**TUGAS AKHIR**

# PENGARUH KOMBINASI *PREFABRICATED VERTICAL DRAIN* (PVD) DENGAN METODE *PRELOADING* DAN METODE *VACUUM PRESSURE* TERHADAP KONSOLIDASI TANAH

## *(THE IMPACT OF COMBINING PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD) WITH PRELOADING AND VACUUM PRESSURE METHODS ON SOIL CONSOLIDATION )*

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


**Muhammad Akmal Habibi**
**18 511 253**



**PRODI TEKNIK SIPIL**
**FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN**
**UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA**

**2025**

**TUGAS AKHIR**

# PENGARUH KOMBINASI *PREFABRICATED VERTICAL DRAIN* (PVD) DENGAN METODE *PRELOADING* DAN METODE *VACUUM PRESSURE* TERHADAP KONSOLIDASI TANAH
# *(THE IMPACT OF COMBINING PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD) WITH PRELOADING AND VACUUM PRESSURE METHODS ON SOIL CONSOLIDATION )*

Disusun Oleh

**Muhammad Akmal Habibi**
**18511253**

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

Diuji pada Tanggal 24 Februari 2025

Oleh Dewan Penguji :

| Pembimbing I | Penguji I | Penguji II |
|---|---|---|
| Anisa Nur A., S.T., M.Eng. | Hanindya Kusuma. A., S.T., M.T | Shofwatul F. S.T.P., M.Eng. |
| NIK: 215111305 | NIK: 045110407 | NIK: 215111308 |

Mengesahkan
Ketua Program Studi Teknik Sipil

10/3 2025

Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.
NIK: 095110101

# PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Dengan ini saya menyatakan bahwa sesungguhnya laporan tugas akhir yang saya susun sebagai syarat untuk menyelesaikan strata sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya sendiri. Bagian-bagian dalam penulisan yang merupakan kutipan dari hasil karya pihak lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila dikemudian hari ditemukan adanya plagiarisme atau bukan merupakan hasil karya tulis saya sendiri, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 18 Februari 2025

Oleh pembuat pernyataan,

Muhammad Akmal Habibi

(18511253)

# KATA PENGANTAR

*Assalamualaikum warahmatullah wabarakatuh.*

*Alhamdulillah,* puji syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat dan limpahan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul Pengaruh Kombbinasi *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* dengan Metode *Preloading* dan Metode *Vacuum Pressure* Terhadap Konsolidasi Tanah. Shalawat dan salam tak lupa dihaturkan kepada junjungan, Nabi Agung Muhammad SAW. Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi Tingkat strata satu di Prodi Teknik Sipil , Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Banyak hambatan dan ujian dalam Menyusun dan menyelesaikan tugas akhir ini, namun *Alhamdulillah* berkat Rahmat Allah SWT, dan pertolongannya melalui berbagai kritik , saran, dan dorongan semangat dari berbagai pihak, Tugas akhir ini dapat diselesaikan. Berkaitan dengan hal tersebut, penulis mengucapkan terima kasih kepada beberapa pihak diantaranya sebagai berikut.

1. Ibu Anisa Nur Amalina, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan arahan dan bimbingan, motivasi dan pembelajaran, serta nasihat baik sehingga membangkitkan semangat dalam menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
2. Bapak Ir. Akhmad Marzuko, M.T. yang pernah menjadi dosen pembimbing penulis dan membagikan ilmu, semangat, dan kedisipilinannya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik
3. Seluruh dosen pengajar dan para staf dan karyawan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan yang telah membagikan ilmu dan pengalaman yang tak ternilai serta memberikan fasilitas terbaik selama masa perkuliahan.
4. Ayah dan Ibu penulis, Bapak Taufikurohman (Alm.) dan Ibu Dewi Masitoh Yuliati yang telah memberikan ridha, do'a, dan dukungan tiada henti hingga penulis dapat menyelesaikan pendidikan strata pertama, terimakasih atas curahan kasih sayang dan kesabaran dalam mendidik dan membesarkan penulis.

5. Kakek tercinta, Ir H M Muchsan dan Paman tercinta Bp Lukman Al-Hakim, serta Bibi tercinta Ibu Nuria Zuhria yang telah berbesar hati, memberikan semangat, dana dan fasilitas sehingga penulis dapat menempuh pendidikan di Universitas Islam Indonesia hingga selesai. Terimakasih atas segala dukungan yang tak ternilai.
6. Terimakasih kepada kakak dan adik-adik tercinta, Kak Anisa dan Kak Sujadi , Bimo dan Rayhan, serta kakak dan adik-adik Sepupu dan seluruh keluarga besar yang selalu mendoakan dan menanyakan kabar tentang kelulusan, memberikan semangat dan doa.
7. Terimakasih kepada teman-teman Tim Lillahita'ala, teman-teman Ruang Kolaborasi, dan teman-teman Teknik Sipil Angkatan 2018 yang selalu memberikan dukungan dan doa semasa perkuliahan hingga penyelesaian tugas akhir ini.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, penulis mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya.

Akhirnya penulis berharap agar tugas akhir yang telah disusun ini menjadi manfaat bagi berbagai pihak yang membacanya dikemudian hari.

Yogyakarta, 18 Februari 2025

Muhammad Akmal Habibi
(18511253)

# DAFTAR ISI


HALAMAN JUDUL i

HALAMAN PENGESAHAN ii

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI iii

KATA PENGANTAR iv

DAFTAR ISI vi

DAFTAR TABEL ix

DAFTAR GAMBAR xi

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN xiii

ABSTRAK xv

*ABSTRACT* xvi

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 3

1.3 Tujuan Penelitian 3

1.4 Manfaat Penelitian 4

1.5 Batasan Masalah 4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 6

2.1 Umum 6

2.2 Penelitian Terdahulu 6

2.3 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang 8

BAB III LANDASAN TEORI 12

3.1 Tanah 12

3.2 Klasifikasi Tanah 12
3.2.1 Sistem Klasifikasi USCS 13
3.3 Tanah Lunak 15
3.4 Penurunan tanah 16
3.4.1 Penurunan Segera/*Immediate Settlement* (Si) 16
3.4.2 Penurunan Konsolidasi Primer 16
3.4.3 Penurunan Konsolidasi Sekunder 20
3.5 Konsolidasi tanah 20
3.5.1 Konsolidasi Satu Dimensi 21
3.6 Parameter Penurunan Tanah 23
3.6.1 Indeks Kompresi Tanah ($C_c$) 23
3.6.2 Koefisien konsolidasi vertikal (Cv) 24
3.6.3 Koefisien konsolidasi *horizontal* (Ch) 24
3.6.4 Faktor waktu *horizontal* (Th) 25
3.6.5 Derajat konsolidasi (arah *horizontal*) (Uh) 25
3.6.6 Derajat konsolidasi tanah (U) 25
3.7 Perbaikan Tanah 26
3.7.1 Metode *Preloading* 26
3.7.2 *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* 27
3.7.3 Vacuum Consolidation 30
3.8 *PLAXIS 2D* 31
BAB IV METODE PENELITIAN 35
4.1 Lokasi Penelitian 35
4.2 Alat 35
4.3 Prosedur Analisis 36

4.3.1 Pengumpulan data 36
4.3.2 Analisis data 38
4.3.3 Pemodelan 39
4.4 Bagan Alir 40
BAB V PEMBAHASAN 41
5.1 Umum 41
5.2 Data Penelitian 41
5.3 Analisis Perhitungan Metode Analitik 43
5.3.1 Menentukan Propertis Awal 43
5.3.2 Perhitungan Penurunan Konsolidasi Primer Metode Terzaghi 45
5.3.3 Perhitungan Derajat Konsolidasi Metode *Preloading* 47
5.3.4 Perhitungan Derajat Konsolidasi Metode *Preloading* Menggunakan PVD 48
5.4 Analisis Menggunakan *Software PLAXIS 2D* 52
5.4.1 Analisis Konsolidasi Tanah Metode *Preloading* dengan Program *PLAXIS 2D* 53
5.4.2 Analisis Konsolidasi Tanah Menggunakan PVD dengan Program *PLAXIS 2D* 56
5.5 Pembahasan 62
BAB VI KESIMPULAN 65
6.1 Kesimpulan 65
DAFTAR PUSTAKA 66

