

**ANALISIS KONSOLIDASI MENGGUNAKAN
PRELOADING DAN *PREFEBRICATED VERTICAL
DRAIN (PVD)* PADA PROYEK PEMBANGUNAN
JALAN TOL PEKANBARU - PADANG**

SKRIPSI

OLEH:

**EGI SURYA PRATAMA
198110003**



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN**

2023

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Document Accepted 2/4/24

Access From (repository.uma.ac.id)2/4/24

**ANALISIS KONSOLIDASI MENGGUNAKAN
PRELOADING DAN PREFEBRICATED VERTICAL DRAIN
(PVD) PADA PROYEK PEMBANGUNAN JALAN TOL
PEKANBARU - PADANG**

SKRIPSI

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar Sarjana di Fakultas Teknik
Universitas Medan Area



Oleh:

**EGI SURYA PRATAMA
198110003**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2023**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

i

Document Accepted 2/4/24

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

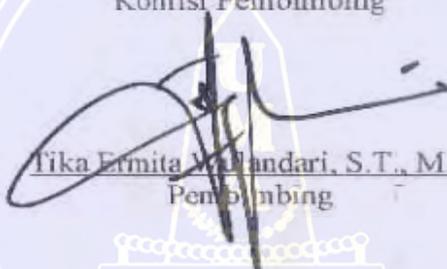
Access From (repository.uma.ac.id)2/4/24

HALAMAN PENGESAHAN

HALAMAN PENGESAHAN

Judul Skripsi : Analisis Konsolidasi menggunakan *Preloading*
dan *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* pada
proyek pembangunan jalan Tol Pekanbaru –
Padang
Nama : Egi Surya Pratama
NPM : 198110003
Fakultas : Teknik

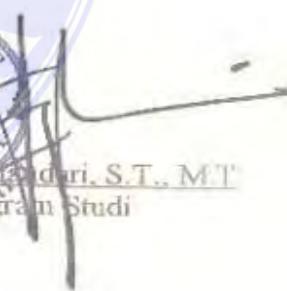
Disetujui Oleh:
Komisi Pembimbing


Tika Ermita Mandari, S.T., M.T.
Pembimbing




Dr. Rahmad Shah, S.Kom., M.Kom
Dekan




Tika Ermita Mandari, S.T., M.T.
Dekan Program Studi

Tanggal Lulus : 03 Agustus 2023

HALAMAN PERNYATAAN

HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana merupakan hasil karya tulis sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah. Saya bersedia menerima saksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan saksi-sanksi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Medan Area, saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama	Egi Surya Pratama
NPM	198110003
Program Studi	Teknik Sipil
Fakultas	Teknik
Jenis karya	Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non Exclusive Royalty Free-Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul **Redesain Struktur Gedung Fakultas Teknik Universitas Medan Area Menggunakan Metode Plat Slab**. Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di Medan
Pada tanggal 03 Agustus 2022
Yang menyatakan


(Egi Surya Pratama)

RIWAYAT HIDUP

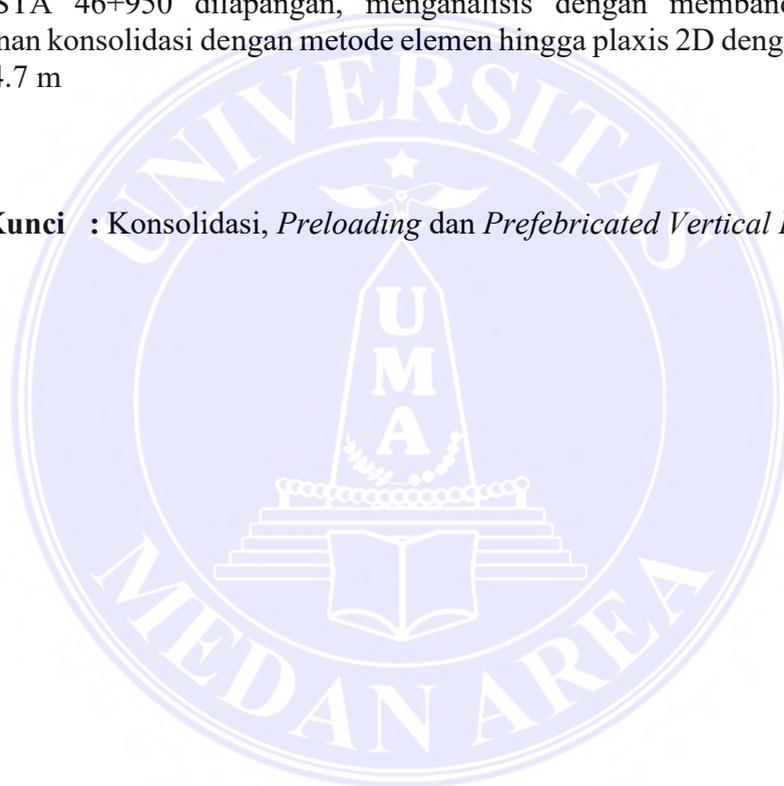
Penulis dilahirkan di Lohsari, Labuhan Batu Selatan Pada tanggal 11 April 2001 dari Ayah Juliedi dan Ibu Erna Ningsi Penulis merupakan putra/i ke 1 dari 3 bersudara. Tahun 2019 Penulis lulus dari SMA Negeri 1 Pangkatan dan pada tahun 2019 terdaftar sebagai Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Medan Area. pada tahun 2022 Penulis melaksanakan Praktek Kerja Lapangan (PKL) di Pembangunan Wing Hotel Haji Achmad Tahir Politeknik Parawisata Negeri Medan.



ABSTRAK

Permasalahan geoteknik merupakan masalah yang penting, salah satu permasalahan geoteknik adalah penurunan dan daya dukung tanah yang merupakan pondasi dari pembangunan jalan tol Pekanbaru – Padang. Setiap jalan tol direncanakan sedemikian rupa sehingga memiliki beban tertentu dan elevasi tertentu yang terkadang tidak dapat dilayani oleh kondisi tanah eksisting karena karakteristik tanah yang lunak seperti dipembangunan jalan tol Pekanbaru – Padang tepatnya di STA 46+950. Perbaikan tanah dengan cara *Preloading* dan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) merupakan salah satu metode yang sering digunakan untuk meningkatkan kekuatan geser tanah lunak. Analisis ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan besar penurunan konsolidasi menggunakan metode elemen hingga dengan pemodelan pada plaxis 2D menggunakan type *mesh* dengan data *settlement plate* STA 46+950 dilapangan, menganalisis dengan membandingkan besar penurunan konsolidasi dengan metode elemen hingga plaxis 2D dengan type *coarse* = 0,864.7 m

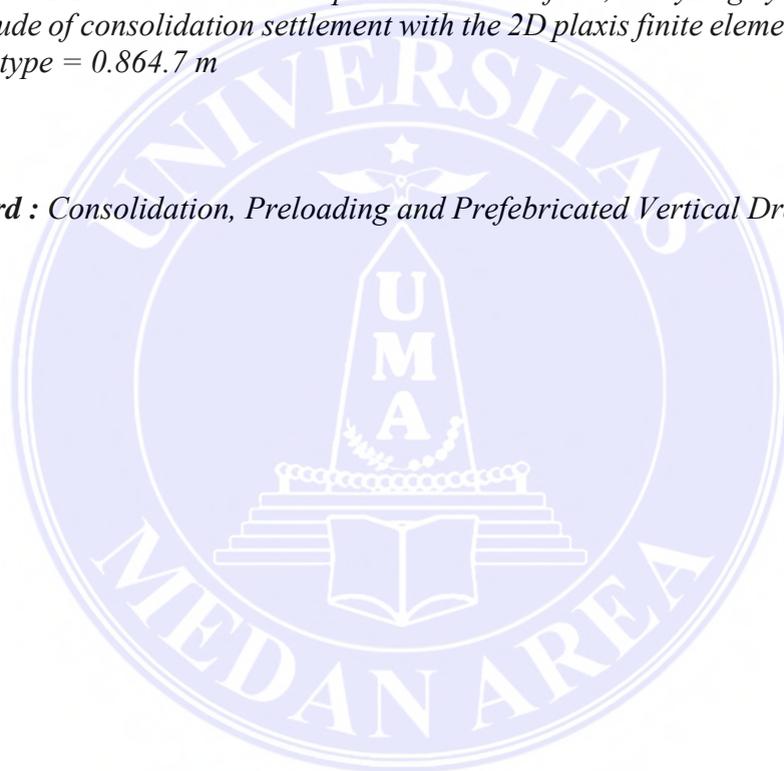
Kata Kunci : Konsolidasi, *Preloading* dan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD)



ABSTRACT

Geotechnical problems are an important problem, one of the geotechnical problems is the decline and bearing capacity of the soil which is the foundation for the construction of the Pekanbaru – Padang toll road. Each toll road is planned in such a way that it has a certain load and a certain elevation which sometimes cannot be served by the existing land conditions due to the soft characteristics of the soil, such as in the construction of the Pekanbaru – Padang toll road, specifically at STA 46+950. Soil improvement by means of Preloading and Prefabricated Vertical Drain (PVD) is one method that is often used to increase the shear strength of soft soil. This analysis aims to analyze and compare the magnitude of consolidation settlement using the finite element method with modeling on 2D plaxis using mesh type with STA 46+950 settlement plate data in the field, analyzing by comparing the magnitude of consolidation settlement with the 2D plaxis finite element method with coarse type = 0.864.7 m

Keyword : Consolidation, Preloading and Prefabricated Vertical Drain (PVD)



KATA PENGHANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan yang maha kuasa atas segala karunia-Nya sehingga Skripsi ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam skripsi ini ialah kombinasi *Preloading* dengan *Prefabricated Fertil Drain* (PVD) dengan judul Analisis Konsolidasi Menggunakan *Preloading* dan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) pada proyek Pembangunan Jalan Tol Pekanbaru – Padang. Terima kasih penulis sampaikan kepada Ibu Tika Ermita Wulandari, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing Sekaligus Ka. Prodi Teknik Sipil yang telah banyak memberikan saran. Disamping itu penghargaan penulis sampaikan kepada yang telah banyak membantu penulis selama penyusunan skripsi. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada Ayah, Ibu, Sultan Mubaraq dan Organisasi Ikatan Mahasiswa Sipil FT-UMA serta seluruh keluarga atas segala doa dan perhatiannya. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu, kritik dan saran sangat penulis harapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi kalangan akademik maupun masyarakat. Akhir kata penulis ucapkan terima kasih.

Penulis

(Egi Surya Pratama)

DAFTAR ISI

COVER	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	v
RIWAYAT HIDUP.....	vi
KATA PENGHANTAR.....	vii
ABSTRAK	viii
<i>ABSTRACT</i>	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Maksud Penelitian.....	3
1.5. Tujuan Penelitian	4
1.6. Manfaat Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Peneliti Terdahulu	5
2.2. Umum.....	6
2.3. Tanah.....	7
2.4. Klasifikasi Tanah	8
2.4.1. Tanah Lempung.....	9
2.4.2. Timbunan pada tanah lempung	11
2.4.3. Sistem Klasifikasi <i>Unified</i> (USCS).....	13

2.4.4.	Tanah Lunak	17
2.4.5.	Karakteristik Tanah Lunak	18
2.4.6.	Tipe Tanah Lunak.....	19
2.5.	Permasalahan Tanah Lunak.....	21
2.6.	Metode Perbaikan Tanah Lunak	24
2.6.1.	Metode <i>Prefabricated Vertical Drain</i>	24
2.6.2.	<i>Pembebanan Awal (Preloading)</i>	30
2.6.3.	Plaxis Sebagai Program Metode Elemen Hingga.....	31
2.7.	Penurunan (<i>Settlement</i>).....	32
2.7.1.	Penurunan Konsolidasi (<i>Consolidation Settlement - Sc</i>). 33	
2.7.2.	Penurunan Segera (<i>Immediate Settlement - Si</i>)	35
2.7.3.	Penurunan Sekunder (<i>Secondary Settlement - Ss</i>)	35
2.8.	Dasar Konsolidasi.....	37
2.8.1.	Uji Konsolidasi Satu Dimensi	38
2.8.2.	Derajat Konsolidasi Arah Vertikal.....	41
2.8.3.	Koefisien Konsolidasi Vertikal	43
2.8.4.	Grafik Angka Pori – Tekan.....	44
2.8.5.	Lempung yang Terkonsolidasi Secara Normal (<i>Normally Consolidated</i>).....	47
2.8.6.	Analisis Perhitungan Penurunan yang Disebabkan oleh Konsolidasi Primer Satu Dimensi.....	49
2.8.7.	Indeks Pemampatan (<i>Compression Index</i>).....	52
BAB III	METODELOGI PENELITIAN	54
3.1.	Lokasi Dan Peta Penelitian	54
3.2.	Tahap Persiapan.....	55
3.3.	Tahap Penelitian.....	55
3.4.	Data Sondir.....	57
3.5.	Data <i>Preloading</i>	58
3.6.	Data <i>Prefabricated Vertical Drain</i>	58
3.7.	Kerangka Berpikir	61
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	62

4.1 Umum	62
4.2 Perhitungan Analisis dengan plaxis 2D	62
4.3 Penurunan dengan efek <i>Smear Zone</i>	69
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	71
5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran	71
DAFTAR PUSTAKA	xiv
LAMPIRAN	xv



DAFTAR TABEL

Tabel 1. Berat jenis (G_s) berbagai jenis tanah	18
Tabel 2. Klasifikasi tanah berdasarkan tekstur tanah.....	19
Tabel 3. Hubungan antara konsistensi dan kuat tekan bebas (q_u)	20
Tabel 4. Indikator kuat geser tak terdrainase tanah lempung lunak	20
Tabel 5. Klasifikasi tanah gambut berdasarkan kadar serat	20
Tabel 6. Variasi faktor waktu terhadap derajat konsolidasi	42
Tabel 7. Korelasi Empiris Penentuan Nilai Indeks Kompresi, C_c	56
Tabel 8. Pemampatan dan Pemuaian Tanah Asli	57



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Klpasifikasi Berdasarkan Tekstur oleh Departemen Pertanian Amerika Serikat (USDA)	10
Gambar 2. Nilai – nilai Batas Atterberg untuk Subkelompok Tanah	12
Gambar 3. Klasifikasi Tanah USCS	14
Gambar 4. Grafik Plasyisitas untuk Klasifikasi USCS	15
Gambar 5. Grafik Plastisitas	15
Gambar 6. Pemberian aliran air pori pada <i>PVD</i>	25
Gambar 7. <i>Prefabricated Vertical Drain</i>	25
Gambar 8. <i>Prefabricated Vertical Drain</i> Tipe Persegi	26
Gambar 9. Pemasangan Roll <i>PVD</i>	26
Gambar 10. Pemberian <i>Preloading</i> Secara Bertahap	30
Gambar 11. Pemberian <i>Preloading</i> Secara <i>Counter Weight</i>	30
Gambar 12. Tahap Penurunan Tanah	36
Gambar 13. Konsolidometer	39
Gambar 14. Grafik Waktu – pemanfaatan selama Konsolidasi	40
Gambar 15 ggrafik variasi derajat konsolidasi rata-rata terhadap faktor waktu	43
Gambar 16 perubahan tinggi contoh tanah pada uji konsolidasi	45
Gambar 17 Bentuk grafik e versus $\log p$	46
Gambar 18 variasi angka pori terhadap tekanan	48
Gambar 19 grafik e versus $\log p$ menunjukkan keadaan pembebanan	49
Gambar 20 karakteristik konsolidasi lempung terkonsolidasi secara normal.....	50
Gambar 21 karakteristik konsolidasi lempung yang terkonsolidasi	51
Gambar 22 karakteristik konsolidasi lempung yang sensitif	51
Gambar 23. Lokasi Pekerjaan	58
Gambar 24. Topografi Lokasi Proyek Jalan Tol	58
Gambar 25 data sondir 46+950	61
Gambar 26 detail gambar rencana <i>preloading</i> 46+950	62



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur sering kali dibangun diatas tanah yang lunak yang dapat menyebabkan kegagalan pada struktur bila tidak dilakukan perbaikan. Seperti pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Pekanbaru – Padang dimana berdasarkan hasil penyelidikan tanah, kondisi tanah pada proyek tersebut adalah berlempung lunak. Pemberian beban di atas suatu permukaan tanah dapat menyebabkan lapisan tanah di bawahnya mengalami pemampatan. Pemampatan tersebut disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori, dan sebab – sebab lain dimana faktor – faktor tersebut mempunyai hubungan dengan keadaan tanah yang bersangkutan.

