi 1*. Betta Offset.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall.
- Pratikso. (2017). *Mekanika Tanah 1*. UNISSULA Press.
- Stamatopoulos, C. G., & Kotzias, P. C. (1985). *Settlement of Structures*. Elsevier Applied Science Publishers.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (2nd ed.). John Wiley & Sons.