# DAFTAR TABEL


Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Sekarang 9

Tabel 3.1 Sistem Klasifikasi Tanah *Unified (USCS)* 14

Tabel 3.2 Persyaratan Teknis Material PVD 27

Tabel 3.3 Hubungan Angka Poisson dengan Jenis Tanah dan Konsistensi 33

Tabel 3.4 Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas 33

Tabel 4.1 Hasil Pengujian N-SPT di Lapangan 36

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Laboratorium 37

Tabel 4.3 Klasifikasi Tanah Berdasarkan USCS 37

Tabel 5.1 Parameter Tanah Eksisting pada BHL-04 42

Tabel 5.2 Rekapitulasi Perhitungan Nilai $P_0$ 43

Tabel 5.3 Rekapitulasi Perhitungan Nilai Cc 44

Tabel 5.4 Rekapitulasi Perhitungan Penurunan Tanah Konsolidasi Primer 47

Tabel 5.5 Rekapitulasi Perhitungan Derajat Konsolidasi Metode *Preloading* 48

Tabel 5.6 Rekapitulasi Perhitungan Derajat Konsolidasi Metode *Preloading* Menggunakan PVD Pola Segiempat dan Jarak 1 m 51

Tabel 5.7 *Input* Parameter Program PLAXIS 2D 52

Tabel 5.8 Langkah Analisis Konsolidasi Tanah Metode *Preloading* dengan Program *PLAXIS 2D* 53

Tabel 5.9 *Phase* pada Staged Construction Kondisi Timbunan Tanpa PVD Program *PLAXIS 2D* 54

Tabel 5.10 Langkah Analisis Konsolidasi Tanah Kondisi Timbunan + PVD Program *PLAXIS 2D* 56

Tabel 5.11 *Phase* pada Staged Construction Kondisi Timbunan + PVD Program *PLAXIS 2D* 57

Tabel 5.12 Langkah Analisis Konsolidasi Tanah Kondisi Vacuum Pressure + PVD Program *PLAXIS 2D* 59

Tabel 5.13 *Phase* pada Staged Construction Kondisi *Vacuum Pressure* + PVD Program *PLAXIS 2D* 60

Tabel 5.14 Rekapitulasi Perhitungan Analisis Konsolidasi Tanah 62

# DAFTAR GAMBAR


Gambar 1.1 Peta Distribusi Tanah Lunak di Indonesia 1

Gambar 3.1 Metode Cassagrande pada Grafik e – log P’ 18

Gambar 3.2 Faktor Pengaruh Akibat Beban Timbunan (Osterberg, 1957) 20

Gambar 3.3 Model Konsolidasi Satu Dimensi (Terzaghi) 21

Gambar 3.4 Grafik Hubungan Antara Waktu dengan Pemampatan Selama Konsolidasi 22

Gambar 3.5 Modifikasi Jarak Tempuh Air dengan Keberadaan PVD 28

Gambar 3.6 Transformasi Penampang PVD 29

Gambar 3.7 Pola PVD (Kiri Pola Bujur Sangkar, Kanan Pola Segitiga) 30

Gambar 3.8 Ilustrasi Sistem *Vacum Consolidation* 31

Gambar 4.1 Gambar Eksisting Area Reklamasi Proyek Nickel Smelter 35

Gambar 4.2 Bagan Alir Penelitian 40

Gambar 5.1 Gambar Titik BHL. 04 Area Reklamasi Proyek Nickel Smelter 41

Gambar 5.2 Grafik Derajat Konsolidasi terhadap Waktu Metode *Preloading* (tanpa PVD) 48

Gambar 5.3 Pola Pemasangan PVD Square Pattern 49

Gambar 5.4 Grafik Derajat Konsolidasi terhadap Waktu Metode *Preloading* dengan PVD 51

Gambar 5.5 Permodelan pada *PLAXIS 2D* Kondisi Timbunan Tanpa PVD 55

Gambar 5.6 *Deformed Mesh* Kondisi Beban Timbunan Tanpa PVD pada Program *PLAXIS 2D* 55

Gambar 5.7 *Total Displacement* Berdasarkan Bidang Gelincir Kondisi Beban Timbunan Tanpa PVD pada Program *PLAXIS 2D* 55

Gambar 5.8 Permodelan pada *PLAXIS 2D* Kondisi Timbunan + PVD *Square Pattern* Jarak Pemasangan 1 m 58

Gambar 5.9 *Deformed Mesh* Kondisi Beban Timbunan + PVD pada Program *PLAXIS 2D* 58

Gambar 5.10 *Total Displacement* Berdasarkan Bidang Gelincir Kondisi Beban Timbunan + PVD pada Program *PLAXIS 2D* 58

Gambar 5.11 Permodelan pada *PLAXIS 2D* Kondisi *Vacum Pressure* dengan *Line Load* + PVD *Square Pattern* Jarak Pemasangan 1 m 61

Gambar 5.12 *Deformed Mesh* Kondisi *Vacum Pressure* dengan *Line Load* + PVD pada Program *PLAXIS 2D* 61

Gambar 5.13 *Total Displacement* Bidang Gelincir Kondisi *Vacum Pressure* dengan *Line Load* + PVD pada Program *PLAXIS 2D* 61

Gambar 5.14 Diagram Perbandingan Waktu Konsolidasi 90% Perhitungan Manual 63

Gambar 5.15 Diagram Perbandingan Waktu Konsolidasi 90% Perhitungan Program *PLAXIS 2D* 63

# DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

OCR = *Overconsolidation Ratio*

*MEPP* = *Minimum Excess Pore Pressure*

$S_i$ = *Immediate Settlement* (m)

$S_p$ = *Primary Settlement* (m)

$S_s$ = *Secondary Consolidation Settlement* (m)

$q_0$ = Beban timbunan ($kN/m^2$)

I = Koefisien pengaruh

$h_i$ = Tebal lapisan ke-i (m)

$E_i$ = Modulus elastisitas lapisan ke-i ($kN/m^2$)

$C_s$ = Indeks pemampatan kembali [$C_s = (0.2)C_c$] ($m^2$/hari)

$C_c$ = Indeks kompresi tanah ($m^2$/hari)

H = Tebal lapisan tanah (m)

$e_0$ = Angka pori awal

$P_c'$ = Tekanan prakonsolidasi ($kN/m^2$)

$P_o$ = Tekanan *overburden* efektif ($kN/m^2$)

$\Delta P$ = Tambahan tegangan vertikal ($kN/m^2$)

$e_p$ = Angka pori pada saat kondisi primer selesai

H = Tebal lapisan tanah yang ditinjau (m)

$T_v$ = Faktor waktu konsolidasi vertikal *(*hari*)*

t = Waktu Konsolidasi *(*hari*)*

$H_{dr}$ = Panjang aliran = 0,5 H (m)

$C_v$ = Koefisien Konsolidasi vertikal ($m^2$/hari)

LL = Batas cair tanah (%)

k = Koefisien permeabilitas tanah ($m^2$/hari)

$\gamma_w$ = Berat jenis air ($kN/m^3$)

$H_R$ = Tinggi rencana timbunan (m)

q = Beban rencana ($kN/m^2$)

Th = Faktor waktu konsolidasi *horizontal*/*radial (*hari*)*

Ch = Koefisien konsolidasi arah *horizontal*/*radial* ($m^2$/hari)

De = Diameter jangkauan PVD (m)

F(n) = Faktor hambatan akibat jarak PVD (m)

D = Diameter jangkauan kerja PVD (m)

Dw = Diameter lingkaran ekuivalen PVD (m)

U = Derajat konsolidasi rata-rata (%)

Uv = Derajat konsolidasi arah vertikal (%)

Uh = Derajat konsolidasi arah *horizontal*/*radial* (%)

$\gamma_{tmb}$ = Berat volume tanah timbunan ($kN/m^3$)

dw = Diameter PVD (m)

p = Panjang penampang PVD (m)

l = Lebar penampang PVD (m)

De = Diameter ekuivalen penampang PVD (m)

S’ = *Spacing*/jarak antar PVD (m)

$\varphi$ = Sudut geser dalam ($^o$)

$\pi$ = Nilai *phi ($\pi$ = 3,14159)*

# ABSTRAK

Tanah lunak memiliki kadar air tinggi dan nilai permeabilitas rendah. Angka pori yang tinggi menyebabkan kompresibilitas tinggi sehingga apabila tanah lunak diberi beban, maka air dan udara yang mengisi pori-pori tanah tersebut akan keluar. Hal tersebut menyebabkan terjadinya penurunan tanah. Pada penelitian ini, dilakukan penelitian pada tanah lunak di lokasi pembangunan *nickel smelter* yang dibangun di atas tanah reklamasi dan terletak di hutan pesisir, di pesisir laut Teluk Balikpapan, Balikpapan, Provinsi Kalimantan Timur. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai penurunan tanah dan waktu konsolidasi pada tanah terkonsolidasi 90%.