Lokasi yang ditinjau pada tugas akhir ini adalah Proyek Pembangunan Jalan Tol Pekanbaru – Padang pada STA 46+950 berdasarkan hasil penyelidikan tanah, kondisi tanah pada proyek tersebut dan menggunakan alat *boring log* adalah tanah berlempung lunak dan mengandung banyak air. Adapun kondisi tanah yang demikian merupakan kondisi tanah tidak baik jika digunakan sebagai tanah dasar untuk membangun sebuah konstruksi diatasnya, karena penurunan yang akan terjadi cukup besar dan waktu yang dibutuhkan untuk mendisipasi air pori juga sangat lama.

Analisis perhitungan kecepatan penurunan dan waktu pada konsolidasi satu dimensi dilakukan dengan teori klasik Terzaghi (1925). Perluasan perhitungan dan teori konsolidasi Terzaghi yang sederhana digunakan pada

pembebanan *time dependent* yang mempengaruhi hubungan tegangan dan regangan *non linear*, sistem lapisan dan *large strain* dimana penyelesaiannya antara lain menggunakan analisa numerik disamping solusi analitik. Kecepatan penurunan konsolidasi satu dimensi dapat diprediksi secara teoritis. Analisa harus memenuhi aturan kesetimbangan, hukum aliran Darcy dan kompatibilitas kerangka tanah. Proses konsolidasi pada lempung jenuh dipengaruhi oleh perubahan permeabilitas dan kompresibilitas. Factor ini diabaikan dalam teori Terzaghi sehingga persamaannya dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan *diferensial linier*. Dari uraian diatas maka untuk mengatasi masalah tanah lunak pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Pekanbaru – Padang digunakan dengan ”Kombinasi Metode *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* dan *Preloading*”

1.2 Rumusan Masalah

Adapun Bahasan masalah yang dibahas dalam penelitian ini meliputi:

1. Berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk konsolidasi tanah lunak menggunakan kombinasi *Preloading* dan *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*
2. Bagaimana Menganalisis Perhitungan besar dan lamanya waktu Konsolidasi akibat *Preloading* yang dikombinasikan dengan *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* dengan Perhitungan modelling pada plaxis 2D

1.3 Batasan Masalah

Untuk mendapatkan pembahasan yang lebih terfokus dalam tugas akhir ini dan mempermudah dalam menganalisis, maka dibuat batasan – batasan masalah antara lain sebagai berikut :

1. Analisis besar penurunan dan waktu konsolidasi pada tugas akhir ini dilakukan pada STA 46+950 pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Pekanbaru – Padang.
2. Parameter – parameter tanah yang digunakan dalam menganalisa konsolidasi yang terjadi didapatkan dari PT. Wijaya Karya, berdasarkan hasil test lapangan dengan menggunakan alat uji boring untuk mengetahui elevasi muka air, jenis – jenis tanah, kedalaman tanah keras dan juga pengujian laboratorium untuk mengetahui berat jenis tanah, angka pori, dan parameter – parameter tanah lainnya.
3. Penurunan yang ditinjau hanya penurunan konsolidasi.

1.4 Maksud Penelitian

Adapun maksud dari penelitian ini adalah untuk menganalisa besarnya kecepatan penurunan konsolidasi dan masalah stabilitas timbunan di atas tanah lunak yang terjadi pada dasar tanah di Proyek Pembangunan Jalan Tol Pekanbaru-Padang.

1.5 Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui analisis besarnya besarnya penurunan tanah menggunakan kombinasi *Preloading* dan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD)
2. Untuk Mengetahui Besar dan Lamanya waktu Konsolidasi dengan Metode *Preloading* dan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) Menggunakan Plaxis

1.6 Manfaat Penelitian

1. Bagi penulis, ini berfungsi sebagai bahan untuk penulisan tugas akhir. Hal tersebut merupakan prasyarat untuk menyelesaikan pendidikan mata kuliah Teknik Sipil di Universitas Medan Area, sehingga mampu menerapkan ilmu yang didapat semasa pendidikan perkuliahan dan pengetahuan baru analisis konsolidasi khususnya pada tanah lunak. Dan dapat menambah pengetahuan lapangan saya sebagai penulis jika melakukan hal serupa di masa mendatang.
2. Untuk mahasiswa digunakan menjadi informasi tambahan untuk penelitian kedepannya tentang analisis konsolidasi pada tanah lunak dengan Kombinasi *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dan *Preloading*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Peneliti Terdahulu

Peneliti terdahulu adalah kajian penelitian yang pernah dilakukan oleh peneliti sebelumnya yang dapat diambil dari berbagai sumber ilmiah seperti skripsi, tesis, disertasi atau jurnal penelitian. Berikut adalah penelitian terdahulu yang menjadi acuan peneliti dalam melakukan penelitian :

1. Chandra Adinegoro (Volume 2, Nomor 2, Tahun 2021) dari Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Politeknik Negeri Malang, tentang “Metode Pelaksanaan Perbaikan Tanah Menggunakan Metode *Preloading* Dan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) Pada Terminal Internasional Kijing Pontinak”. Dalam penelitian tersebut mengkaji tentang perbaikan tanah dengan Metode *Preloading* Dan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) Pada Terminal Internasional Kijing Pontinak. Hasil penelitiannya adalah untuk mengetahui penurunan dan daya dukung tanah serta pelaksanaan perbaikan tanah yang akan dilakukan. Metode yang digunakan adalah Metode *Preloading* Dan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dengan teknik pengumpulan data observasi, wawancara dan dokumentasi dan menggunakan teori – teori dan jurnal ilmiah.
2. Bagas Wahyu Adhi (Volume 4, No 1, Tahun 2022) Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam batik Surakarta, tentang “Analisa Stabilitas Timbunan di Daerah Rawa Menggunakan Penanganan *Limestone* dengan Software *Plaxis*”. Dalam penelitian tersebut mengkaji tentang Analisa Stabilitas Timbunan di Daerah Rawa Menggunakan Penanganan

Limestone dengan Software *Plaxis*. Hasil penelitiannya adalah untuk mengetahui stabilitas timbunan di daerah rawa dengan yang dilakukan analisa di daerah tersebut. Metode yang digunakan adalah menggunakan Penanganan *Limestone* dengan Software *Plaxis* dengan teknik pengumpulan data observasi, wawancara dan dokumentasi dan menggunakan teori – teori dan jurnal ilmiah.

2.2 Umum

Semua beban yang terjadi di atas tanah dasar maupun itu beban dari timbunan tanah itu sendiri dan beban struktur akan disalurkan ke tanah dasar. Sehingga tanah dasar harus mampu menahan seluruh beban yang terjadi. Di beberapa kasus harus dilakukan stabilitas tanah dasar agar dapat memikul beban yang terjadi tanpa mengalami keruntuhan. Stabilitas tanah adalah usaha untuk merubah atau memperbaiki sifat – sifat teknis tanah agar memenuhi teknis tertentu (Hardiyatmo, 1992).

Tanah lempung merupakan tanah yang dapat mengalami penyusutan (*Shrinkage*) dan pengambangan (*Swelling*). Hal ini sangat berpengaruh terhadap kekuatan tanah menahan beban konstruksi. Tanah lempung juga terdiri dari atas mineral – mineral berbutir halus yang bersifat plastis pada kandungan air tertentu dan mengeras ketika kondisi kering. Tanah lempung juga memiliki sifat pemampatan yang besar pada waktu yang sangat lama, dan hal ini menyebabkan kehancuran konstruksi ketika masa layan.

2.3 Tanah

Tanah atau *soil* adalah lapisan teratas dari bumi, keberadaan tanah sangat penting bagi kehidupan manusia yang berada di atasnya. Tanah merupakan bentukan dari bebatuan yang mengalami pelapukan. Proses pelapukan ini terjadi dalam jangka waktu yang relative lama bahkan hingga ratusan tahun.

Tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral – mineral padat yang tidak tersimentasi (terikat secara kimia) satu sama lain dari bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat – zat cair dan gas yang mengisi ruang ruang kosong diantara partikel partikel padat tersebut (Das, 1995).

Tanah berguna sebagai tempat untuk meletakkan bangunan pada berbagai macam pekerjaan teknik sipil, disamping itu tanah berfungsi juga sebagai pendukung pondasi dari bangunan. Hampir semua proyek konstruksi sipil didirikan di atas tanah, seperti gedung – gedung bertingkat, jalan raya, jembatan, bandar udara, dermaga, pelabuhan dan lain sebagainya di bangun di atas tanah.

2.4 Klarifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah adalah suatu sistem pengaturan beberapa jenis tanah yang berbeda – beda namun memiliki sifat yang serupa yang dimasukkan kedalam kelompok – kelompok dan sub – sub kelompok berdasarkan pemakaiannya. Sistem klasifikasi memberikan suatu Bahasa yang mudah untuk menjelaskan secara sifat – sifat umum tanah yang bervariasi tanpa penjelasan yang terperinci. Dalam arti umum klasifikasi berdasarkan tekstur adalah keadaan permukaan tanah yang

bersangkutan dipengaruhi oleh ukuran tiap – tiap butir yang ada didalam tanah. Hasil dari penyelidikan sifat – sifat tanah dapat digunakan untuk mengevaluasi masalah – masalah tertentu seperti :

1. Penentuan penurunan bangunan yaitu dengan menentukan kompresibilitastanah
2. Penentuan kecepatan air yang mengalir lewat benda uji guna menghitung koefisien permeabilitas
3. Untuk mengevaluasi stabilitas tanah yang miring dengan menentukan kuat geser tanah.

Sistem klasifikasi tanah merupakan suatu sistem penggolongan yang sistematis dari jenis – jenis tanah yang mempunyai sifat – sifat yang sama ke dalam kelompok – kelompok dan sub kelompok berdasarkan pemakaiannya.

Tanah dibagi menjadi 4 bagian kelompok yaitu :

1. Kerikil (*gravel*)
2. Pasir (*sand*)
3. Lanau (*silt*)
4. Lempung (*clay*)

Dalam sistem klasifikasi tanah berdasarkan tekstur, tanah dibagi atas dasar komponen utama yang terkandung didalamnya. Misalnya lempung berpasir (*sand clay*), lempung berlanau (*silty clay*), dan seterusnya.

2.4.1 Tanah Lempung

Tanah liat atau lempung akan menjadi sangat keras dalam keadaan kering, dan tak mudah terkelupas hanya dengan jari tangan (Terzhagi, 1987). Tanah liat atau lempung mempunyai sifat permeabilitas sangat rendah dan bersifat plastis pada kadar air sedang. Lempung atau tanah liat adalah suatu silika hidro alumunium yang kompleks. Mineral lempung Mempunyai daya Tarik menarik individual yang mampu menyerap 100 kali volume partikelnya, ada atau tidaknya air (selama pengeringan) dapat menghasilkan perubahan volume dan kekuatan yang besar.

1. Sifat Tanah Lempung

Sifat-sifat yang dimiliki tanah lempung adalah sebagai berikut (Hardiyatmo, 1999) :

- a. Ukuran butir halus, yaitu kurang dari 0,002 mm
- b. Permeabilitas rendah
- c. Kenaikan air kapiler tinggi
- d. Bersifat sangat kohesif
- e. Proses konsolidasi lambat.

Sifat fisik dan keteknikan tanah lebih ditentukan oleh jenis dari klasifikasi tanah itu sendiri. Pengklasifikasian tanah dimaksudkan untuk mempermudah pengelompokkan berbagai jenis tanah kedalam kelompok tanah yang sesuai dengan sifat teknis karakteristiknya. Pengelompokkan tanah dalam 3 kelompok, tanah berbutir kasar, tanah berbutir halus, dan tanah organik.

Berdasarkan USCS tanah berbutir kasar adalah yang mempunyai presentase lolos saringan 200 < 50%, dan tanah berbutir halus (lanau/lempung) jika lebih dari 50% saringan nomor 200, Tanah ini dibagi dalam 2 kelompok yaitu kelompok kerikil dan tanah kerikil serta pasir dan tanah kepasiran . Tanah berbutir halus dibagi dalam (M), Lempung (C) yang didasarkan pada batas cair dan indeks plastisitasnya. Tanah organik juga termasuk dalam kelompok tanah berbutir halus.

Konsistensi dari tanah lempung dan tanah kohesif lainnya sangat dipengaruhi oleh kadar air. Indeks plastisitas dan batas cair dapat digunakan untuk menentukan karakteristik pengembangan. Karakteristik pengembangan hanya dapat diperkirakan dengan menggunakan indeks plastisitas, (Holtz, W.G. dan Gibbs 1956).

Tanah butiran halus khususnya tanah lempung akan banyak dipengaruhi oleh air. Sifat pengembangan tanah lempung yang dipadatkan akan lebih besar pada lempung yang akan dipadatkan pada kering optimum dari pada yang dipadatkan basah optimum. Lempung yang dipadatkan pada kering optimum relatif kekurangan air, oleh karena itu lempung ini mempunyai kecenderungan yang lebih besar untuk meresap air sebagai hasilnya adalah sifat mudah mengembang (Hardiyatmo, 1999)

2.4.2 Timbunan Pada Tanah Lempung Lunak

Penambahan beban berupa tanah timbunan pada suatu permukaan tanah lempung dapat menyebabkan lapisan tanah dibawahnya mengalami pemampatan. Pemampatan tersebut disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara didalam pori, dan lain lainfaktor – factor tersebut mempunyai hubungan dengan keadaan tanah

Timbunan pada lapisan tanah lempung berfungsi sebagai preloading yang mempercepat proses konsolidasi. Dengan terdisipasinya air pori pada lapisan tanah tersebut maka akan meningkatkan kuat geser tanah dan kohesi tanah, sehingga lapisan tanah tersebut dapat memikul beban yang besar dan mempengaruhi tinggi timbunan yang akan dipergunakan. Penentuan tinggi timbunan sesuai dengan nilai penurunan agar tanah timbunan tidak dibuang sia – sia dan dapat dijadikan pondasi dari suatu konstruksi. Tinggi timbunan beban *preloading* ini dihitung berdasarkan dari dukung tanah lempung mula -mula, kemudian dibandingkan dengan tinggi timbunan atau beban yang mampu diterima oleh tanah dasar yaitu H kritis (H_{cr}).

Daya dukung tanah lempung dalam perencanaan beban *Preloading* dihitung sebagai berikut :

$$Q_u = 2.C_u \dots\dots\dots (2.1)$$

(nilai C_u diambil dari kohesi tanah dasar dari tipe jenis material tanah yang dipakai untuk timbunan)

$$Q_u = r_{\text{timbunan}} \cdot H_{cr}$$

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{SF}$$

$$\text{Timbunan. } H_{cr} = \frac{Q_u}{SF}$$

Maka

$$H_{cr} = \frac{2.C_u}{\text{timbunan}} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

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

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

H_{cr} = Tinggi timbunan kritis (m)

γ timbunan = Berat Volume tanah timbunan (t/m^3)

Kombinasi antara metode preloading dengan instalasi PVD merupakan salah satu metode untuk mempercepat proses konsolidasi. Kombinasi pada metode ini dilakukan dengan cara memberikan beban awal yaitu berupa timbunan (*preloading*) pada tanah lempung yang telah dipasang PVD.

Preloading efektif bila beban lebih besar dari tegangan prekonsolidasi tanah. Isi preloading lebih cocok jika bahan pengisi tidak mahal dan siap tersedia dan/ atau bagian struktur permanen (seperti tanggul). Preloading vakum lebih cocok untuk area dimana tanah terlalu lemah untuk mendukung peralatan konstruksi dan mengisi, dan bahan pengisi mahal dan tidak tersedia.