Penelitian ini menggunakan perhitungan analitis dan program *PLAXIS 2D* dengan metode *preloading* (konvensional), kombinasi metode *preloading* dan *prefabricated vertical drain* (PVD), dan kombinasi metode *vacuum pressure* dan PVD. Pada metode *preloading* dilakukan dengan memberikan beban awal berupa tanah timbunan setinggi elevasi rencana tanpa dilakukan pemasangan PVD. Metode *preloading* dan PVD dilakukan dengan penambahan PVD pada metode *preloading.* Metode *vacuum pressure* dan PVD dilakukan dengan memberikan pembebanan vakum terlebih dahulu sebelum dilakukan penimbunan tanah timbunan di atas tanah dasar eksisting. Dari analisis ketiga metode, didapatkan nilai penurunan tanah dan waktu konsolidasi pada kondisi tanah terkonsolidasi 90%.

Hasil penelitian pada tanah lunak eksisting di lokasi proyek dengan perbaikan tanah menggunakan *prefabricated vertical drain* (PVD) terbukti mampu mempercepat proses konsolidasi. Besar penurunan tanah pada saat konsolidasi 90% pada perhitungan *PLAXIS 2D*, metode konvensional *(preloading)* adalah sebesar 0,495 m dengan waktu 1038 hari, kemudian metode *preloading* dengan PVD adalah sebesar 0,3 m dengan waktu 37 hari, dan kondisi metode *vacuum pressure* dengan PVD adalah sebesar 0,3 m dengan waktu 11 hari. Penggunaan PVD pada metode *preloading* dan *vacuum pressure* mampu mempercepat waktu konsolidasi.

Kata kunci : *preloading*, *vacuum pressure*, *prefabricated vertical drain* (PVD), penurunan tanah, waktu konsolidasi

# *ABSTRACT*

*Soft soil has a high water content and low permeability. Its high void ratio results in high compressibility, meaning that when subjected to a load, the water and air filling the soil pores are expelled, leading to soil settlement. This study focuses on soft soil conditions at the nickel smelter construction site, which is built on reclaimed land in a coastal forest area along the Balikpapan Bay, Balikpapan, East Kalimantan Province. The objective of this research is to determine the settlement value and consolidation time required for the soil to reach 90% consolidation.*

*This study employs analytical calculations and PLAXIS 2D simulations, comparing three ground improvement methods: preloading, a combination of preloading and prefabricated vertical drains (PVD), and a combination of vacuum pressure and PVD. The preloading method involves applying an initial load using embankment soil at the planned elevation without PVD installation. The preloading + PVD method incorporates PVDs into the preloading process to enhance drainage and consolidation. The vacuum pressure + PVD method applies vacuum pressure before the embankment is placed over the existing ground, further accelerating soil consolidation.*

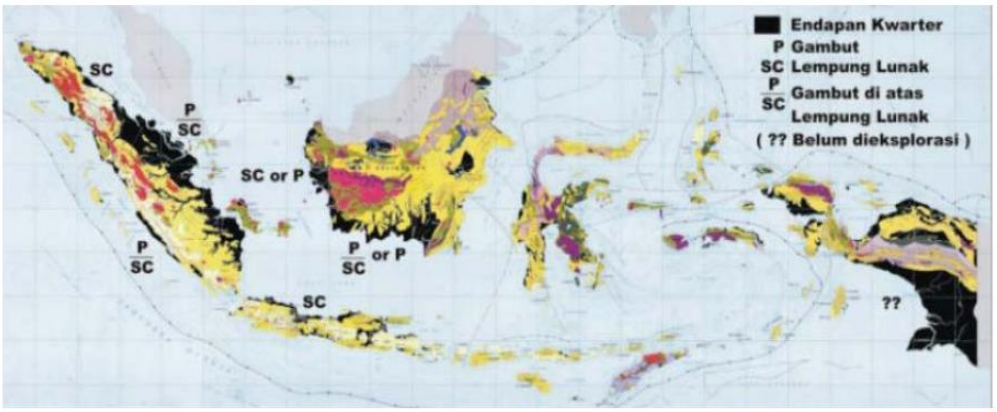
*The results indicate that using PVDs significantly accelerates the consolidation process. Based on PLAXIS 2D simulations at 90% consolidation, the settlement and time required for each method are conventional preloading is 0,495 m of settlement in 1038 days, preloading + PVD is 0,3 m of settlement in 37 days, vacuum pressure + PVD is 0.3 m of settlement in 11 days. The findings confirm that incorporating PVDs in both preloading and vacuum pressure methods effectively reduces consolidation time.*

*Keywords: preloading, vacuum pressure, prefabricated vertical drain (PVD), soil settlement, consolidation time*

# BAB I
# PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Geoteknik merupakan objek yang penting dalam proses perencanaan konstruksi di bidang teknik sipil. Aspek penting dalam geoteknik yang perlu di analisa salah satunya adalah aspek daya dukung tanah. Daya dukung tanah menjadi kunci dasar dalam perencanaan konstruksi. Namun tidak menutup kemungkinan, karakteristik tanah pada lokasi proyek tidak cukup untuk memenuhi standar desain konstruksi. Hal ini dapat terjadi dikarenakan karakteristik tanah di lokasi proyek merupakan tanah lunak. Di Indonesia, mayoritas jenis tanah merupakan tanah lunak, hal ini seperti yang tertera pada Gambar 1.1 berikut.




**Gambar 1.1 Peta Distribusi Tanah Lunak di Indonesia**
(Sumber : Pedoman Kimpraswil No: Pt T-8-2002-B)

Tanah lunak memiliki karakteristik tanah yang buruk (Chairullah, 2011). Tanah tersebut memiliki tingkat permeabilitas rendah, dan kompresibilitas tinggi. Kadar air yang tinggi dalam tanah lunak menjadi salah satu faktor yang menyebabkan tanah tersebut memiliki daya dukung rendah. Angka pori yang tinggi dalam tanah lunak menyebabkan kompresibilitas tinggi, sehingga apabila diberi beban maka air dan udara yang mengisi pori-pori tanah tersebut akan keluar. Hal tersebut menyebabkan terjadinya pemampatan tanah yang menandakan adanya penurunan tanah (Gunasro, 2017).

Untuk merencanakan tindakan perbaikan tanah, tentu membutuhkan analisis terhadap penurunan tanah dan waktu konsolidasi. Hal ini bertujuan untuk mengetahui besar penurunan tanah yang dicapai hingga konsolidasi sembilan puluh persen, dan waktu yang dibutuhkan untuk proses tersebut. Penurunan tanah eksisting yang sangat besar dengan waktu yang relatif lama dapat menimbulkan permasalahan dikemudian hari dalam pembangunan infrastruktur di atas tanah lunak kondisi jenuh, baik tanah jenis gambut maupun tanah lempung.

Untuk memperbaiki permasalahan tanah tersebut, metode yang umum digunakan di lapangan diantaranya adalah kombinasi antara pemasangan *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* dengan metode *preloading*, atau dengan metode vakum menggunakan *vacuum pressure*. Pemasangan PVD mampu mempercepat proses konsolidasi, dikarenakan PVD dapat mengalirkan air yang terdisipasi saat proses konsolidasi. PVD mengalirkan air secara vertikal ke atas dan dialirkan menuju drainase *horizontal*. Perlu diperhatikan bahwa saat pemasangan PVD, alat yang digunakan (mandrel) dapat merusak daerah tanah disekitarnya sehingga mempengaruhi koefisien permeabilitas *horizontal* dari tanah sehingga mengurangi laju air yang masuk ke PVD.

*Vacuum pressure consolidation* merupakan metode yang menggunakan teknik penghisapan vakum terisolir untuk mengurangi tekanan air pori dari dalam tanah. Metode ini dinilai mampu meningkatkan tegangan efektif tanpa merubah tegangan total. Metode ini dapat membantu tanah mencapai penurunan yang lebih besar dengan waktu konsolidasi yang lebih cepat, sehingga tanah mencapai kestabilan dan menjadi kuat ketika menerima beban di atasnya (Puspita, 2017). Metode pembebanan awal atau *preloading method* merupakan metode yang dilakukan untuk mengkonsolidasi lapisan tanah lunak dengan pembebanan yang sama atau lebih besar dari beban yang akan dipikul oleh tanah, baik saat maupun setelah konstruksi (Purba, 2022).

Objek yang ditinjau pada penelitian ini adalah tanah pada proyek pembangunan *nickel smelter* yang berlokasi di area hutan pesisir, di pesisir laut Teluk Balikpapan, Kabupaten Balikpapan, Provinsi Kalimantan Timur. Tanah yang digunakan untuk reklamasi merupakan tanah perbukitan yang berasal dari

Kalimantan Timur. Dalam proyek reklamasi ini, dibutuhkan proses konsolidasi tanah untuk menstabilkan dan memadatkan tanah timbunan sehingga layak untuk dibangun konstruksi diatasnya. Pada penelitian ini, peneliti mencoba untuk membandingkan antara proses konsolidasi dengan metode *preloading*, metode *preloading* + pemasangan PVD dan proses konsolidasi dengan metode *vacum pressure* + pemasangan PVD. Analisis dalam penelitian ini menggunakan teori perhitungan analitis Terzaghi, dan program *PLAXIS 2D*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai penurunan tanah dan waktu konsolidasi 90% pada masing-masing metode dan kombinasi di dalam konteks proyek reklamasi pada pembangunan *nickel smelter*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan bagi mahasiswa teknik sipil dan masyarakat dalam pelaksanaan proses konsolidasi tanah.

### 1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana nilai penurunan tanah dan waktu konsolidasi akibat beban timbunan tanpa perbaikan tanah pada tanah terkonsolidasi 90% menggunakan perhitungan analitis dan program *PLAXIS 2D*?
2. Bagaimana nilai penurunan tanah dan waktu konsolidasi dengan menggunakan *preloading method* yang dikombinasikan dengan PVD pada tanah terkonsolidasi 90% menggunakan metode analitis (Metode Terzaghi) dan program *PLAXIS 2D*?
3. Bagaimana nilai penurunan tanah dan waktu konsolidasi menggunakan metode *vacuum pressure* dengan PVD pada tanah terkonsolidasi 90% menggunakan Program *PLAXIS 2D*?
4. Bagaimana perbandingan antara kondisi tanah tanpa dilakukan perbaikan, dengan kombinasi Metode *preloading* dengan PVD, dan kombinasi metode *Vacuum Pressure* dengan PVD?

### 1.3 Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui nilai penurunan tanah dan waktu konsolidasi akibat beban timbunan tanpa perbaikan tanah pada tanah terkonsolidasi 90% menggunakan perhitungan analitis dan program *PLAXIS 2D*?

2. Untuk mengetahui nilai penurunan tanah dan waktu konsolidasi dengan menggunakan *Preloading Method* yang dikombinasikan dengan PVD pada tanah terkonsolidasi 90% menggunakan metode analitis (Metode Terzaghi) dan Program *PLAXIS 2D*?
3. Untuk mengetahui nilai penurunan tanah dan waktu konsolidasi menggunakan metode *Vacuum Pressure* dengan PVD pada tanah terkonsolidasi 90% menggunakan Program *PLAXIS 2D*?
4. Untuk mengetahui perbandingan antara kondisi tanah tanpa dilakukan perbaikan, perbaikan dengan kombinasi Metode *Preloading* dengan PVD, dan kombinasi Metode *Vacuum Pressure* dengan PVD?

### 1.4 Manfaat Penelitian

1. Dapat mengetahui nilai penurunan tanah dan waktu konsolidasi akibat beban timbunan tanpa perbaikan tanah menggunakan perhitungan analitis dan program *PLAXIS 2D*?
2. Dapat mengetahui nilai penurunan tanah dan waktu konsolidasi dengan menggunakan *Preloading Method* yang dikombinasikan dengan PVD pada tanah terkonsolidasi 90% menggunakan metode analitis (Metode Terzaghi) dan Program *PLAXIS 2D*?
3. Dapat mengetahui nilai penurunan tanah dan waktu konsolidasi menggunakan metode *Vacuum Pressure* dengan PVD pada tanah terkonsolidasi 90% menggunakan Program *PLAXIS 2D*?
4. Dapat mengetahui perbandingan antara kondisi tanah tanpa dilakukan perbaikan, perbaikan dengan kombinasi Metode *Preloading* dengan PVD, dan kombinasi Metode *Vacuum Pressure* dengan PVD?

### 1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah diperlukan agar penelitian dapat dilakukan secara fokus terhadap permasalahan serta sesuai dengan tujuan penelitian. Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Proyek ini berlokasi di area hutan tergenang air, di pesisir Laut Teluk Balikpapan, Balikpapan Barat, Balikpapan, Kalimantan Timur

2. Metode perbaikan tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah kombinasi antara *preloading* dengan PVD menggunakan perhitungan analitis (Metode Terzaghi) dan pemrograman *PLAXIS 2D V21*, serta kombinasi antara *vacuum pressure* dengan PVD menggunakan program *PLAXIS 2D V21*.
3. Pada penelitian ini tidak memperhitungkan stabilitas lereng dan efisiensi biaya antara metode-metode tersebut diatas.

# BAB II
# TINJAUAN PUSTAKA

## 2.1 Umum

Di alam, tanah merupakan campuran butiran-butiran mineral dengan atau tanpa kandungan bahan organik, yang berasal dari pelapukan batuan melalui proses secara fisik maupun kimia. Tanah terdiri dari 3 komponen, udara-air-bahan padat. Udara dianggap tidak mempengaruhi teknis, sedangkan air sangat mempengaruhi sifat-sifat teknis tanah. Sifat-sifat teknis pada tanah lempung atau tanah kohesif yang perlu diperhatikan seperti kadar air tanah, berat volume kering dan angka pori, kuat geser, konstitensi, sensitifitas, kompresibilitas, serta sifat kembang susut tanah. (Hardiyatmo, 2019).

## 2.2 Penelitian Terdahulu

Untuk penelitian yang akan dilakukan, peneliti menyertakan beberapa acuan yang berasal dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan oleh pihak lain sebelumnya sebagai berikut.

Ali, (2020) dalam studinya melakukan penelitian tentang penurunan tanah yang terjadi di lokasi proyek pembangunan Jalan Tol Kapal Betung, Sumatera Selatan. Peneltian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh pemasangan PVD terhadap penurunan dan waktu konsolidasi tanah yang dikombinasikan baik dengan metode *preloading* maupun dengan metode *vacuum pressure*. Analisis stabilitas timbunan dan tanah dasar menggunakan program *PLAXIS 2D*. Variasi pola pemasangan PVD dilakukan dengan menyesuaikan metode yang dipilih, yaitu pola segi tiga untuk metode *preloading* dan pola segi empat untuk metode vakum. Dari hasil analisa, didapatkan waktu konsolidasi alami selama 35 tahun. Waktu konsolidasi menjadi semakin cepat setelah dipasang PVD menjadi 10 minggu, PVD + *preloading* setinggi 10 m menjadi 126 hari, dan PVD + *preloading* setinggi 7 m + vakum menjadi 14 hari. Kesimpulannya, metode vakum dinilai lebih efisien dikarenakan waktu konsolidasi lebih cepat dan mengurangi tinggi timbunan *preloading* secara signifikan.

Atmaja (2021) dalam studinya melakukan penelitian tentang analisis penurunan dan waktu konsolidasi tanah yang berlokasi di jalan Raya Klampok, Wanasari, Tegal, Jawa Tengah. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung dan menganalisis waktu konsolidasi serta nilai penurunan tanah pada derajat konsolidasi 90%, dengan menggunakan dua model yaitu metode *preloading* dengan PVD dan tanpa PVD, kemudian membandingkan hasil antara perhitungan manual dengan program *PLAXIS 2D*. Hasil Analisa menunjukkan bahwa penururnan tanah pada konsolidasi 90% dengan metode *preloading* tanpa PVD menggunakan perhitungan manual selama 54 tahun adalah 0,154 m dan 0,205 m dalam perhitungan *PLAXIS 2D*. Metode *preloading* + PVD, nilai tersebut menjadi 0,155 m dalam perhitungan manual selama 57 hari dan 0,208 m dalam program *PLAXIS 2D* selama 43 hari.

Daun (2022) dalam studinya melakukan penelitian tanah lunak pada Jalan Tol Palembang-Indralaya, lebih tepatnya terletak di Kabupaten Ogan Komering Ilir, Sumatera Selatan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan waktu konsolidasi dan nilai penurunan tanah. Metode yang digunakan adalah metode konsolidasi menggunakan PVD yang dikombinasikan dengan mesin *vacuum pressure* dan metode *preloading* dengan PVD untuk mempercepat konsolidasi tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi antara PVD dan vakum mampu mempercepat waktu konsolidasi. Dari penelitian ini didapatkan hasil penurunan tanah pada konsolidasi 90% sebesar 0,387 m selama 47 hari dengan pola pemasangan PVD efektif adalah segitiga berjarak 1 m. apabila konsolidasi tanpa PVD, dibutuhkan waktu konsolidasi selama 21,9 tahun.