2.4.3 Sistem Klasifikasi *Unified* (USCS)

Sistem klasifikasi yang umum digunakan di dunia adalah *Unified Soil Classification System* (USCS) atau sistem klasifikasi kesatuan. Sistem ini dikembangkan oleh Casagrande untuk digunakan dalam penilaian tanah dalam pembangunan lapangan terbang. Menurut Das, Braja M. (1993) menjelaskan sistem klasifikasi USCS mengklasifikasikan tanah ke dalam dua kategori utama yaitu:

1. Tanah berbutir kasar (*coarse-grained soil*), yaitu tanah kerikil dan pasir yang kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos saringan No.200. Simbol untuk kelompok ini adalah G (*gravel*) untuk tanah berkerikil dan S (*sand*) untuk tanah berpasir. Selain itu juga dinyatakan gradasi tanah dengan simbol W (*well*) untuk tanah bergradasi baik dan P (*poor*) untuk tanah bergradasi buruk.
2. Tanah berbutir halus (*fine-grained soil*), yaitu tanah yang lebih dari 50% berat contoh tanahnya lolos dari saringan No.200. Simbol kelompok ini dimulai dengan huruf awal M untuk lanau (*silt*) anorganik, C (*clay*) untuk lempung anorganik dan O untuk lanau organik. Simbol Pt (*peat*) digunakan untuk gambut (*peat*), dan tanah dengan kandungan organik tinggi. Plastisitas dinyatakan dengan L (*low*) untuk plastisitas rendah dan H (*high*) untuk plastisitas tinggi.

Tanah berbutir kasar ditandai dengan simbol kelompok seperti GW, GP, GM, GC, SW, SP, dan SC. Untuk klasifikasi yang benar, faktor-faktor berikut ini perlu diperhatikan:

1. Persentase butiran yang lolos ayakan No. 200 (fraksi halus).
2. Persentase fraksi kasar yang lolos ayakan No. 40.
3. Koefisien keseragaman (*uniformity coefficient*, C_u) dan koefisien

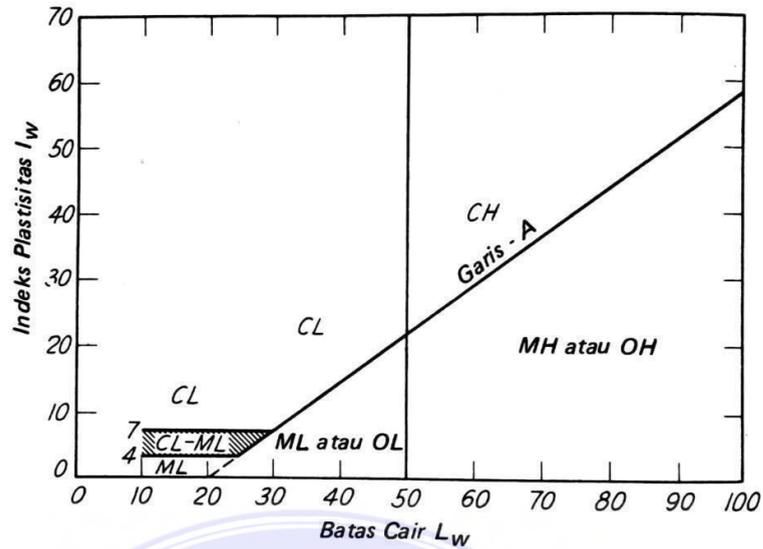
gradasi (*graduation coefficient*, C_c) untuk tanah di mana 0-12% lolos ayakan No. 200.

Batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) bagian tanah yang lolos ayakan No. 40 (untuk tanah di mana 5% atau lebih lolos ayakan No. 200) (Gambar 3) (Gambar 4) (Gambar 5)

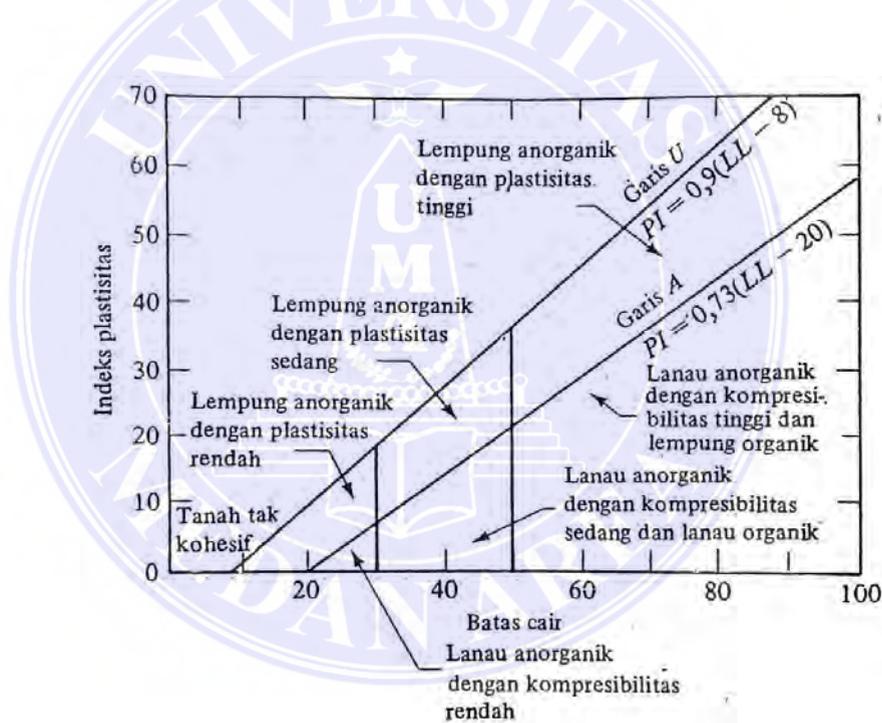


Divisi Utama	Simbol	Nama Umum	Kriteria Klasifikasi		
Tanah berbutir kasar $\geq 50\%$ butiran tertahan saringan No. 200	Kerikil $50\% \geq$ fraksi kasar tertahan saringan No. 4	GW	Kerikil bergradasi-baik dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus		
		GP	Kerikil bergradasi-buruk dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus		
		GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau		
		GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung		
		Pasir $\geq 50\%$ fraksi kasar lolos saringan No. 4	Pasir bersih (hanya pasir)	SW	Pasir bergradasi-baik, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus
				SP	Pasir bergradasi-buruk, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus
	Pasir dengan butiran halus			SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau
			SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung	
			Klasifikasi berdasarkan presentase butiran halus : Kurang dari 5% lolos saringan no.200: GM, GP, SW, SP. Lebih dari 12% lolos saringan no.200 : GM, GC, SM, SC. 5% - 12% lolos saringan No.200 : Batasan klasifikasi yang mempunyai simbol double		$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $Cc = \frac{(D_{20})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI < 4$ Bila batas <i>Atterberg</i> berada didaerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai double simbol $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ $Cc = \frac{(D_{20})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI < 4$ Bila batas <i>Atterberg</i> berada didaerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai double simbol Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI > 7$
	Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos ayakan No. 200		Lanau dan lempung batas cair $\leq 50\%$	ML	Lanau anorganik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung
		CL		Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung "kurus" (<i>lean clays</i>)	
		OL		Lanau-organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah	
Lanau dan lempung batas cair $\geq 50\%$		MH	Lanau anorganik atau pasir halus diatomac, atau lanau diatomac, lanau yang elastis		
		CH	Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung "gemuk" (<i>fat clays</i>)		
		OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai dengan tinggi		
		Diagram Plastisitas: Untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang terkandung dalam tanah berbutir halus dan kasar. Batas <i>Atterberg</i> yang termasuk dalam daerah yang di arsir berarti batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol.			
Tanah-tanah dengan kandungan organik sangat tinggi		PT	<i>Peat</i> (gambut), <i>muck</i> , dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi	Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488	

Gambar 3 Klasifikasi Tanah USCS (Hardiyanto, 2002)



Gambar 4. Grafik Plasyisitas untuk Klasifikasi USCS (Karl Terzaghi, 1993)



Gambar 5. Grafik Plastisitas (Braja M. Das, 1993)

Seperti yang terlihat pada gambar 4, bila mengabaikan garis U, lanau adalah tanah yang mempunyai batas cair dan indeks plastisitas terletak dibawah garis A dan lempung berada diatas garis A. Lanau, lempung dan tanah organis dibagi lagi menjadi batas cair yang rendah (L)

dan tinggi (H). Garis pembagi antara batas cair yang rendah dan tinggi ditentukan pada angka 50 seperti:

1. Kelompok ML dan MH adalah tanah yang diklasifikasikan sebagai lanau pasir, lanau lempung atau lanau organis dengan plastisitas relatif rendah.
2. Kelompok CH dan CL terutama adalah lempung anorganik. Kelompok CH adalah lempung dengan plastisitas sedang sampai tinggi mencakup lempung gemuk. Lempung dengan plastisitas rendah yang dikalsifikasikan CL biasanya adalah lempung kurus, lempung kepasiran atau lempung lanau.
3. Kelompok OL dan OH adalah tanah yang ditunjukkan sifat-sifatnya dengan adanya bahan organik. Lempung dan lanau organik termasuk dalam kelompok ini dan mereka mempunyai plastisitas pada kelompok ML dan MH.

3.1 Tanah Lunak

Tanah lunak mengandung mineral –mineral lempung dan mengandung kadar air yang tinggi. Di Indonesia tanah jenis ini terdapat pada areal lebih dari 20 juta hektar, lebih dari 10% dari daratan Indonesia. Umumnya lapisan tanah yang disebut lapisan yang lunak adalah lempung (*clay*) atau lanau (*silt*) yang mempunyai harga pengujian penetrasi standar (*standard penetration test*) N yang lebih kecil dari 4 atau tanah organis seperti gambut yang mempunyai kadar air alamiah yang sangat tinggi. Demikian pula lapisan tanah berpasir yang dalam keadaan lepas mempunyai harga N kurang dari 10

diklasifikasi sebagai lapisan yang lunak. Tanah lunak merupakan tanah kohesif yang terdiri dari sebagian besar butir – butir yang sangat kecil seperti lempung ataulanau.

Sifat – sifat yang dimiliki tanah lempung (Hardiyatmo, 2006) adalah sebagai berikut:

- a. Ukuran butir halus, kurang dari 0,002 mm
- b. Permeabilitas rendah
- c. Kenaikan air kapiler tinggi
- d. Bersifat sangat kohesif
- e. Kadar kembang susut yang tinggi
- f. Proses konsolidasi lambat

Kebanyakan jenis tanah terdiri dari banyak campuran atau lebih dari satu macam ukuran partikel. Tanah lempung belum tentu terdiri dari partikel lempung saja, akan tetapi dapat tercampur butir – butiran ukuran lanau maupun pasir dan mungkin juga terdapat campuran bahan organik.

3.1.1 Karakteristik Tanah Lunak

Karakteristik dari tanah lunak yaitu memiliki gaya geser yang kecil, kemampuan besar, koefisien permeabilitas yang kecil dan mempunyai daya dukung rendah. Jika diberikan pembebanan (konstruksi) pada tanah tersebut yang melampaui daya dukung kritis, maka akan terjadi kerusakan tanah pondasi. Meskipun intensitas beban itu kurang dari daya dukung kritis, dalam jangka waktu yang lama besarnya penurunan akan meningkat yang akhirnya akan mengakibatkan berbagai kerusakan pada

bangunan konstruksi. Sifat – sifat seperti ini menjadikan tanah lunak sebagai tanah yang kurang menguntungkan untuk dijadikan sebagai lapisan tanah dasar.

Berdasarkan hasil uji lapangan, tanah lunak secara fisik dapat diremas dengan mudah menggunakan tangan (Braja M. Das,1995) menyatakan nilai hasil pengujian dilapangan dan laboratorium, akan menunjukkan bahwa tanah tersebut lunak apabila: koefisien rembesan (k) sangat rendah ≤ 0.0000001 cm/dtk, batas cair (LL) $\geq 50\%$, angka pori (e) antara 2,5 – 3,2, kadar air dalam keadaan jenuh antara 90% - 120% dan beratspesifik (Gs) berkisar antara 2,6 – 2,9. Nilai berat jenis untuk berbagai jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 1

Tabel 1 Berat jenis (Gs) berbagai jenis tanah (Darwis 2018)

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

3.1.2 Tipe Tanah Lunak

Sistem USDA membagi tanah menjadi tiga kelompok utama: tanah berbutir kasar, tanah berbutir halus, dan tanah dengan kandungan organik yang tinggi. Dalam dasar – dasar Mekanika Tanah tentang sistem

Klasifikasi Tanah Lunak, tanah berbutir halus dibagi lagi menjadi tiga kelompok berdasarkan kandungan organiknya, terlihat dalam Tabel 2

Tabel 2 Klasifikasi tanah berdasarkan tekstur tanah(Darwis 2018)

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

Tipe – tipe dari tanah lunak itu sendiri dibagi menjadi 3 jenis yaitu:

1) Tanah Organik

Tanah organik (O) adalah tanah yang dikelompokkan sedemikian berdasarkan kandungan organiknya yaitu 25% hingga 75%. Tanah organik ini dikelompokkan menjadi kelompok OL dan OH berdasarkan tingkat plastisitasnya, dimana L = *low plasticity* (plastisitas rendah) ($LL < 50$) dan H = *high plasticity* (plastisitas tinggi) ($LL > 50$).

2) Tanah Inorganik Berbutir Halus

Klasifikasi tanah inorganik dan tanah organik yang berbutir halus mengikuti sistem yang digunakan dalam sistem USDA untuk tanah berbutirhalus dibagi dalam sub kelompok sebagai lanau (M) dan lempung (C). Lanau adalah tanah berbutir halus memiliki nilai Batas Cair dan Indeks Plastisitas yang jika digambarkan ke dalam grafik akan terletak dibawah garis – A, sementara untuk lempung kan berada di atas garis tersebut. Hubungan antara konsistensi dan kuat tekan bebas (q_u) untuk tanah lempung dapat dilihat dalam Tabel 3

Tabel 2.3. Hubungan antara konsistensi dan kuat tekan bebas (q_u)

Tabel 3 Hubungan antara konsistensi dan kuat tekan bebas (q_u)(Hardiyanto,2002)

Konsistensi	Q_u (kN/m^2)
Sangat lunak	< 25
Lunak	25 – 50
Sedang	50 – 100
Kaku	100 – 200
Sangat Kaku	200 – 400
Keras	> 400

Tanah jenis ini mengandung mineral lempung dan mengandung kadar air yang tinggi, yang menyebabkan kuat geser yang rendah, dalam rekayasa geoteknik istilah „lunak“ dan „sangat lunak“ khusus didefinisikan untuk lempung dengan kuat geser seperti ditunjukkan pada tabel 3. Prosedur identifikasi lapangan memberikan beberapa petunjuk mengenai indikasi dari kekuatan lempung tersebut seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4

Tabel 4 Indikator kuat geser tak terdrainase tanah lempung lunak (Geoteknik 1, 2002)

Konsistensi	Indikator Lapangan
Lunak	Bisa dibentuk dengan mudah menggunakan tangan
Sangat Lunak	Keluar di antara jari tangan jika diremas dalam kepalantangan

3) Halus

Gambut (PF) adalah jenis tanah yang memiliki kadar organik lebih dari 75%. Berdasarkan kandungan seratnya, gambut dikelompokkan kembali menjadi dua kelompok, yang ditunjukkan pada Tabel 5

Tabel 5 Klasifikasi tanah gambut berdasarkan kadar serat (Geoteknik 1,2002)

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

3.2 Permasalahan Tanah Lunak

Dalam merencanakan suatu bangunan yang berhubungan dengan keadaan tanah sebagai material dimana bangunan tersebut akan diletakkan, maka perlu diperhatikan daya dukung tanah terhadap keruntuhan geser (*shear failure*) dan perubahan volume tanah karena proses konsolidasi. Permasalahan yang sering dihadapi perencana konstruksi sipil yaitu berkaitan dengan tanah lunak. Hal ini disebabkan karena tanah lunak umumnya memiliki kuat geser dan permeabilitas yang rendah serta kompresibilitas yang besar.