Lubis, (2023) dalam studinya melakukan penelitian konsolidasi tanah pada Proyek Reklamasi di Samping Tangki CPO antar Pulau Belawan. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisa angka penurunan konsolidasi tanah dengan menggunakan metode analitis dan permodelan *PLAXIS 2D*, membandingkan antara penggunaan metode *preloading* dengan penggunaan *preloading* yang dikombinasikan dengan PVD. Dari hasil analisis, didapatkan penurunan tanah akibat konsolidasi dengan perhitungan analitis sebesar 1,254 m dan dengan *PLAXIS 2D* sebesar 1,268 m. Dalam kurun waktu yang sama sebesar 240 hari, penurunan

konsolidasi dengan *preloading* sebesar 0,419m, sedangkan penurunan konsolidasi dengan *preloading* + PVD sebesar 1,268 m.

Susiazti, (2020) dalam studinya melakukan penelitian konsolidasi tanah pada pembangunan Jalan Tol Balikpapan-Samarinda. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung besar dan waktu penurunan tanah dengan menggunakan kombinasi metode *preloading* dengan *prefabricated vertical drain* (PVD) dan menentukan jarak pemasangan PVD yang efisien. Analisis penurunan dilakukan dengan metode *preloading* dan PVD dengan derajat konsolidasi yang ditargetkan adalah mencapai konsolidasi 90%. Perhitungan jarak pemasangan antar PVD dilakukan untuk mendapatkan jarak yang efektif disesuaikan dengan target waktu konstruksi. Perhitungan besar dan lama waktu penurunan tanah hanya pada penurunan konsolidasi primer dihitung secara manual menggunakan teori Terzaghi (1943) dan menggunakan program *PLAXIS 2D*. Dari hasil analisis didapatkan untuk mencapai derajat konsolidasi 90%, dengan metode *preloading* dibutuhkan waktu selama 7 tahun dengan besar penurunan yang terjadi sebesar 30 cm, dengan metode PVD (didapatkan jarak efisien sebesar 1,2 m) dengan jarak efisien dibutuhkan waktu selama 25 hari.

### 2.3 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan pihak lain sebelumnya, terdapat poin-poin perbandingan antara penelitian tersebut dengan tugas akhir ini. Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

**Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Sekarang**

| **Peneliti** | **Ali (2020)** | **Atmaja (2021)** | **Daun (2022)** | **Lubis (2023)** | **Susiazti (2020)** | **Habibi (2025)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Judul** | Perbaikan Tanah Lempung Lunak Dengan Metode *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) | Analisis Penurunan Dan Waktu Konsolidasi Pada Perbaikan Tanah Lunak Dengan Metode *Prefabricated Vertical Drain* Dan *Preloading* | *Analysis of soil improvement with combination of prefabricated vertical drain and vacum consolidation using program* | Analisis Pengaruh *Preloading* Kombinasi *Prefabricated Vertical Drain* Pada Proses Konsolidasi Di Proyek Reklamasi Di Samping Tangki CPO Antar Pulau Belawan Berdasarkan *Bore Log BH-2* | Analisis Penurunan Konsolidasi Metode *Preloading dan Prefabricated Vertical Drain* (PVD) | Pengaruh Kombinasi *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) Dengan Metode *Preloading* Dan *Metode Vacuum Pressure* Terhadap Konsolidasi Tanah |

Sumber: Ali (2020), Atmaja (2021), Daun (2022), Lubis (2023), Susiazti (2020)

**Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Sekarang**

| Peneliti | Ali (2020) | Atmaja (2021) | Daun (2022) | Lubis (2023) | Susiazti (2020) | Habibi (2025) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Tujuan Penelitian** | Analisa pengaruh pemasangan PVD terhadap penurunan dan waktu konsolidasi tanah yang dikombinasikan baik dengan metode *preloading* maupun dengan metode *vacuum pressure* | Menghitung dan menganalisis waktu konsolidasi serta nilai penurunan tanah pada derajat konsolidasi 90% | Menganalisa dan membandingkan nilai penurunan tanah dan waktu konsolidasi dengan menggunakan beberapa metode | Menganalisa angka penurunan konsolidasi tanah dengan menggunakan metode analitis dan permodelan *PLAXIS 2D* | Menghitung nilai dan waktu penurunan tanah menggunakan kombinasi metode *preloading* dengan *prefabricated vertical drain* (PVD) dan menentukan jarak pemasangan PVD yang efisien. | Mengetahui nilai penurunan tanah dan waktu konsolidasi baik kondisi tanah sebelum dan setelah diperbaiki |
| **Metode** | Kombinasi antara PVD dengan metode *preloading* dan PVD dengan metode vakum. | Metode *preloading* dengan PVD dan tanpa PVD, menggunakan perhitungan manual dan program *PLAXIS 2D* | Menggunakan kombinasi PVD dengan metode *preloading* dan metode vakum dengan perhitungan metode Terzaghi dan program *PLAXIS 2D* | Metode analitis dan permodelan *PLAXIS 2D* | Metode *preloading* dan *preloading* + PVD. Analisa menggunakan metode Terzaghi (1943) dan program *PLAXIS 2D* | Metode *preloading* dengan dan tanpa PVD, metode vakum dengan PVD, menggunakan perhitungan manual dan *PLAXIS 2D* |

Sumber: Ali (2020), Atmaja (2021), Daun (2022), Lubis (2023), Susiazti (2020)

**Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Sekarang**

| Peneliti | Ali (2020) | Atmaja (2021) | Daun (2022) | Lubis (2023) | Susiazti (2020) | Habibi (2025) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Hasil** | Waktu konsolidasi alami selama 35 tahun. Waktu konsolidasi menjadi semakin cepat setelah dipasang PVD menjadi 10 minggu, PVD + *preloading* setinggi 10 m menjadi 126 hari, dan PVD + *preloading* setinggi 7 m + vakum menjadi 14 hari. | Penururnan tanah pada konsolidasi 90%, metode *preloading* tanpa PVD, perhitungan manual selama 54 tahun adalah 0,154 m dan 0,205 m dalam perhitungan *PLAXIS 2D*. Metode *preloading* + PVD, nilai tersebut menjadi 0,155 m dalam perhitungan manual selama 57 hari dan 0,208 m dalam program *PLAXIS 2D* selama 43 hari. | Penurunan tanah dan waktu konsolidasi tanpa PVD adalah 0,388m dalam waktu 21,9 tahun. Dan yang paling efektif adalah menggunakan PVD dengan pola segitiga berjarak 1 m, waktu konsolidasi dan penurunan tanah adalah 0,388 m dalam waktu 47 hari | Penurunan konsolidasi tanah dengan perhitungan analitis sebesar 1,254 m dan dengan *PLAXIS 2D* sebesar 1,268 m. Penurunan konsolidasi dengan *preloading* sebesar 0,419m, sedangkan penurunan konsolidasi dengan *preloading* + PVD sebesar 1,268 m. | Untuk mencapai derajat konsolidasi 90%, dengan metode *preloading* dibutuhkan waktu selama 7 tahun dengan besar penurunan yang terjadi sebesar 30cm, dengan metode PVD (didapatkan jarak efisien sebesar 1,2 m) dengan jarak efisien dibutuhkan waktu selama 25 hari. | Penggunaan PVD mempercepat proses konsolidasi. Besar penurunan tanah konsolidasi 90%, perhitungan *PLAXIS 2D*, metode konvensional *(preloading)* sebesar 0,495 m dengan waktu 1038 hari, metode *preloading* dengan PVD sebesar 0,3 m dengan waktu 37 hari, metode *vacuum pressure* dengan PVD adalah sebesar 0,3 m dengan waktu 11 hari. |

Sumber: Ali (2020), Atmaja (2021), Daun (2022), Lubis (2023), Susiazti (2020)

# BAB III
# LANDASAN TEORI

## 3.1 Tanah

Hardiyatmo (2019) dalam bukunya menjelaskan bahwa tanah merupakan himpunan mineral, bahan organik, serta endapan-endapan yang relatif lepas *(loose)*, yang terletak di atas batuan dasar *(bedrock)*. Ikatan antara butiran yang lemah disebabkan oleh karbonat, zat organik, atau oksida-oksida yang mengendap di antara partikel-partikel tanah. Rongga di antara partikel-partikel tersebut dapat terisi oleh udara, air, maupun keduanya. Tanah dapat terbentuk secara fisik maupun kimia. Proses pembentukan tanah secara fisik diantaranya diakibatkan oleh pengaruh erosi, angin, air, es, manusia, atau perubahan suhu serta cuaca. Hal ini menyebabkan perubahan pada batuan menjadi partikel-partikel yang lebih kecil, berbentuk bulat, bergerigi, maupun bentuk lainnya. Adapun pembentukan tanah secara kimia disebabkan oleh pengaruh oksigen, karbondioksida, air terutama dengan kandungan asam maupun alkali, serta proses-proses kimia lainnya.

## 3.2 Klasifikasi Tanah

Hardiyatmo (2019) menyampaikan bahwa penentuan sifat-sifat tanah banyak ditemukan dalam mengevaluasi beberapa permasalahan tanah seperti evaluasi penurunan bangunan (kompresibilitas tanah), evaluasi kecepatan air yang melalui tanah (permeabilitas tanah), dan evaluasi stabilitas tanah miring (kuat geser tanah). Klasifikasi tanah merupakan pemilihan tanah-tanah kedalam kelompok atau sub-kelompok yang dilakukan secara empiris sehingga menunjukan kesamaan dalam sifat maupun perilaku tanah.

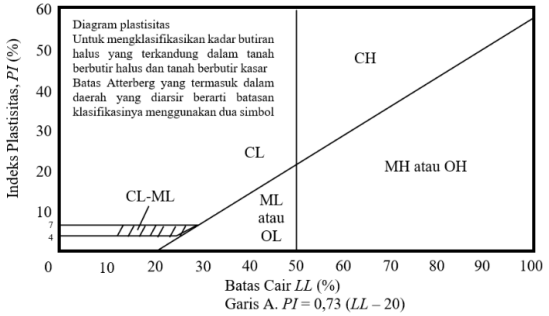
Lambe (1979) dalam Hardiyatmo (2019) menyampaikan bahwa dalam penerapannya harus dilakukan secara berhati-hati dikarenakan penyelesaian masalah stabilisasi, kompresi (penurunan), dan aliran air yang didasarkan pada klasifikasi tanah sering menimbulkan kesalahan yang berarti. Secara umum,

klasifikasi tanah didasarkan atas ukuran partikel yang didapatkan dari hasil analisis saringan dan uji sedimentasi, serta uji plastisitas. Ada dua jenis klasifikasi tanah, sistem AASHTO *(American Association of State Highway and Transportation Officials)* dan USCS *(Unified Soil Classification System)*. Keduanya dikelompokkan berdasarkan pada hasil uji sifat fisik tanah. Kesamaan dari kedua klasifikasi tersebut adalah sama-sama didasarkan pada ukuran butir dan indeks plastisitas tanah. Adapun yang membedakan keduanya adalah dalam kategori tanah berbutir kasar *(coarse grained)* dan tanah berbutir halus *(fine grained)*.

3.2.1 Sistem Klasifikasi USCS

Hardiyatmo (2019) menyebutkan, sistem ini pertama kali diperkenalkan oleh Casagrande pada tahun 1942 yang kemudian direvisi oleh *The Corps of Engineers and The US Bureau of Reclamation.* Dalam sistem ini, tanah dikelompokkan menjadi tanah berbutir kasar (kerikil dan pasir) apabila kurang dari 50% lolos saringan nomor 200, serta dikelompokkan kedalam tanah berbutir halus (lanau/lempung) apabila lebih dari 50% lolos saringan nomor 200. Setelah itu, tanah diklasifikasikan dalam sejumlah kelompok dan subkelompok yang dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut.

## Tabel 3.1 Sistem Klasifikasi Tanah *Unified (USCS)*

<table>
<tr><th colspan="3">Divisi Utama</th><th>Simbol Kelompok</th><th>Nama Jenis</th><th></th><th colspan="2">Kriteria Laboratorium</th></tr>
<tr><td rowspan="8">Bila Tanah berbutir kasar 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0,075 mm)</td><td rowspan="4">Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar tertahan saringan no. 4 (4,75 mm)</td><td rowspan="2">Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)</td><td>GW</td><td>Kerikil gradasi baik dan campuran pasir-kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus</td><td rowspan="8">Klasifikasi berdasarkan prosentase butiran halus, kurang dari 5% lolos saringan no. 200 : GW, GP, SW, SP. Lebih dari 12% lolos saringan no. 200 : GM, GC, SM,SC. 5% - 12% lolos saringan no. 200 : Batasan klasifikasi yang memenuhi simbol dobel</td><td colspan="2">$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$, $C_c = \frac{(D_{60})^2}{D_{10}\ x\ D_{60}}$ antara 1 dan 3</td></tr>
<tr><td>GP</td><td>Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir-kerikil atau tidak mengandung butiran halus</td><td colspan="2">Tidak memenuhi kriteria untuk GW</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Kerikil banyak kandungan butiran halus</td><td>GM</td><td>Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir-lempung</td><td>Batas-batas Atterberg dibawah garis A atau PI < 4</td><td rowspan="2">Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai dobel simbol</td></tr>
<tr><td>GC</td><td>Kerikil berlempung, campuran kerikil pasir-lempung</td><td>Batas-batas Atterberg diatas garis A atau PI > 7</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos saringan no. 4 (4,75 mm)</td><td rowspan="2">Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)</td><td>SW</td><td>Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus</td><td colspan="2">$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$, $C_c = \frac{(D_{60})^2}{D_{10}\ x\ D_{60}}$ antara 1 dan 3</td></tr>
<tr><td>SP</td><td>Pasir gradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus</td><td colspan="2">Tidak memenuhi kriteria untuk SW</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Kerikil banyak kandungan butiran halus</td><td>SM</td><td>Pasir berlanau, campuran pasir-lanau</td><td>Batas-batas Atterberg dibawah garis A atau PI < 4</td><td rowspan="2">Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai dobel simbol</td></tr>
<tr><td>SC</td><td>Pasir berlempung, campuran pasir-lempung</td><td>Batas-batas Atterberg diatas garis A atau PI > 7</td></tr>
<tr><td rowspan="6">Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0,075 mm)</td><td colspan="2" rowspan="3">Lanau dan lempung batas cair 50% atau kurang</td><td>ML</td><td>Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau berlempung</td><td rowspan="6" colspan="3">
</td></tr>
<tr><td>CL</td><td>Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus (lean clays)</td></tr>
<tr><td>OL</td><td>Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">Lanau dan lempung batas cair > 50%</td><td>MH</td><td>Lanau tak organik atau pasir halus diatome, lanau elastis</td></tr>
<tr><td>CH</td><td>Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk (fat clays)</td></tr>
<tr><td>OH</td><td>Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi</td></tr>
<tr><td colspan="3">Tanah dengan kadar organik tinggi</td><td>$P_t$</td><td>Gambut (peat) dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi</td><td colspan="3">Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488</td></tr>
</table>

(Sumber: Hardiyatmo, 2019)

Sistem Unified menggunakan beberapa macam simbol antara lain:

G = Kerikil *(Gravel)*

S = Pasir *(Sand)*

C = Lempung *(Clay)*

M = Lanau *(Silt)*

O = Lanau/lempung organik *(Organic silt or clay)*

Pt = Tanah gambut dan tanah organik tinggi *(peat and highly organic soil)*

W = Gradasi baik *(well-graded)*

P = Gradasi buruk *(poorly-graded)*

H = Plastisitas tinggi *(highly-plasticity)*

L = Plastisitas rendah *(low-plasticity)*

### 3.3 Tanah Lunak

Tanah kohesif (tanah lempung) merupakan agregat partikel-partikel berukuran mikroskopis dan submikroskopis yang berasal dari pembusukan unsur-unsur kimiawi penyusun batuan tanah lempung bersifat keras bila dalam keadaan kering dan plastis dalam keadaan sedang, memiliki partikel-partikel mineral tertentu yang dapat menghasilkan sifat plastis pada tanah bila bercampur dengan air. Dalam keadaan kadar air lebih tinggi, lempung bersifat sangat lunak dan lengket (Das, 1995). Hal tersebut terjadi karena apabila dua partikel tanah lempung berinteraksi satu sama lain dalam keadaan suspensi, perilaku yang terjadi adalah kedua partikel tersebut saling tolak-menolak. Namun pada waktu yang bersamaan, muncul gaya tarik menarik. Gaya tolak-menolak dan tarik-menarik semakin membesar dengan mengecilnya jarak antara kedua partikel tersebut. Ketika jarak antar partikel mengecil, maka gaya tarik-menarik akan lebih besar daripada gaya tolak-menolak. Das (1995) menerangkan bahwa jika dua partikel tanah lempung memilki jarak yang sangat kecil, maka ion positif pada ujung partikel dapat mengikat ion negatif yang ada pada permukaan partikel.

Hardiyatmo (2010) menerangkan bahwa sifat-sifat tanah lempung diantaranya:

1. Ukuran butir halus < 0,002 mm,

2. Kenaikan air kapiler tinggi,
3. Memiliki nilai permeabilitas rendah,
4. Bersifat sangat kohesif,
5. Kadar kembang susut tinggi,
6. Proses konsolidasi lambat.