Dalam perencanaan pembangunan konstruksi sipil, salah satu hal yang harus diperhatikan adalah elevasi desain perkerasannya. Untuk mencapai elevasi desain perkerasan, maka lapisan tanah dasar pada lokasi proyek harus ditimbun ataupun digali. Pada daerah yang terindikasi sebagai tanah lunak, tanah asli harus ditimbun untuk mencapai elevasi desain. Tinggi timbunan tersebut masih harus ditambah lagi dengan timbunan untuk mengakomodasi beban pekerasan dan beban dari konstruksi yang akan dibangun nantinya. Lokasi eksisting Proyek Pembangunan Jalan Tol Pekanbaru – Padang yang memiliki tanah lunak pada lokasi tertentu merupakan tanah lunak yang sangat kompresibel, maka ada hal – hal yang harus diperhatikan dalam pembangunannya, seperti:

1. Penurunan Tanah Besar

Penurunan pada tanah lunak akan terjadi adanya beban timbunan (*preloading*) yang ditempatkan di atas tanah dasar yang sangat lunak.

Penurunan (*settlement*) tersebut disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori dan sebab-sebab lainnya. Keluarnya air atau udara dari dalam pori selalu disertai dengan berkurangnya volume tanah, berkurangnya volume tanah tersebut dapat menyebabkan penurunan lapisan tanah tersebut. Bilamana suatu lapisan tanah lempung yang jenuh air yang mampu mampat (*compressible*) diberi penambahan tegangan berupa timbunan (*preloading*) di atasnya, maka penurunan (*settlement*) tanah tersebut akan terjadi dengan segera. Koefisien rembesan lempung adalah sangat kecil dibandingkan dengan koefisien rembesan pasir sehingga penambahan tekanan air pori yang disebabkan oleh pembebanan akan berkurang secara lambat laun dalam waktu yang sangat lama. Jadi untuk tanah lempung, perubahan volume yang disebabkan oleh keluarnya air dari dalam pori (konsolidasi) akan terjadi sesudah penurunan segera. Penurunan konsolidasi tersebut biasanya jauh lebih besar dan lebih lambat serta lama dibandingkan dengan penurunan segera. Secara umum, penurunan (*settlement*) pada tanah yang disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi dalam tiga kelompok besar, yaitu:

- a. Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*), yang merupakan hasil dari perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat dari keluarnya air yang menempati pori-pori tanah.
- b. Penurunan segera (*immediate settlement*), yang merupakan akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah dan jenuh air tanpa

adanya perubahan kadar air.

- c. Penurunan sekunder (*secondary settlement*), merupakan pemampatan yang diakibatkan oleh adanya penyesuaian yang bersifat plastis dari butir – butir tanah.



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

$$S_{total} = S_i + S_c + S_s$$

Dimana : $S_i = \text{Immediate settlement (cm)}$

$S_c = \text{Consolidation settlement (cm)}$

$S_s = \text{Secondary settlement (cm)}$

1) Daya Dukung Tanah Rendah

Daya dukung tanah adalah kemampuan tanah untuk menahan beban pondasi tanpa mengalami keruntuhan akibat geser yang juga ditentukan oleh kekuatan geser tanah. Daya dukung tanah merupakan unsur utama dalam pembuatan bangunan konstruksi. Dalam perencanaan konstruksi jalan maupun bangunan, daya dukung tanah mempunyai peranan yang sangat penting. Tanah sebagai tempat berdirinya suatu konstruksi harus mampu menerima dan menahan beban – beban yang bekerja di atasnya. Oleh karena itu, sebelum dilaksanakan pekerjaan pembangunan harus diketahui terlebih dahulu daya dukung tanah dasar ini semakin rendah kadar air maka daya dukung semakin besar.

3.2. Metode Perbaikan Tanah Lunak

Pada umumnya lapisan tanah lunak terdiri dari lempung (*clay*) atau lanau (*silt*). Masalah yang dihadapi ketika merencanakan suatu konstruksi pada kondisi tanah tersebut adalah daya dukung (*bearing capacity*) dan penurunan (*settlement*). Banyak metode yang dapat digunakan untuk memperbaiki sifat tanah ini, seperti teknik perbaikan tanah secara mekanis (fisis), dengan bahan kimia, dengan bahan perkuatan dan secara hidrolis. Pemilihan metode perbaikan tanah umumnya dilakukan berdasarkan formasi geologi dari lapisan tanah, karakteristik tanah, biaya dan ketersediaan material serta pengalaman.

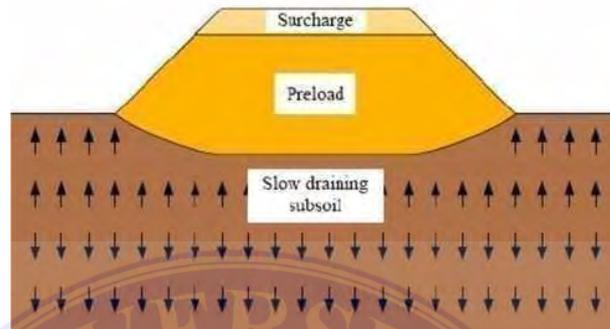
3.3.1. Metode *prefabricated vertical drain* (PVD)

PVD merupakan material geosynthetic yang konsep kerjanya sama dengan kolam pasir yang mempunyai karakteristik sebagai pengumpul air pori yang kemudian dialirkan secara vertikal baik ke atas maupun ke bawah lapisan tanah sepanjang PVD tersebut. Laju konsolidasi yang rendah pada lempung jenuhdengan permeabilitas rendah dapat dinaikan dengan menggunakan PVD, kemudian konsolidasi yang diperhitungkan akibat pengaliran horizontal menyebabkan disipasi kelebihan air pori yang lebih cepat, sedangkan vertival sangat kecil pengaruhnya. Dalam teori, besar penurunan konsolidasi akhir adalah sama, hanya laju penurunannya yang berbeda.

Prefabricated Vertical Drain (PVD) digunakan untuk mempercepat waktu penurunan primer/konsolidasi (Hausmann, 1990)

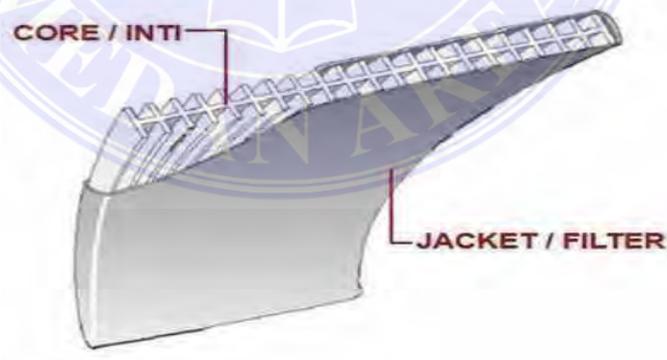
PVD berbahan ini sudah diaplikasikan pada beberapa proyek infrastruktur di Indonesia (Rudy Purwondho, 2018). Pemasangan PVD berbahan alami

ini terbukti dapat mencapai nilai konsolidasi di atas 90% dalam waktu 4-6 bulan dengan kedalaman penetrasi 15-30 m, tergantung pada ketebalan dari lapisan kompresibel



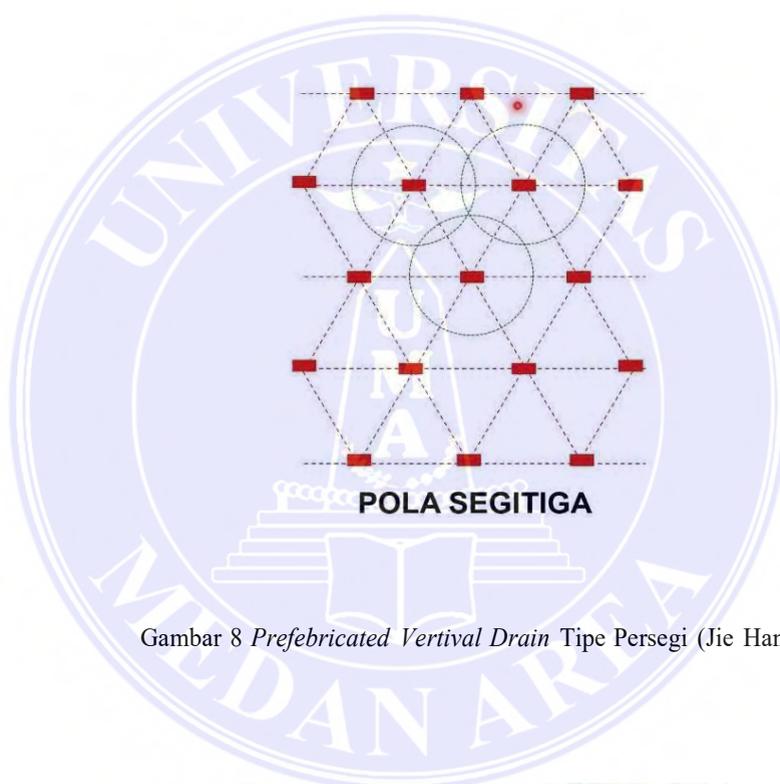
Gambar 6 Aliran air pori pada PVD(Gulhati K,2005)

PVD umumnya berbentuk pita dengan sebuah inti plastik terbuat dari terbuat dari material gesintesis (material polimer) yang dibentuk seperti potongan yang Panjang. Mterial polimer dapat berupa PVC dengan lebar 90sampai 100 mm, ketebalan 2 sampai 6 mm. Gambar lebih jelasnya dapat dilihat dalam gambar dibawah



Gambar 7 Prefabricated Vertical Drain (PVD) (Jie Han,2015)

PVD biasanya dipasang sampai kedalam lapisan tanah *undrained* dengan menggunakan rig penetrasi statis. Untuk yang lebih dalam dibutuhkan rig yang lebih besar untuk mempermudah proses penetrasi. Karena tujuannya adalah untuk mengurangi Panjang lintasan pengaliran, maka jarak antrara drainase merupakan hal terpenting. PVD tersebut biasanya diberi jarak dengan pola persegi atau segitiga. Dilapangan, saluran vertical sering dipasang dalam pola persegi atau segitiga.



Gambar 8 *Prefabricated Vertical Drain* Tipe Persegi (Jie Han,2015)



Gambar 9 Pemasangan Roll PVD (Konsultan Perencana,2022)

PVD harus memiliki kekuatan tarik yang cukup untuk bertahan selama instalasi. (S. Hansbo, 1960) mengemukakan bahwa kekuatan tarik inti lunak, filter seluruh drain, dan drain tersambung harus lebih besar dari 1 kN pada regangan tarik 10% dalam kondisi kering dan basah.

Equivalent Permeability (Chai *et al*, 2001) mengusulkan metode yang digunakan untuk memperkirakan peningkatan konsolidasi drainase yang dilakukan secara vertikal. Dalam metode mereka, permeabilitas vertikal yang setara dapat diperkirakan dengan mempertimbangkan keberadaan saluran vertikal, dimana :

k_{ve} = ekuivalen vertikal permeabilitas

h_{dr} = jarak maksimum drainase dari saluran vertikal

Adapun proses pemasangan PVD secara bertahap adalah sebagai berikut :

1. Persiapkan alat yaitu berupa *excavator*, *stitcher*, PVD, *mandrel* dan *plateangkur* baja. Pada dasar *mandrel*, material PVD dilingkarkan ke pengait baja atau *drain shoe* yang dapat memperkuat posisi PVD supaya tidak lepas dengan *mandrel* pada saat proses pemasangan .
2. PVD dipasang dengan menekan *mandrel* baja yang sudah dikaitkan dengan PVD. *Mandrel* didorong masuk kedalam tanah dengan menggunakan alat *excavator*.
3. Setelah PVD mencapai kedalaman yang diinginkan atau alat sudah mencapai lapisan keras, *mandrel* kemudian dilepas dan ditarik keatas tanah. Sementara itu, PVD dan plat pengait dari baja tetap dibiarkan didalam tanah. Setelah *mandrel* telah sepenuhnya keluar dari lapisan tanah, sisa PVD tersebut dipotong 12-20 cm dari permukaan tanah
lantai kerja.

4. Untuk dapat mendorong *mandrel* kedalam tanah, nilai resisten pada tanah (tanah dilantai kerja yang biasanya padat atau dilapisi *geotextile*) harus tidak melebihi 5 Mpa. Apabila lapisan tanah dipermukaan adalah merupakan jenis tanah sangat kuat, untuk memasukkan *mandrel* ke dalam tanah diperlukan sistem getar, *hammer* maupun *drilling system*.

3.3.2. Pembebanan Awal (*Preloading*)

Metode *preloading* atau pembebanan awal adalah metode penimbunan beban yang besarnya lebih besar atau sama dengan beban konstruksi yang akan dilaksanakan. Kombinasi antara metode *preloading* dengan instalasi PVD merupakan salah satu metode untuk mempercepat proses konsolidasi. Kombinasi pada metode ini dilakukan dengan cara memberikan beban awal yaitu berupa timbunan (*preloading*) pada tanah lempung yang telah dipasang PVD. Studi ini dilakukan untuk mengetahui percepatan waktu konsolidasi yang dihasilkan dari proses kombinasi *preloading* dan PVD untuk mencapai konsolidasi primer.

Metode pembebanan awal (*Preloading*) ialah metode penimbunan beban yang sama dengan beban konstruksi yang akan dilaksanakan (Lestari, 2018).

Beban total *preloading* berupa timbunan tanah yang diaplikasikan ke tanah asli harus lebih besar atau sama dengan 1,3 kali beban yang direncanakan pada kondisi layan bila efek gaya angkat (*bouyancy effect*) yang diterima beban timbunan pada saat proses *preloading* berlangsung tidak diperhitungkan. Sedangkan jika efek gaya angkat (*bouyancy effect*)

yang diterima beban timbunan pada saat proses preloading diperhitungkan, maka beban total *preloading* berupa timbunan tanah yang diaplikasikan ke tanah asli harus lebih besar atau sama dengan 1,2 kali beban yang direncanakan pada kondisi layan (SNI-8460, 2017).

Tinggi beban preloading yang telah ditentukan nantinya perlu disesuaikan dengan tinggi beban yang mampu diterima oleh tanah dasar yakni H kritis atau Hcr (Hidayati dan Wirya Ardana, 2008).

Besarnya beban *preloading* yang akan diberikan dapat ditentukan terlebih dahulu, kemudian dibandingkan dengan tinggi timbunan atau beban yang mampu diterima oleh tanah dasar yaitu H kritis (Hcr). Apabila ternyata tinggi timbunan sebagai beban *preloading* yang akan diberikan lebih besar daripada Hcr, maka timbunan tersebut harus diletakkan secara bertahap (*stepped preloading*)

1. Pemberian timbunan dengan sistem bertahap

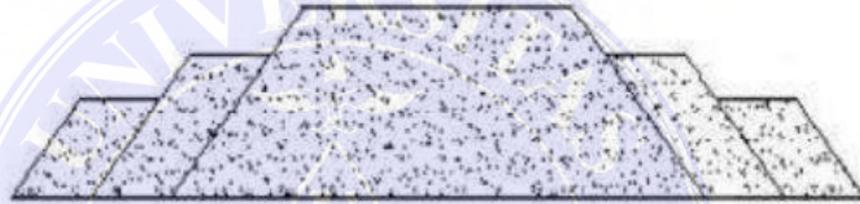
Dengan beban terhadap, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai ketinggian timbunan rencana cukup lama dan tergantung pada peningkatan daya dukung tanah dasarnya. Penambahan beban setiap lapisan beban *preloading* mengacu pada ketinggian yang masuk mampu dipikul H kritis oleh tanah dasarnya agar tidak terjadi kelongsoran. Untuk menentukan H kritis digunakan program bantu XSTABL. Pemberian timbunan secara bertahap dapat dilihat pada (Gambar 6)



Gambar 10. Pemberian *preloading* secara Bertahap (wirya ardana 2008)

2. Pemberian timbunan dengan sistem *Counter Weight*

Pada tanah dasar dengan daya dukung yang sangat rendah dan luas lahan yang cukup luas, bisa dipakai sistem *preloading* dengan *counter weight*, seperti pada (Gambar 8)



Gambar 11. Pemberian Preloading secara Counter Weight (wirya ardana 2008)

3.3.3. Penurunan (*Settlement*)

Akibat adanya beban timbunan (*preloading*) yang ditempatkan di atas tanah dasar yang sangat lunak maka akan terjadi penurunan (*settlement*) tanah dasar. *Settlement* tersebut disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori dan sebab-sebab lainnya. Keluarnya air atau udara dari dalam pori selalu disertai dengan berkurangnya volume tanah, berkurangnya volume tanah tersebut dapat menyebabkan penurunan lapisan tanah tersebut.