### 3.4 Penurunan tanah

Penurunan tanah terjadi pada saat partikel tanah mengalami penambahan tegangan akibat beban yang bekerja diatas tanah, dan keluarnya air/udara dari dalam pori tanah sehingga tanah mengalami penurunan *(settlement)* dan memadat. Penurunan tanah yang besar dalam waktu yang lama merupakan salah satu permasalahan utama pada tanah lunak dalam suatu pekerjaan konstruksi. Liu dan Evett (2018) menyatakan bahwa penurunan tanah dapat diklasifikasikan menjadi penurunan segera dan penurunan konsolidasi.

3.4.1 Penurunan Segera/*Immediate Settlement* (Si)

*Immediate Settlement* atau penurunan segera merupakan penurunan akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah, dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air. Penurunan segera terjadi di tanah berpasir dan diakibatkan oleh kompresibilitas pada pasir. Pori antara partikel di pasir memungkinkan terjadinya disipasi tekanan air dengan segera setelah beban diletakkan.

3.4.2 Penurunan Konsolidasi Primer

Penurunan tanah terjadi akibat lapisan tanah jenuh air diberi beban diatasnya dan menyebabkan tekanan air pori meningkat sehingga mengakibatkan air mengalir keluar dari pori-pori tanah dan pada akhirnya volume tanah berkurang. Besar penurunan konsolidasi tanah lunak bergantung pada sejarah geologis tanah. Tanah pada kedalaman tertentu telah mengalami tegangan efektif pra-konsolidasi, yaitu tegangan efektif terbesar yang pernah dialami sebelumnya. Tegangan efektif pra-konsolidasi dapat lebih kecil atau sama dengan tegangan *overburden* efektif saat ini. Keadaan tersebut menyebabkan penurunan konsolidasi primer terbagi menjadi penurunan tanah lempung terkonsolidasi normal dan penurunan tanah lempung *Overconsolidated.* Untuk menentukan jenis keduanya, dapat dianalisa dengan

menentukan *Overconsolidation Ratio* (OCR) yang dapat ditentukan dengan Persamaan 3.1 sebagai berikut.

$$OCR = \frac{Pc'}{P_0} \quad (3.1)$$

dimana,

$P_c'$ = Tekanan prakonsolidasi,

$P_o$ = Tekanan *overburden* efektif.

1. Penurunan untuk lempung *normally consolidated*. merupakan keadaan pada tegangan *overburden* efektif saat ini merupakan tegangan terbesar (maksimum) yang pernah dialami tanah tersebut (OCR = 1). Perhitungan untuk mencari nilai penurunan *normally consolidated* dapat dilakukan dengan Persamaan 3.2 berikut.

$$S_P = \frac{C_c \text{ x } H}{1+e_0} \log\left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0}\right) \quad (3.2)$$

2. Penurunan untuk lempung *overconsolidated*, merupakan keadaan pada tegangan *overburden* efektif saat ini lebih kecil dari tegangan terbesar (maksimum) yang pernah dialami tanah tersebut (OCR > 1). Perhitungan untuk mencari nilai penurunan *overconsolidated* terbagi menjadi 2 keadaan yang dapat dilihat pada Persamaan 3.3 dan 3.4 sebagai berikut.
   a. Apabila $P_0+\Delta P \leq P_c'$

$$S_P = \frac{C_s \text{ x } H}{1+e_0} \log\left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0}\right) \quad (3.3)$$

   b. Apabila $P_0+\Delta P > P_c'$

$$S_P = \frac{C_s \text{ x } H}{1+e_0} \log\left(\frac{P_c'}{P_0'}\right) + \frac{C_c \text{ x } H}{1+e_0} \log\left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_c'}\right) \quad (3.4)$$

dengan :

$S_p$ = *Primary Settlement*,

$C_s$ = Indeks pemampatan kembali, [$C_s = (0.2)C_c$]

$C_c$ = Indeks kompresi tanah,

H = Tebal lapisan tanah,

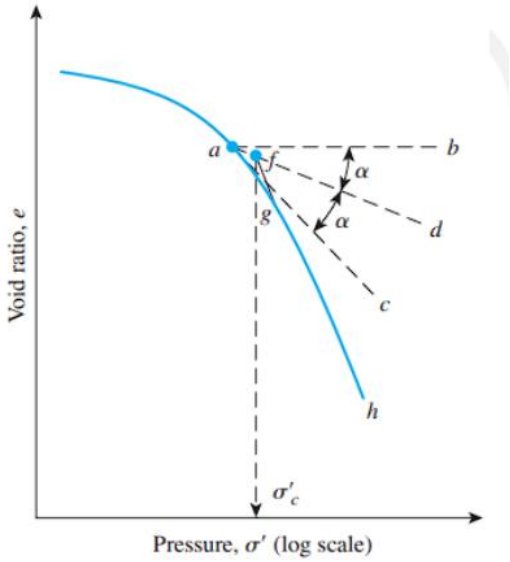
$e_0$ = Angka pori awal,

$P_c'$ = Tekanan prakonsolidasi,

$P_o$ = Tekanan *overburden* efektif,

$\Delta P$ = Tambahan tegangan akibat beban pondasi.

Untuk menghitung nilai $P_c'$, didapatkan dari gambar Grafik Metode *Cassagrande*, pada grafik antara tekanan dan angka pori dari hasil pengujian lab. Gambar Grafik Metode *Cassagrande* secara teoritis dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.




**Gambar 3.1 Metode Cassagrande pada Grafik e – log P'**
(Sumber : Das, 2013)

Langkah-langkah dalam menentukan nilai Pc' adalah sebagai berikut.

1. Tentukan titik perubahan lengkung (perubahan drastis) seperti yang digambarkan pada point 'a'.
2. Gambar garis *horizontal* dari titik 'a' sehingga didapatkan garis 'a-b'.
3. Gambar garis singgung, garis 'a-c'.
4. Gambar garis 'a-d' yang membagi zona 'b-c-a' menjadi bagian yang sama.
5. Gambar garis lurus dari ujung bawah garis grafik, lurus dan sejajar garis grafik hingga bertemu dengan garis 'a-d', tandai titik temu dengan huruf 'f '.
6. Dari titik 'f ', gambar satu garis lurus kebawah untuk menentukan nilai Pc'.

Tekanan *overburden* efektif awal ($P_0$) merupakan tekanan vertikal efektif dari tanah asli. Tekanan ini terjadi akibat beban/lapisan tanah yang ada diatas titik tanah asli tersebut. Tekanan ini berperan penting dalam menentukan kondisi tegangan awal tanah sebelum *preloading* dan *vacuum pressure*, digunakan dalam perhitungan metode Terzaghi untuk perhitungan konsolidasi tanah lunak, berpengaruh pada penurunan tanah akibat beban timbunan. Tekanan ini dapat dihitung dengan Persamaan 3.5 berikut.

$$P_0 = \gamma' \text{ x } H \tag{3.5}$$

dengan :

$P_0$ = Tekanan *overburden* efektif awal,

$\gamma$' = Berat volume tanah efektif,

H = Tebal lapisan tanah.

Distribusi tegangan tanah ($\Delta P$) merupakan tambahan tegangan akibat pengaruh tambahan diatas tanah yang ditinjau di tengah-tengah lapisan. Distribusi tegangan berperan penting untuk menentukan seberapa dalam beban memperngaruhi tanah lunak, digunakan dalam perhitungan metode Terzaghi untuk menganalisis konsolidasi. Distribusi tegangan tanah dapat hitung dengan Persamaan 3.6 dan Persamaan 3.7 berikut.

$$\Delta P = 2 \text{ x } q_0 \text{ x } I \tag{3.6}$$

$$q_0 = \gamma_{\text{timbunan}} \text{ x } H_R \tag{3.7}$$

dengan :