Bilamana suatu lapisan tanah lempung yang jenuh air yang mampu mampat (*compressible*) diberi penambahan tegangan berupa timbunan (*preloading*) di atasnya, maka penurunan (*settlement*) tanah tersebut akan terjadi dengan segera. Koefisien rembesan lempung adalah sangat kecil dibandingkan dengan koefisien

rembesan pasir sehingga penambahan tekanan air pori yang disebabkan oleh pembebanan akan berkurang secara lambat laun dalam waktu yang sangat lama. Jadi untuk tanah lempung lembek, perubahan volume yang disebabkan oleh keluarnya air dari dalam pori (konsolidasi) akan terjadi sesudah penurunan segera. Penurunan konsolidasi tersebut biasanya jauh lebih besar dan lebih lambat serta lama dibandingkan dengan penurunan segera. Secara umum, penurunan (*settlement*) pada tanah yang disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi dalam tiga kelompok besar, yaitu :

1. Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*), yang merupakan hasil dari perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat dari keluarnya air yang menempati pori-pori tanah
2. Penurunan segera (*immediate settlement*), yang merupakan akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah dan jenuh.
3. Penurunan sekunder (*secondary settlement*), merupakan pemampatan yang diakibatkan oleh adanya penyesuaian yang bersifat plastis dari butir-butir tanah.

Settlement total yang terjadi pada tanah yang dibebani (S_t) mempunyai 3 komponen ;

$$S_t = S_i + S_c + S_s$$

Dimana :

$$S_i = \text{Immediate settlement (cm)}$$

$$S_c = \text{Consolidation settlement (cm)}$$

$$S_s = \text{Secondary settlement (cm)}$$

3.3. Penurunan Konsolidasi (*Consolidation Settlement - Sc*)

Penurunan Konsolidasi merupakan penurunan yang terjadi karena perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat keluarnya air yang menempati pori – pori tanah. Menurut Weasley (1997), bilamana suatu lapisan tanah mengalami tambahan beban di atasnya, maka seiring berjalannya waktu maka air pori akan mengalir keluar dari pori – pori tanah tersebut dan volume tanah akan menjadi lebih kecil. Besarnya penurunan yang terjadi selama masa konsolidasi ini dikenal dengan nama Penurunan Konsolidasi. Pada umumnya konsolidasi berlangsung satu arah, yaitu arah vertikal, karena lapisan yang ditambahkan beban tersebut tidak bergerak ke arah horizontal sebab ditahan oleh tanah disekelilingnya. Peristiwa ini disebut juga Penurunan Satu Dimensi (*One Dimensional Settlement*).

Saat konsolidasi berlangsung maka lapisan tanah tersebut akan mengalami penurunan, yang mengakibatkan struktur di atasnya juga ikut mengalami penurunan, ada dua hal yang perlu ditinjau lebih lanjut dari penurunan tersebut, yaitu :

1. Besarnya penurunan yang akan terjadi
2. Waktu yang diperlukan untuk mencapai penurunan tertentu

Tanah pasir sangat mudah dilalui oleh air (permeabilitas tinggi) sehingga penurunan berlangsung cepat oleh sebab itu pada waktu pembangunan di atas tanah pasir selesai maka penurunan dapat dianggap selesai pula, karena itu penurunan yang terjadi pada tanah pasir ini disebut penurunan seketika dan dapat dikatakan pula tidak terjadi penurunan konsolidasi pada tanah pasir.

Sebaliknya pada tanah lempung yang berpermeabilitas rendah, tegangan air pori berlebih memerlukan waktu yang lama untuk terdisipasi, dengan demikian penurunan konsolidasi memakan waktu yang sangat lama. Oleh sebab itu Penurunan Konsolidasi dapat dikatakan hanya terjadi pada lapisan tanah lempung. Selain masalah permeabilitas tanah, panjang lintasan tempuh air pori untuk keluar dan juga mempengaruhi kecepatan/waktu yang dibutuhkan lapisan tanah untuk mengalami Penurunan Konsolidasi.

Teori Konsolidasi pertama kali dikemukakan oleh Terzaghi (1920- 1924) dengan asumsi sebagai berikut :

- a. Konsolidasi 1 dimensi hanya terjadi pada arah *vertical*
- b. Air tidak dapat diteka (*incompressible*)
- c. Lempung dalam keadaan jenuh air
- d. Permeabilitas tanah konstan
- e. eformasi tanah kecil
- f. Hukum Darcy berlaku
- g. Partikel tanah tidak dapat ditekan (*incompressible*)

a. Penurunan Segera (*Immediate Settlement - Si*)

penurunan segera merupakan tanah akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah, jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air. Perhitungan penurunan segera umumnya didasarkan pada penurunan yang diturunkan dari teori elastisitas bilamana suatu lapisan tanah jenuh air diberipenambahan beban, angka tekanan air pori akan naik secara mendadak. Pada tanah berpasir yang tembus air (*permeable*), air dapat mengalir dengan cepat

sehingga pengaliran air pori keluar sebagai akibat dari kenaikan tekanan air pori dapat terjadi dengan cepat. Pada umumnya, penurunan segera (*immediate settlement*) dominan terjadi pada tanah pasir sedangkan pada tanah lempung jarang terjadi sehingga dalam perhitungan sering diabaikan.

3.4.1. Penurunan Sekunder (*Secondary Settlement - S_s*)

Penurunan sekunder merupakan penurunan/pemampatan yang diakibatkan oleh adanya penyesuaian yang tanah bersifat plastis dari butir – butir tanah. Penurunan Sekunder dikenal pula dengan sebutan Penurunan Rangkak (*creep*), terjadi setelah Penurunan Konsolidasi. Penurunan ini terjadi akibat penyesuaian butir – butir tanah pada kerangka tanah setelah tegangan air pori berlebih terdisipasi sempurna ($U = 0$). Jadi, selama proses Penurunan Sekunder ini terjadi tidak ada perubahan tegangan efektif tanah. Penurunan sekunder pada umumnya berlangsung pada waktu yang sangat lama, karena itu agak sukar dievaluasi.

Penurunan tanah (*ground settlement*) terjadi tergantung dari jenis tanah, pada umumnya dari ketika jenis penurunan tanah tersebut hanya salah satu jenis yang dominan pada suatu jenis tanah tertentu, Karena jenis penurunan yang lainnya ada kalanya terlalu kecil sehingga dapat diabaikan (Braja M Das 1995). Contohnya pada jenis tanah lempung Non Organik (*Inorganic Clay*), yang dominan terjadi adalah Penurunan Konsolidasi sedangkan dua jenis penurunan yang lainnya cenderung sangat kecil sehingga sering kali dalam proses perhitungan keduanya diabaikan.

3.4. Dasar Konsolidasi

Konsolidasi adalah proses terdisipasinya air tanah akibat bekerjanya beban, yang terjadi sebagai fungsi waktu karena kecilnya permeabilitas tanah. Proses ini berlangsung terus sampai kelebihan tekanan air pori yang disebabkan oleh kenaikan tegangan total yang telah benar-benar hilang. Peristiwa konsolidasi umumnya dipicu oleh adanya beban/muatan diatas tanah. Muatan tersebut dapat berupa tanah atau konstruksi bangunan yang berdiri diatas tanah. Bila lapisan tanah mengalami beban dia atasnya, maka pori akan mengalir keluar dari lapisan tersebut dan volumenya akan berkurang atau dengan kata lain akan mengalami konsolidasi (Wesley, 1977).

Pada umumnya konsolidasi akan berlangsung satu arah (*one dimensional consolidation*) yaitu arah vertikal saja, karena lapisan yang mengalami tambahan beban itu tidak dapat bergerak secara horizontal, karena ditahan oleh tanah disekitarnya (*lateral pressure*).

Teori umum yang mencakup konsep tekanan pori dan tegangan efektif adalah dikembangkan oleh Terzaghi selama tahun 1920 – 1924. Teori konsolidasi Terzaghi membuat asumsi – asumsi sebagai berikut:

- a. Tanah adalah, dan tetap akan, jenuh ($S=100\%$). Penurunan konsolidasi dapat diperoleh untuk tanah yang tidak jenuh, tetapi ramalan waktu terjadinya penurunan sangat tidak dapat dipercaya.
- b. Air dan butiran – butiran tanah tidak dapat ditekan.
- c. Terdapat hubungan yang linear antara tekanan yang bekerja dan perubahan volume $av = \frac{\Delta e}{\Delta v}$

- d. Koefisien permeabilitas k merupakan konstanta. Perubahan temperatur dari sekitar 10 sampai 20°C menghasilkan sekitar 30 persen perubahan dalam viskositas air.
- e. Konsolidasi merupakan konsolidasi satu dimensi (*vertical*), sehingga tidak terdapat aliran air atau pergerakan tanah lateral.
- f. Contoh yang digunakan merupakan contoh tidak terganggu.

3.5.1. Uji Konsolidasi Satu Dimensi

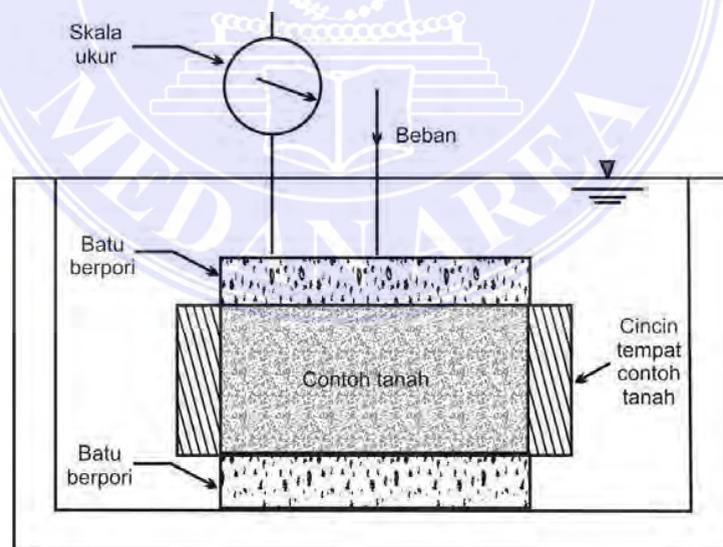
Salah satu teori yang umum digunakan untuk memprediksi penurunan dan waktu yang dibutuhkan adalah teori konsolidasi satu dimensi yang diperkenalkan oleh Terzaghi, dimana deformasi dan arah aliran hanya terjadi ketika pada satu arah yaitu ketika pada arah *vertical*.

Prosedur untuk melakukan uji konsolidasi satu dimensi (1 – D) pertama – tama diperkenalkan (*oedometer*). Skema konsolidometer ditunjukkan dalam (Gambar 2.9.) Contoh tanah diletakkan di dalam cincin logam dengan buah batu berpori diletakkan di atas dan bagian bawah contoh tanah tersebut. Ukuran contoh tanah digunakan biasanya adalah : diameter 2,5 inci (63,5 mm) dan tebal 1 inci (2,54 mm). pembebanan pada contoh tanah dilakukan dengan cara meletakkan beban pada ujung sebuah balok datar, dan pemampatan contoh tanah diukur dengan menggunakan skala ukur dengan skala micrometer. Contoh tanah selalu direndam air

selama percobaan. Tiap – tiap beban biasanya diberikan selama 24 jam. Setelah itu, beban dinaikkan sampai dengan dua kali lipat bebasebelumnya, dan pengukuran pemampatan diteruskan. Pada saat percobaan selesai, berat kering dari contoh tanah ditentukan. Pada umumnya, bentuk grafik yang menunjukkan hubungan antara pemampatan dan waktu adalah seperti yang ditunjukkan dalam (Gambar 10) Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa ada tiga tahapan berbeda yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

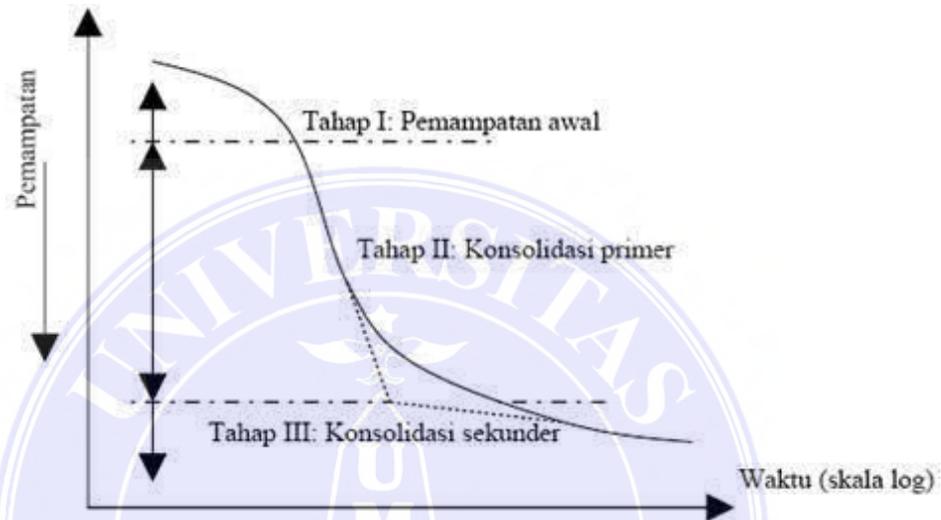
Tahap I : Pemampatan awal (*initial compression*), yang pada umumnya disebabkan oleh pembebanan awal (*preloading*).

Tahap II : Kosolidasi primer (*primary consolidation*), yaitu periode selama tekanan air pori secara lambat laun dipindahkan ke dalam tegangan efektif, sebagai akibat keluarnya air dari pori - pori tanah.



Gambar 13 Konsolidometer (M Das, 1995)

Tahap III : Kosolidasi sekunder (*secondary consolidation*), yang terjadi setelah tekanan air pori hilang seluruhnya. Pemampatan yang terjadi disini adalah disebabkan penyesuaian yang bersifat dari butir – butir tanah.



Gambar 14 Grafik waktu – pemampatan selama konsolidasi (M Das,1995)

Dengan pengetahuan yang didapat dari analisis hasil uji konsolidasi, perhitungan penurunan yang disebabkan oleh konsolidasi primer di lapangan dapat dihitung dengan menganggap bahwa konsolidasi tersebut adalah satu dimensi. Penurunan total akibat konsolidasi primer yang disebabkan oleh adanya penambahan tegangan di atas permukaan tanah dapat dihitung dengan menggunakan Terzaghi memperkenalkan teori yang pertama kali mengenai kecepatan konsolidasi satu dimensi

untuk tanah lempung yang jenuh air, dengan anggapan – anggapan berikut ini :

- Tanah (sistem lempung – air) adalah homogeny.
- Tanah benar – benar jenuh.
- Kemampumampatan air diabaikan.
- Kemampumampatan butiran tanah diabaikan.
- Aliran air hanya satu arah (yaitu pada arah pemampatan).
- Hokum Darcy berlaku.

Secara matematis, dasar persamaan diferensial dari teori konsolidasi oleh Terzaghi adalah sebagai berikut :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Dimana :

u = tekanan air pori (KN/m^2)

t = waktu peninjauan (s)

z = kedalaman peninjauan (m)

$\frac{\partial u}{\partial t}$ = turunan pertama tekanan air pori terhadap waktu

$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ = turunan kedua tekanan air pori terhadap kedalaman

3.5.2. Derajat Konsolidasi Arah Vertikal

Persamaan matematis untuk konsolidasi 1 – D dari Terzaghi dalam menentukan nilai derajat konsolidasi arah vertikal (U_v) dapat dinyatakan dengan formula berikut :

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

$$U_v = \frac{\sqrt{4T_v}}{\pi} \frac{1}{(1 + (\frac{\pi}{2})^2 \cdot 8)^{0,178}}$$

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

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

Dimana :

m = bilangan bulat

T_v = faktor waktu

C_v = koefisien konsolidasi arah vertikal ($cm^2/detik$)

t = waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi (s)

exp = 2,7182818

variasi derajat konsolidasi rata – rata terhadap faktor waktu yang tak berdimensi T_v diberikan dalam Tabel 6 yang berlaku untuk keadaan dimana U_o (tegangan air pori awal) adalah sama untuk seluruh kedalaman lapisan yang mengalami konsolidasi. Harga faktor waktu dan derajat konsolidasi rata – rata bersesuaian dengan keadaan yang diberikan Tabel

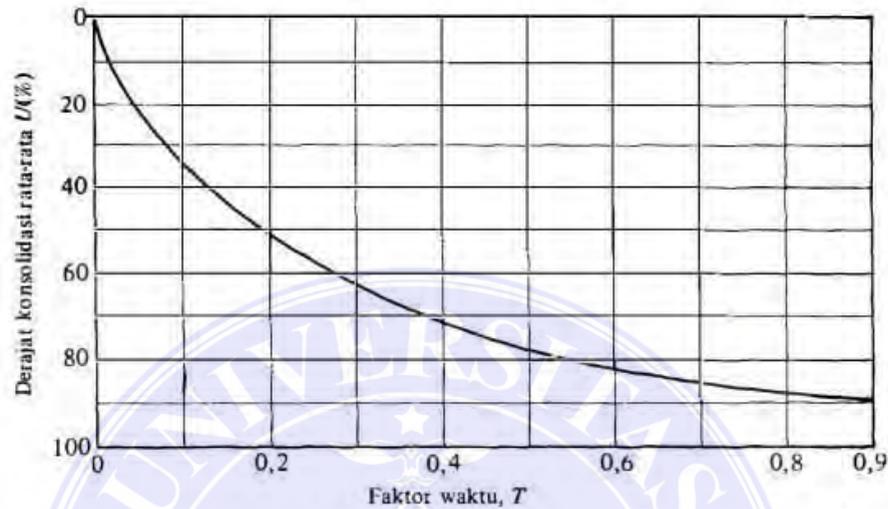
6 dapat dinyatakan dengan suatu hubungan yang sederhana :

Tabel 6 Variasi faktor waktu terhadap derajat konsolidasi

Derajat Konsolidasi U%	Faktor Waktu T_v
0	0
10	0,008
20	0,031
30	0,071
40	0,126
50	0,197
60	0,287

70	0,403
80	0,567
90	0,848
100	∞

Sumber : Braja M Das, 1995



Gambar 15 Grafik variasi derajat konsolidasi rata – rata terhadap faktor waktu, T_v (M das,1995)

3.5.3. Koefisien Konsolidasi Vertikal

Koefisien konsolidasi vertikal, C_v biasanya akan berkurang dengan bertambahnya batas cair (LL) dari tanah. Rentang (*range*) dari variasi harga C_v untuk suatu batas cair tanah tertentu adalah agak lebar. Koefisien konsolidasi vertikal (C_v) menentukan kecepatan pengaliran air pada arah vertikal dalam tanah. Karena pada umumnya konsolidasi berlangsung satu arah saja, yaitu arah vertikal, maka koefisien konsolidasi sangat berpengaruh terhadap kecepatan konsolidasi yang akan terjadi. Harga C_v dapat dicari mempergunakan persamaan berikut ini:

$$C_v = \frac{T_v H^2}{t}$$

Dimana :

C_v = koefisien konsolidasi vertikal ($cm^2/detik$)

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%

3.5.4. Grafik Angka Pori – Tekan

Setelah mendapatkan grafik antara waktu dan pemampatan untuk besar pembebanan yang bermacam – macam dari percobaan di laboratorium, selanjutnya penting bagi kita untuk mempelajari perubahan angka pori terhadap tekanan. Berikut ini adalah langkah demi langkah urutan pelaksanaannya

1. Hitung tinggi butiran padat, H_s pada contoh tanah

$$H_s = \frac{W_s}{A \cdot G_s \cdot \gamma_w}$$

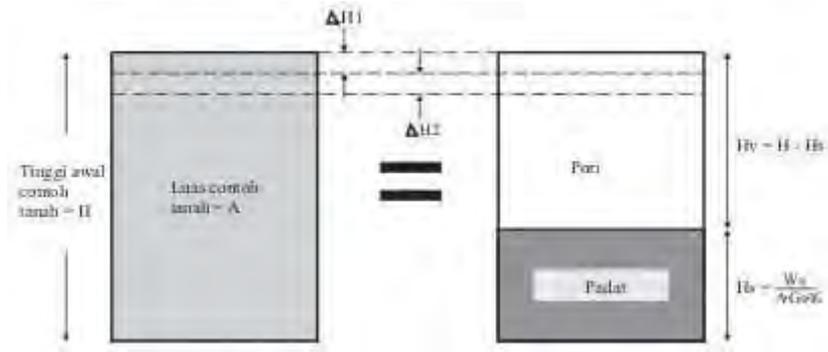
Dimana : W_s = Berat kering contoh tanah

A = Luas penampang contoh tanah

G_s = Berat spesifik contoh tanah

γ_w = Berat volume air

2. Hitungan tinggi awal dari ruang pori, H_v :



Gambar 16 Perubahan tinggi contoh tanah pada uji konsolidasi satudimensi (M, Das, 1995)

$$H_v = H - H_s$$

Dimana H = tinggi awal tanah contoh

3. Hitung angka pori awal, e_0 , dari contoh tanah

$$e_0 = \frac{V_v}{V_s} = \frac{H_v \cdot A}{H_s \cdot A} = \frac{H_v}{H_s}$$

4. Untuk penambahan beban pertama P_1 (beban total/luas penampang contoh tanah), yang menyebabkan penurunan ΔH_1 , hitung penurunan

Δe_1 :

$$\Delta e_1 = \frac{\Delta H_1}{\Delta H_s}$$

ΔH_1 didapatkan dari pembacaan awal dan akhir skala ukur untuk beban sebesar P_1

5. Hitung angka pori yang baru, e_1 , setelah konsolidasi yang disebabkan oleh penambahan tekanan P_1 :

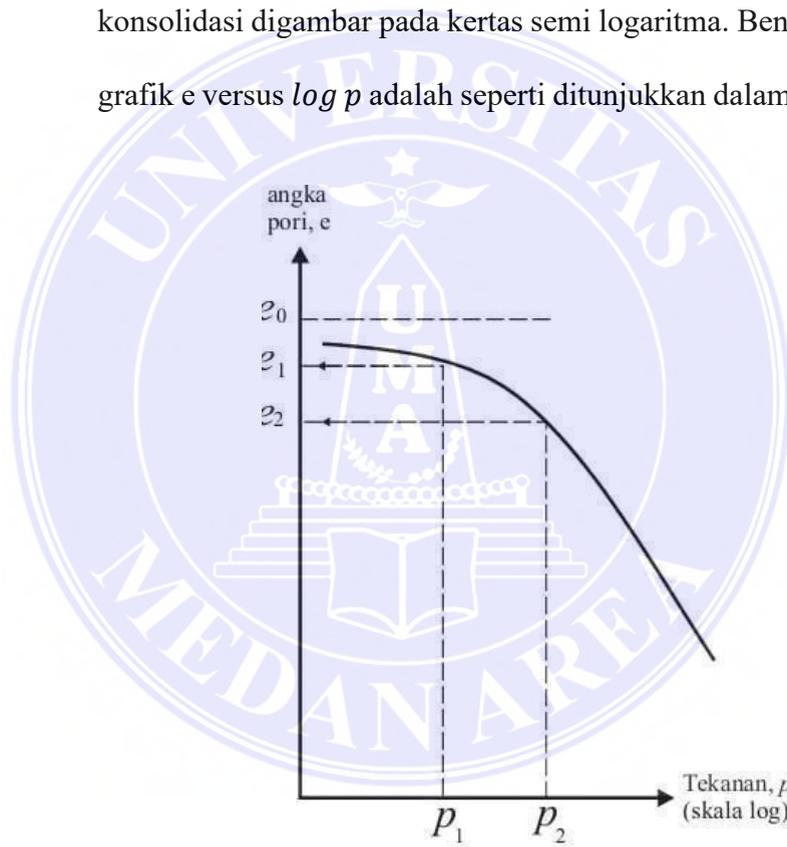
$$e_1 = e_0 - \Delta e_1$$

Untuk beban berikut yaitu P_2 (beban kumulatif per satuan luas contoh tanah), yang menyebabkan penambahan pemampatan

sebesar ΔH_2 , angka pori e_2 pada saat akhir konsolidasi dapat dihitung sebagai berikut:

$$e_2 = e_1 - \frac{\Delta H_2}{H_s}$$

Dengan melakukan cara yang sama, angka pori pada saat akhir konsolidasi untuk semua penambahan beban dapat diperoleh tekanan total (P) dan angka pori yang berangkutan (e) pada akhirnya konsolidasi digambar pada kertas semi logaritma. Bentuk umum dari grafik e versus $\log p$ adalah seperti ditunjukkan dalam (Gambar 13.)



Gambar 17 Bentuk grafik e versus $\log p$ (M Das,1995)

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

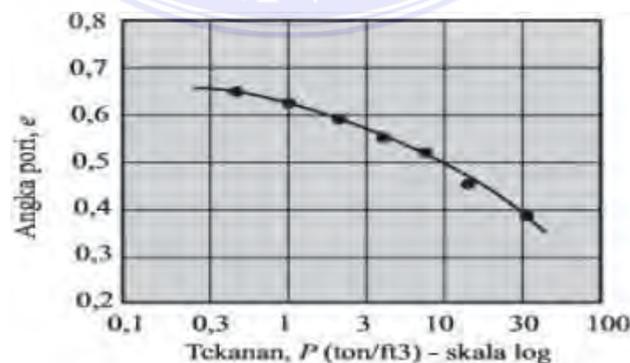
Gambar 2.10. menunjukkan bahwa bagian atas dari grafik e versus $\log p$ adalah garis lengkung dengan kemiringan yang agak datar, kemudian diikuti dengan bagian grafik yang mempunyai hubungan linear antara angka pori dengan $\log p$ yang mempunyai kemiringan agak curam. Keadaan ini dapat diterangkan dengan cara berikut ini:

Suatu tanah dilapangan dengan suatu kedalaman tertentu dalam sejarah geologinya telah mengalami tekanan efektif maksimum akibat berat tanah di atasnya (*maximum effective overburden pressure*). Tekanan efektif *overburden* yang ada pada saat pengambilan contoh tanah. Berkurangnya tekanan dilapangan tersebut mungkin disebabkan oleh proses geologi alamiah atau proses yang disebabkan oleh makhluk hidup (misalnya manusia atau binatang). Pada saat diambil, contoh tanah tersebut terlepas dari tekanan *overburden* yang membebaninya selama ini; sebagai akibatnya contoh tanah tersebut akan mengembang. Ketika pada contoh tanah tersebut dilakukan uji konsolidasi, suatu pemampatan yang kecil (perubahan angka pori yang kecil) akan terjadi bila beban total yang diberikan pada saat percobaan adalah lebih kecil dari tekanan efektif *overburden* maksimum yang pernah dialami sebelumnya. Apabila beban total yang diberikan adalah lebih besar dari tekanan efektif *overburden* maksimum yang pernah dialami oleh tanah yang bersangkutan, maka perubahan angka pori yang terjadi adalah lebih besar, dan hubungan antara e versus $\log p$ menjadi linear dan memiliki kemiringan yang tajam.

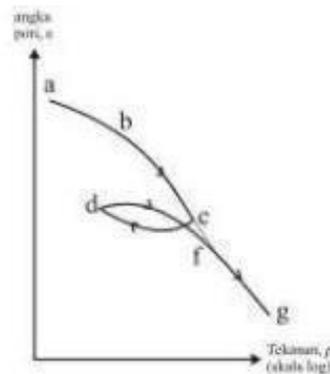
Untuk lebih jelasnya pada (Gambar 15) Keadaan ini dapat dibuktikan di laboratorium dengan cara membebani contoh tanah melebihi tekanan *overburden* maksimumnya, lalu beban tersebut diangkat (*unloading*) dan diberikan lagi beban (*reloading*). Grafik e versus $\log p$ untuk keadaan tersebut ditunjukkan dalam (Gambar 15.) dimana cd menunjukkan keadaan pada saat beban diangkat dan dfg menunjukkan keadaan pada saat beban diberikan kembali.

Keadaan ini mengarah kepada dua definisi dasar yang didasarkan pada sejarah tegangan :

1. Terkonsolidasi secara normal (*normally consolidated*), dimana tekanan efektif *overburden* pada saat ini adalah merupakan tekanan maksimum yang pernah dialami oleh tanah itu.
2. Terlalu terkonsolidasi (*overconsolidated*), di mana tekanan efektif *overburden* pada saat ini adalah lebih kecil dari tekanan yang pernah dialami tanah ini sebelumnya. Tekanan efektif *overburden* maksimum yang pernah dialami sebelumnya dinamakan tekanan prakonsolidasi (*preconsolidation pressure*).



Gambar 18 Variasi angka pori terhadap tekanan (M Das, 1995)



Gambar 19 Grafik e versus log p yang menunjukkan keadaan akibat pembebanan, pengangkatan beban, dan pembebanan kembali. (M Das, 1995)

3.5.6. Analisis Perhitungan Penurunan yang Disebabkan oleh Konsolidasi Primer Satu Dimensi

Dengan pengetahuan yang didapat dari analisis hasil uji konsolidasi, maka dapat dihitung kemungkinan penurunan yang disebabkan oleh konsolidasi primer dilapangan, dengan menganggap konsolidasi tersebut adalah satu dimensi (Das, Braja M. 1985). Tinjauan suatu lapisan lempung jenuh dengan tebal H dan luasan penampang melintang A serta tekanan efektif overburden rata – rata sebesar P_0 . Disebab oleh penambahan tekanan sebesar Δp , dianggaplah penurunan konsolidasi primer yang terjadi adalah sebesar S. menjelaskan kasus penurunan tersebut.

Volume pori dapat ditentukan dengan menggunakan rumus :

$$S \Delta v = V_0 - V_1 = H \cdot A - (H - S) \cdot A = S \cdot A$$

Dimana V_0 dan V_1 berturut – turut adalah volume awal dan volume akhir tetapi perubahan volume sama dengan perubahan volume pori, ΔV_v . Jadi

$$\Delta V = S \cdot A = V_{v0} - V_{v1}$$

Dimana V_{v0} dan V_{v1} berturut – turut adalah volume akhir dari pori.

Dari definisi angka pori

$$\Delta V_v = \Delta e \cdot V_s$$

Dimana Δe = perubahan angka pori

Tapi

$$V_s = \frac{V_o}{1+e_0} = \frac{AH}{1+e_0}$$

Dimana e_0 = angka pori awal pada saat volume tanah sama dengan V_o .

Jadi dari persamaan – persamaan diatas maka di dapat :

$$\Delta V = S \cdot A = \Delta e \cdot V_s = \frac{AH}{1+e_0} \Delta e$$

Atau

$$S = H \frac{\Delta e}{1+e_0}$$

Untuk lempung yang terkonsolidasi secara normal dimana e versus $\log p$ merupakan garis lurus (Gambar 2.15.) maka :

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

Dimana C_c = kemiringan kurva Δe versus $\log P_0$ dan didefinisikan sebagai “indeks pemampatan” (*compression index*).

Masukan persamaan maka diperbolehkan persamaan

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

Untuk suatu lapisan lempung yang tebal, adalah lebih teliti bila lapisan tanah tersebut dibagi menjadi beberapa sub – lapisan dan perhitungan penurunan dilakukan secara terpisah untuk tiap – tiap sub – lapisan. Jadi, penurunan total dari seluruh lapisan tersebut adalah

Dimana :

S = Penurunan total

H = Tebal lapisan tanah lunak yang memampat (m)

H_i = Sub lapisan i

P_{oi} = Tekanan efektif *overburden* untuk sub – lapisan i (t/m^2)

ΔP_i = Penambahan tekanan *vertical* untuk sub – lapisan i (t/m^2)

C_c = Indeks pemampatan (*Compression Index*)

C_s = Indeks pemuaiian (*Swelling Index*)

e_0 = Angka pori awal (*Initial Void Ratio*)

Untuk lempung yang terlalu terkonsolidasi (*overconsolidated*), (Gambar 2.17.) apabila $(P_o + \Delta p) \leq P_c$ lapangan, variasi e versus $\log p$ terletak di sepanjang cb dengan kemiringan yang hamper sama dengan kemiringan kurva pantul (*rebound curve*) yang didapat dari uji konsolidasi di laboratorium.

Kemiringan kurva pantul, C_s disebut “*indeks pemuaiian*” jadi :

Besarnya penurunan dapat ditung dengan persamaan

- Bila $(P_o + \Delta p) \leq P_c$ maka :

$$S = \frac{C_c H}{1+e_0} \log \left(\frac{P_o + \Delta p}{P_o} \right)$$

- Bila $(P_o + \Delta p) \geq P_c$ maka :

$$S = \frac{C_c H}{1+e_0} \log j + \frac{C_c H}{P_o} \frac{P_o + \Delta p}{1+e_0} \log \left(\frac{P_o + \Delta p}{P_o} \right)$$

$(P_o + \Delta p) \leq P_c$ lapangan, variasi e versus $\log p$ terletak disepanjang cb dengan kemiringan yang hamper sama dengan kemiringan kurva pantul (*rebound curve*) yang didapat dari uji konsolidasi di laboratorium.

Kemiringan kurva pantul, C_s disebut “*indeks pemuaian*” jadi :

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

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

Apabila kurva e versus $\log p$ tersedia, mungkin saja untuk memilih Δe dengan mudah dari grafik tersebut dengan rentang (*range*) tekanan yang sesuai. Kemudian nilai – nilai yang diambil dari kurva tersebut dimasukkan kedalam persamaan () untuk menghitung besar penurunan S .

3.5.7. Indeks Pemampatan (*Compression Index*)

Indeks pemampatan digunakan sebagai untuk menghitung besarnya penurunan yang terjadi dilapangan sebagai akibat dari konsolidasi dapat ditentukan dari kurva yang menunjukkan hubungan antara pori dan tekanan seperti ditunjukkan oleh (Gambar 18) yang didapat dari uji konsolidasi di laboratorium. Ketika tekanan air pori sama dengan nol, penurunan masih terjadi sebagai akibat dari penyesuaian plastis butiran tanah. Tanah konsolidasi ini dinamakan konsolidasi sekunder. Selama konsolidasi sekunder berlangsung, kurva hubungan antara deformasi dan \log waktu (t) merupakan garis lurus. Penurunan yang diakibatkan oleh konsolidasi sekunder sangat penting untuk semua jenis tanah organik dan tanah anorganik yang *compressible*. Untuk lempung anorganik yang terlalu terkonsolidasi, indeks pemampatan sekunder adalah sangat kecil sehingga dapat diabaikan.

Perbandingan pemampatan sekunder terhadap pemampatan primer untuk suatu lapisan tanah dengan ketebalan tertentu adalah tergantung pada perbandingan antara penambahan tegangan (Δp) dengan tegangan

efektif awal (P_0). Apabila $\frac{\Delta p}{P_0}$ lebih kecil, maka perbandingan pemampatan sekunder dan primer adalah semakin besar.

Terzaghi dan Peck (1967), menyarankan pemakaian persamaan empiris berikut ini untuk menghitung indeks pemampatan:

- Untuk lempung yang struktur tanahnya tak terganggu/belum rusak (*undisturbed*)

$$C_c = 0,009 (LL - 10)$$

- Untuk lempung yang terbentuk kembali (*remolded*)

$$C_c = 0,007 (LL - 10)$$

Dimana LL (*Liquid Limid*) = batas cair dalam persen

Apabila tidak tersedia data konsolidasi hasil percobaan di laboratorium, persamaan $C_c = 0,009 (LL - 10)$ sering digunakan untuk menghitung konsolidasi primer yang terjadi di lapangan.

Beberapa korelasi empiris yang dapat diguankan untuk menentukan nilai indeks kompresi (C_c). Tertera pada Tabel 2.7.

Tabel 7 Korelasi Empiris Penentuan Nilai Indeks Kompresi, C_c

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 Brazillian
$C_c = 0,01 \omega_n$	Lempung Chicago
$C_c = 0,0115 \omega_n$	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
$C_c = 0,75 (e_o - 0,5)$	Tanag berplastisitas rendah
$C_c = 0,208 e_o + 0,0083$	Lempung Chicago
$C_c = 0,156 e_o + 0,0107$	Lempung pada umumnya

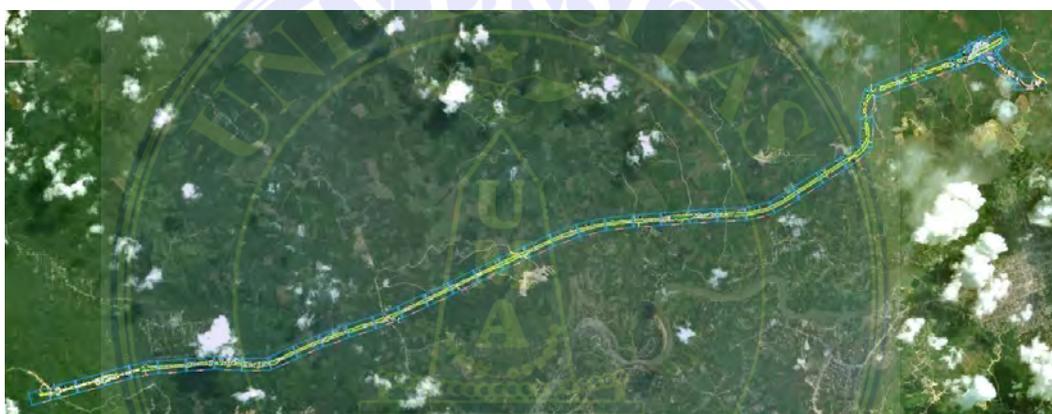
Sumber : Braja M Das, 1995

BAB III

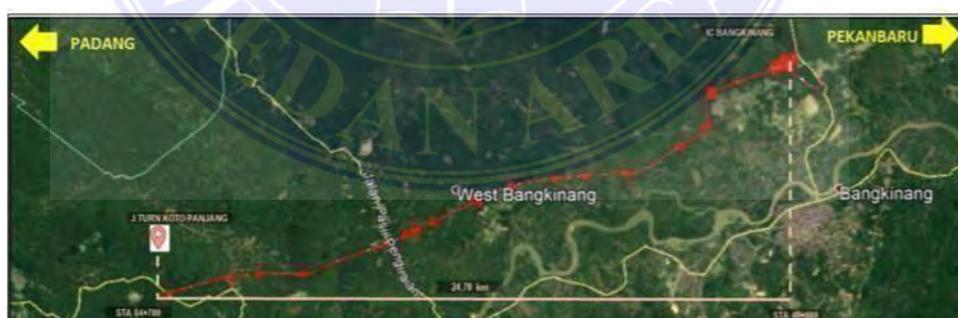
METODE PENELITIAN

3.1. Lokasi Dan Peta Penelitian

Lokasi yang dipilih untuk penelitian ini yaitu Proyek Pembangunan Jalan Tol Pekanbaru – Padang pada STA 46+950, Lokasinya yang terletak di Kabupaten Kampar, Provinsi Riau merupakan salah satu daerah di pulau sumatera. Dimana berdasarkan hasil penyelidikan tanah dilapangan yang berupa hasil uji alat sondir dan boring, pada lokasi tersebut termasuk jenis tanah dan diperlukan perbaikan tanah terlebih dahulu sebelum dilakukan pembangunan jalan tol. Lokasi pembangunan Proyek Pembangunan Jalan Tol Pekanbaru – Padang.



Gambar 23 Lokasi Pekerjaan (Google Earth,2023)



Gambar 24 Topografi Lokasi Proyek Jalan Tol (Dokumen Lapangan,2023)

3.2. Tahap Persiapan

Tahap persiapan ini merupakan rangkaian kegiatan sebelum melakukan pengumpulan data dan pengelolaan data. Dalam tahap ini disusun hal – hal penting yang harus dilakukan agar mengefektifkan waktu dan pekerjaan.

Adapun tahap – tahap persiapan ini meliputi :

1. Studi pustaka materi tugas akhir untuk menentukan garis besar permasalahan.
2. Menentukan kebutuhan data yang akan digunakan.
3. Mencari informasi melalui instansi terkait yang dapat dijadikan narasumber.
4. Survey lokasi untuk mengetahui gambaran kondisi pada lokasi proyek.

Persiapan diatas harus dilakukan dengan cermat agar terhindar dari bagian yang terlupakan ataupun pekerjaan yang terulang.

3.3. Tahap Penelitian

Dalam penulisan Tugas Akhir ini, penulis melakukan beberapa tahap dan pelaksanaan sehingga tercapai maksud dan tujuan dari penelitian seperti yang diuraikan pada Bab I, tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini adalah untuk mengetahui besar kecepatan penurunan konsolidasi dan masalah stabilitas yang terjadi pada tanah jika dilakukan perbaikan dan sesudah jika dilakukan perbaikan untuk mempercepat agar tanah mampu menahan beban yang ada di atasnya dengan menggunakan Kombinasi Metode *Prevebricated Vertical Drain Dan Preloading Menggunakan*

Plaxis, yang didasarkan pada data pengujian dilapangan, dan pengolahan data.

Dalam mencapai tujuan tersebut, maka dilakukan tahap – tahap sebagai berikut :

- Tahap Pertama

Mengumpulkan berbagai jenis literature dalam bentuk bukumaupun tulisan ilmiah yang berhubungan dengan Tugas Akhir ini.

- Tahap Kedua

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data – data dari hasil penyelidikan tanah yaitu berupa hasil boring pada tanah dan data spesifikasi bahan yang digunakan. Adapun data tersebut diperoleh dari PT.Wijaya Karya (Persero) Tbk.

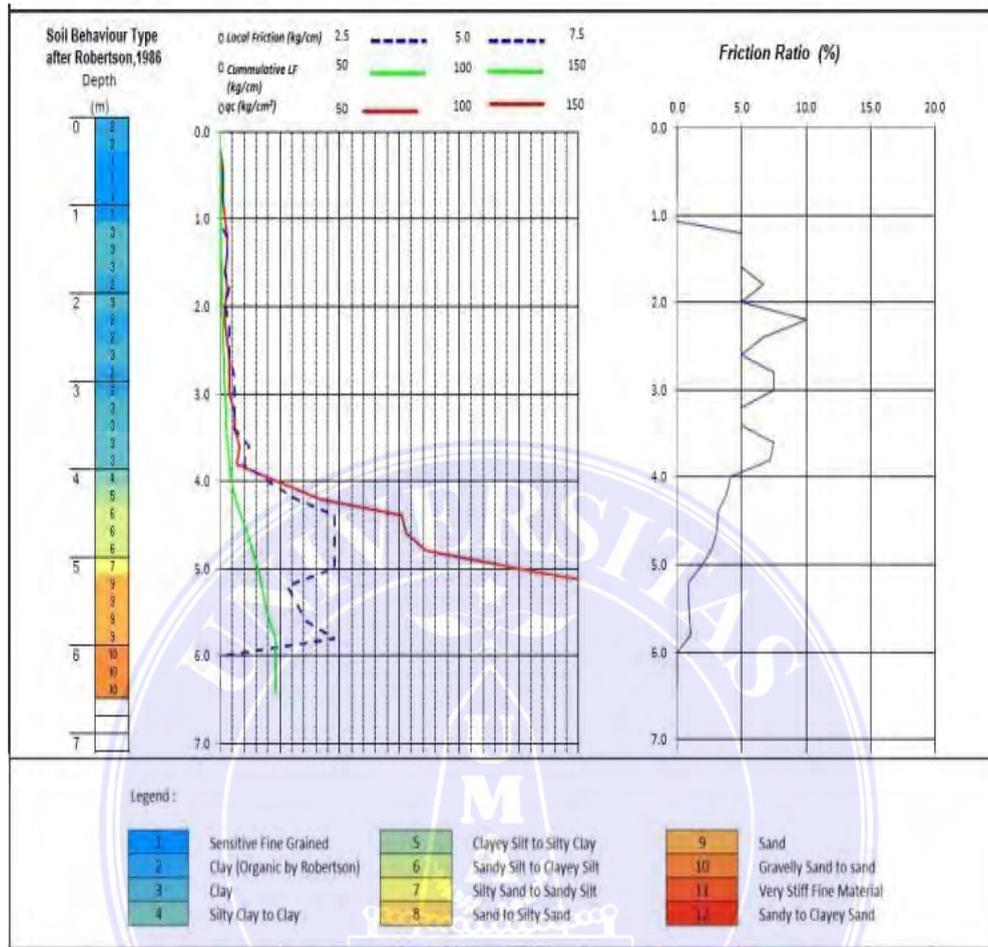
- Tahap Ketiga

Melakukan analisis sesuai dengan data – data yang diperoleh PT.Wijaya Karya (Persero) Tbk dan data yang didapat dari hasil wawancara dilapangan berdasarkan dengan sumber referensi (jurnal dan buku yang berhubungan dengan tanah) yang berhubungan dengan penulisan tugas akhir ini.

- Tahap Keempat

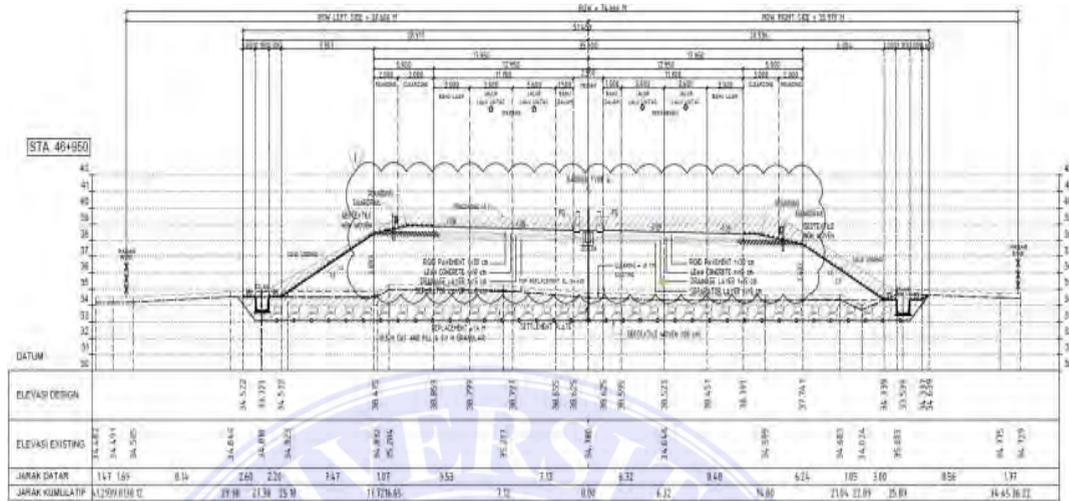
Menentukan hasil penurunan tanah yang terjadi dengan menggunakan pendekatan yang didapat dari referensi jurnal

3.4. Data Sondir



Gambar 25 Data Sondir STA 46+950 (Dokumen lapangan 2023)

3.5. Data Preloading



Gambar 26 Detail Gambar Rencana Preloading 46+950 (Dokumen Lapangan,2023)

3.6 Data Prefabricated Vertical Drain (PVD)

Spesifikasi Prefabricated Vertical Drain :

Ukuran PVD : 4,0 mm x 10,0 cm

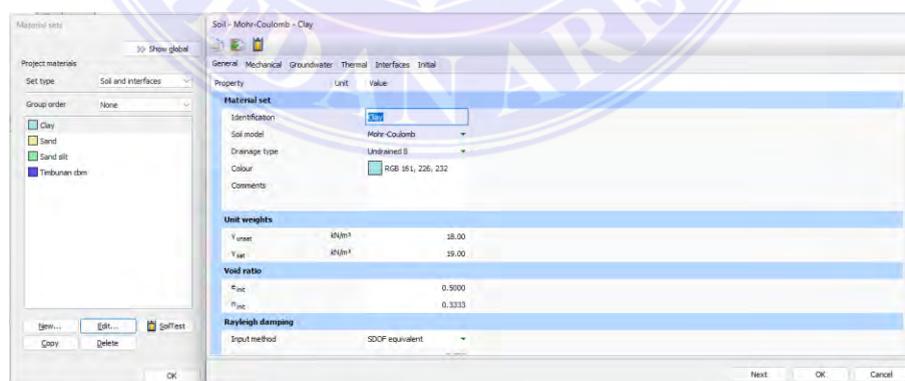
Jarak Pemasangan : 1,3 m – 1,5 m sepanjang 12 m +

Ukuran Mandrel : 12,5 cm x 5 cm

Adapun data yang diinput pada program plaxis (Data Proyek 2022)

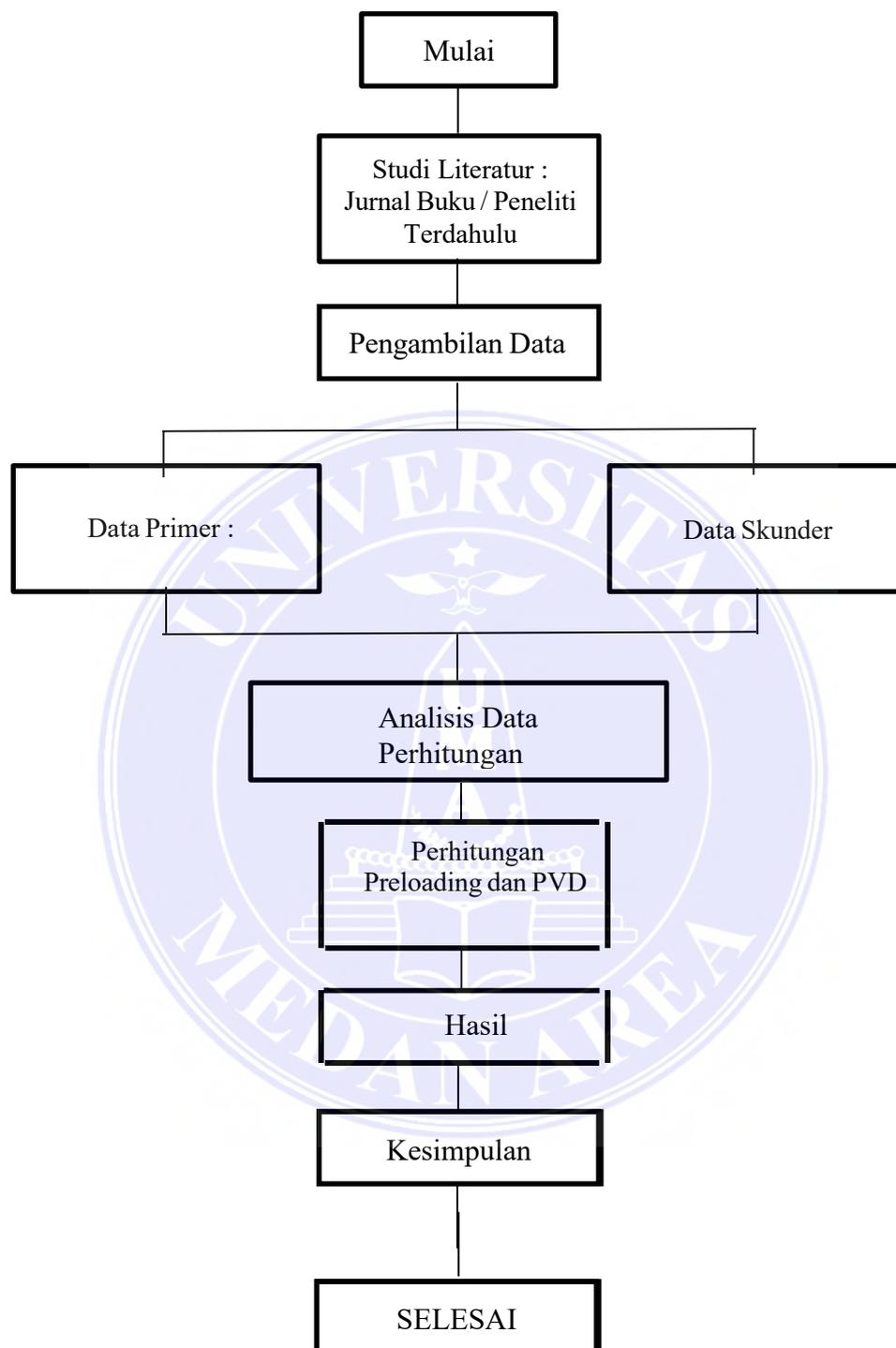
<u>Uraian</u>	<u>Unit</u>	Material Properties STA 46+950			
		<u>Timbunan</u>	<i>Clay</i>	<i>Sand Silt</i>	<i>Sand</i>
Material Model	-	<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Mohr-Coulomb</i>
<u>Kedalaman</u>	<u>Mtr</u>	3,89-0	1,4-3,8	3,8-4,8	4,8-6,4
<u>Drainage Type</u>	-	<i>Undrained</i>	<i>Undrained</i>	<i>Drained</i>	<i>Drained</i>
γ_{unsat}	kN/m ³	16	18	17	16
γ_{sat}	kN/m ³	17	19	18	17
E	kN/m ²	10030	4095	50140	323300
v (nu)		0.30	0.30	0.30	0.30
c_{ref}	kN/m ²	0	15.5	15.5	29.2
ϕ (phi)	°	40	0	20	12.89
Ψ (psi)	°	0	0	0	0
λ^* (lambda)		-	-	-	-
κ^* (kappa)		-	-	-	-
k_x	m/day	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
k_y	m/day	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
<u>Nama Lapisan</u>		<i>Preloading</i>	1	2	3

Pada pemodelan plaxis dibutuhkan input parameter – parameter tanah yang akan dimodelkan. Data – data tersebut nantinya akan di input pada program plaxis seperti gambar berikut



Gambar 26 Input material plaxis (plaxis 2020)

3.7 Kerangka Berfikir Penelitian



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis untuk pemodelan timbunan dengan metode preloading dengan kombinasi PVD dapat menggunakan perhitungan dengan plaxis 2D sebagai berikut :

1. Besar penurunan konsolidasi menggunakan metode analisis dengan pemodelan plaxis 2D menggunakan PVD diperoleh penurunan sebesar 0,864 m, Tanpa PVD 0,220 m dan pada data *settlement plate* STA 46 + 950 sebesar 0,551 m perbedaan ini dikarenakan data laboratorium tidak mewakili seluruh lapisan tanah dilapangan, dimana terdapat data yang tidak dimiliki atau didapat dari lapangan .
2. Lama waktu konsolidasi menggunakan metode analisis dengan Pemodelan Plaxis 2D menggunakan PVD diperoleh waktu 23,84 hari, Tanpa PVD diperoleh waktu 77.06 hari, dan pada data *Settlement Plate* STA 46+950 diperoleh waktu 97,69 hari . perbedaan ini dikarenakan data laboratorium tidak mewakili seluruh lapisan tanah dilapangan, dimana terdapat data yang tidak dimiliki atau didapat dari lapangan.

5.2 Saran

1. Pengambilan data tanah sebaiknya dilakukan sedekat mungkin dengan instrument settlement plate agar data yang dianalisis mewakili kondisi yang sebenarnya dilapangan.

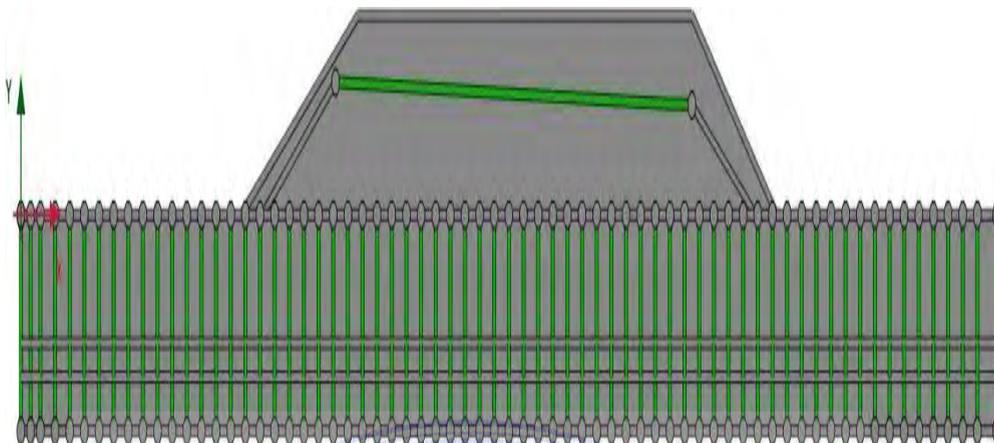
2. Pada saat running Plaxis 2D dibutuhkan data data yang lengkap sehingga disarankan agar pengujian laboratorium dilakukan selengkap mungkin disetiap lapisan tanah
3. Sebelum memulai analisis suatu pekerjaan konstruksi usahakan memiliki data – data yang diperlukan telah lengkap. Kekurangan data akan mengakibatkan kesalahan dan data yang digunakan harus jelas sumbernya.



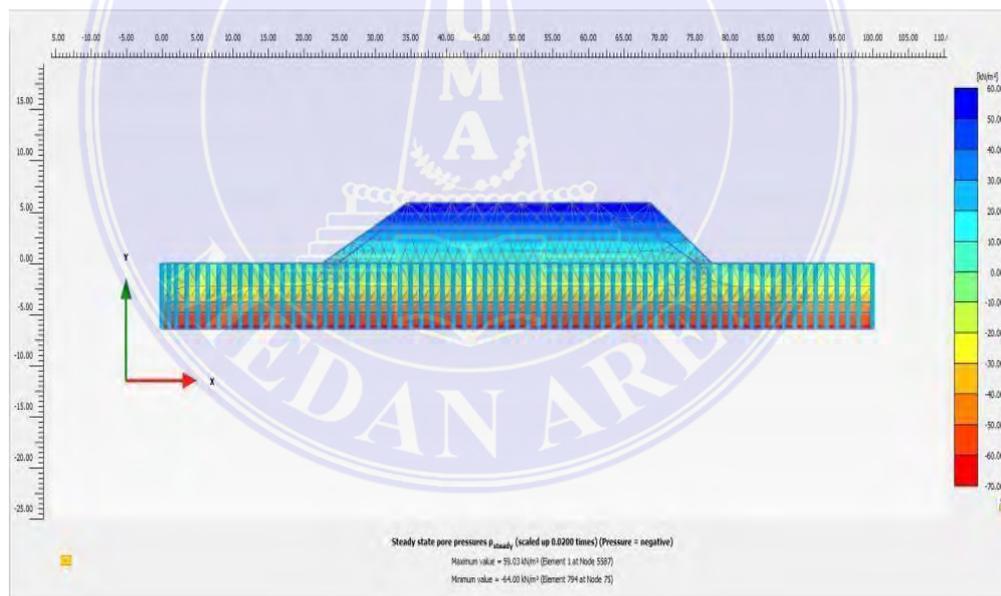
DAFTAR PUSTAKA

- Ahsan, A. D., Yanti, G., & Megasari, S. W. (2021). Analisis Penurunan Tanah Menggunakan Metode Vacuum Consolidation Dengan Variasi Jarak Pemasangan Pvd. *Konstruksia*, 13(1), 54–68.
- Adhi, Bagas Wahyu. 2022. “Analisa Stabilitas Timbunan Di Daerah Rawa Menggunakan Penanganan Limestone Dengan Software Plaxis.” *MoDuluS: Media Komunikasi Dunia Ilmu Sipil* 4(1): 40.
- Adinegoro, Chandra, Moch. Sholeh, and Dandung Novianto. 2021. “Metode Pelaksanaan Perbaikan Tanah Menggunakan Metode Preloading Dan Prefabricated Vertical Drain (Pvd) Pada Terminal Internasional Kijing Pontianak Kalimantan Barat.” *Jurnal JOS- MRK* 2(2): 158–62.
- Braja, M. Das. 2008. *Advance Soil Mechanics*.
- Das, B. M. 1995. “Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik.” *Penerbit Erlangga*: 1–300.
- Das, Braja M. 1993. “Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis.” *Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis*: 239.
- Element, T. (2022). *Analisis Konsolidasi dengan Metode Preloading dikombinasikan dengan PVD berdasarkan Perhitungan Analitis dan Plaxis 2d Baby Purba , Roesyanto , Gina Cyntia Raphita , Rudianto Surbakti Universitas Sumatera Utara , Indonesia Baby Purba , Roesyanto , Gina Cy.* 3(12).
- Putri, R., Tyagita, E., & Hayati, J. (2022). *Analisis Perbaikan Tanah Lunak Metode Preloading dan Preloading Kombinasi Prefabricated Vertical Drain (PVD) dengan Variasi Panjang PVD (Studi Kasus : Pembangunan Jalan Tol.* 2(February), 19–25.
- Ohoimas, M. Y., and Indra Noer Hamdhan. 2014. “Analisis Konsolidasi Dengan Menggunakan Metode Preloading Dan Vertical Drain Pada Areal Reklamasi Proyek Pengembangan Pelabuhan Belawan Tahap II.” *Reka Racana Jurnal Online Institut Teknologi Nasional* (x): 1–11.

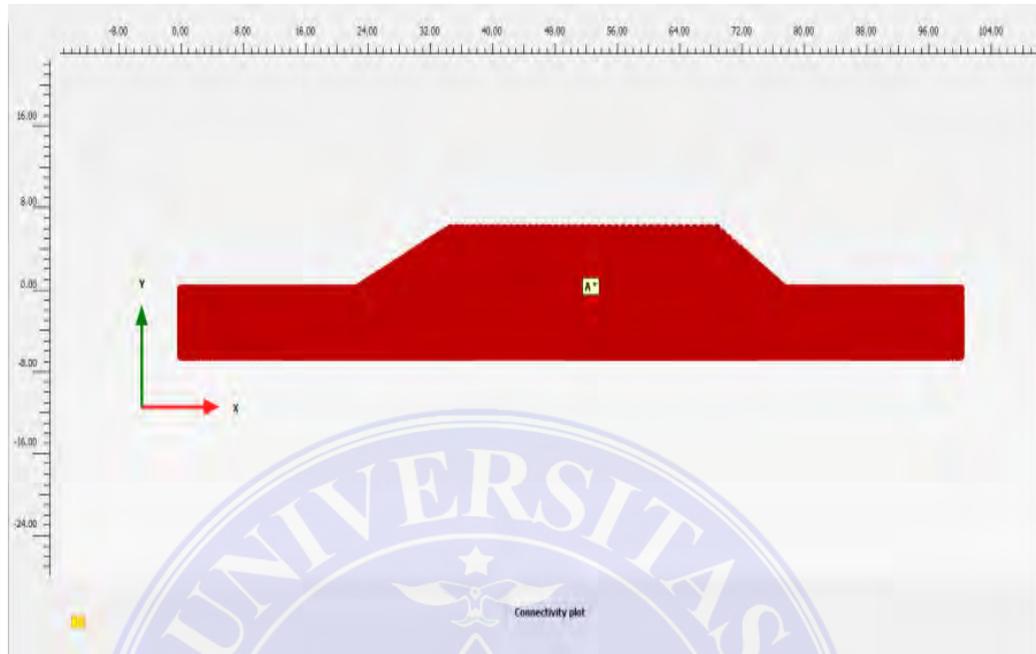
Lampiran 3. Pemodelan PVD dan *Preloading* dari *Software Plaxis*



Lampiran 4. Data tekanan yang terjadi Akibat Air tanah



Lampiran 5. Data Analisa hasil akhir yang ditinjau



Lampiran 6. Data Hasil akhir penurunan pada lokasi yang ditinjau