$\Delta P$ = Tambahan tegangan vertikal,

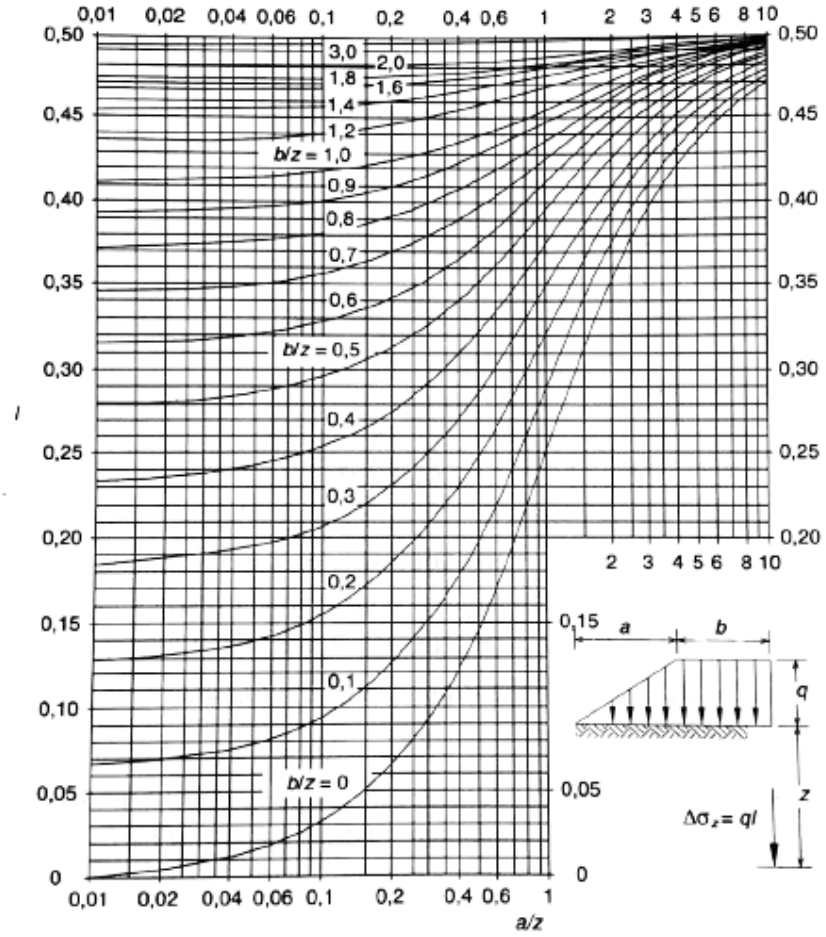
$q_0$ = Beban timbunan,

$\gamma_{\text{timbunan}}$ = Berat volume tanah timbunan,

$H_R$ = Tinggi timbunan *preloading*,

I = Faktor pengaruh,

Untuk memperhitungan faktor pengaruh (I) dapat ditentukan dengan grafik pada Gambar 3.2 berikut.




**Gambar 3.2 Faktor Pengaruh Akibat Beban Timbunan (Osterberg, 1957**)
(Sumber : Hardiyatmo, 2019)

3.4.3 Penurunan Konsolidasi Sekunder

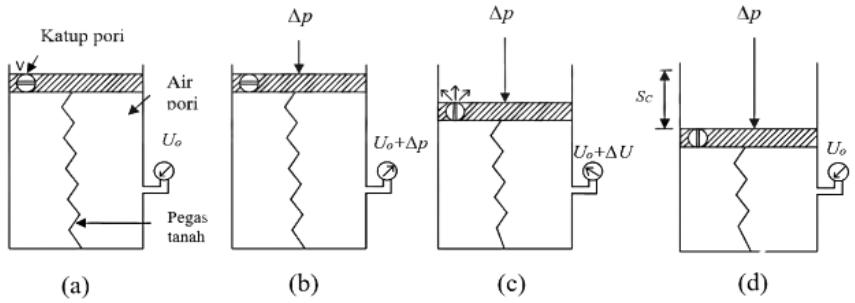
Penurunan konsolidasi sekunder adalah lanjutan dari proses konsolidasi primer, merupakan deformasi tambahan pada tanah yang terjadi akibat penambahan beban secara konstan. Proses yang terjadi pada fase ini berjalan sangat lambat dan dalam jangka waktu yang lama.

## 3.5 Konsolidasi tanah

Hardiyatmo (2010) menjelaskan bahwa konsolidasi merupakan proses berkurangnya volume atau berkurangnya rongga pori dari tanah jenuh berpermeabilitas rendah akibat pembebanan dan prosesnya dipengaruhi oleh kecepatan terperasnya air pori keluar dari dalam tanah.

3.5.1 Konsolidasi Satu Dimensi

Terzaghi memperkenalkan teori konsolidasi satu arah yang digunakan untuk memprediksi penurunan tanah. Teori ini menjelaskan bahwa deformasi dan arah aliran yang terjadi hanya pada satu arah yaitu hanya pada arah vertikal. Mekanisme proses konsolidasi satu dimensi dapat dijelaskan dengan gambar yaitu silinder berpiston yang berlubang dan berpegas, diisi dengan air sampai penuh dapat dilihat pada Gambar 3.2 sebagai berikut.



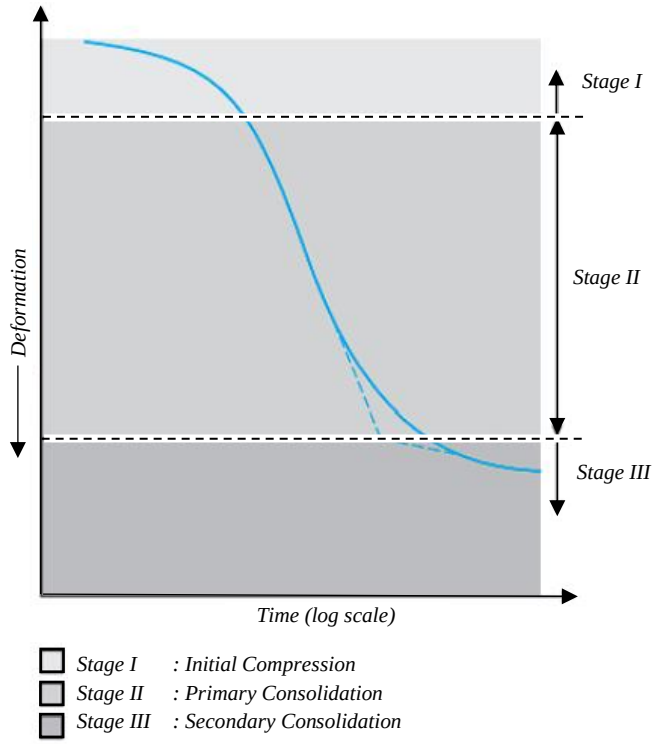

**Gambar 3.3 Model Konsolidasi Satu Dimensi (Terzaghi)**
(Sumber : Hardiyatmo, 2010)

Pada Gambar 3.2, pegas bebas tidak ada gesekan dengan dinding silinder. Pegas melukiskan tanah, sedangkan air melukiskan air pori, dan lubang piston melukiskan permeabilitas tanah. Gambar ini menunjukan kondisi pada sistem dalam keadaan seimbang. Alat ukur tekanan air menunjukan angka $\mu_0$.

Pada gambar b menunjukan beban $\Delta p$ yang dikerjakan di atas piston dengan katup tertutup. Ternyata piston tidak bergerak, hal ini disebabkan air tidak keluar dari tabung, sedangkan air tidak dapat mampat. Pada kondisi ini beban sepenuhnya dipikul oleh air. Pengukur tekanan air menunjukan angka $\mu_0 + \Delta p$ , kenaikan tekanan air pori sebesar $\Delta p$ disebut kelebihan tekanan air pori. Kondisi dengan katup tertutup ini melukiskan kondisi tak terdrainase (*undrained*) dalam tanah.

Pada gambar c menunjukan katup dibuka, sehingga air keluar dengan kecepatan tergantung luas lubang, akibatnya piston bergerak kebawah, sehingga pegas mendukung beban. Setiap kelebihan beban pegas, tekanan air pori berkurang. Kondisi ini menggambarkan tanah sedang berkonsolidasi. Beban yang didukung pegas melukiskan tegangan efektif tanah sedangkan tekanan air dalam silinder melukiskan tekanan air pori tanah.

Proses pada gambar c berjalan terus sampai tekanan air pori nol. Kedudukan ini melukiskan kondisi terdrainase (*drained*) dan saat angka pori menunjukan konsolidasi telah berakhir pada gambar d. Hubungan antara pemampatan dan waktu konsolidasi dapat digambar ke dalam grafik. Terdapat tiga tahapan yang berbeda dalam hubungan keduanya yang dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut.




**Gambar 3.4 Grafik Hubungan Antara Waktu dengan Pemampatan Selama Konsolidasi**
(Sumber : Braja M Das, 2013)

Tahapan yang terjadi terdiri dari tiga tahapan diantaranya sebagai berikut.

1. Tahap I: Pemampatan awal *(initial compression)* yang pada umumnya disebabkan oleh pembebanan awal (*preloading*).
2. Tahap II: Konsolidasi primer *(primary consolidation)*, yaitu periode selama tekanan air pori secara lambat laun dipindahkan ke dalam tegangan efektif, sebagai akibat dari keluarnya air dari pori-pori tanah.
3. Tahap III: Konsolidasi sekunder *(secondary consolidation)* yang terjadi setelah tekanan air pori hilang seluruhnya. Pemampatan yang terjadi di sini disebabkan oleh penyesuaian yang bersifat plastis dari butir-butir tanah.

Persamaan matematis untuk konsolidasi 1 dimensi dari Terzaghi dalam menentukan nilai derajat konsolidasi arah vertikal (Uv) dapat dinyatakan dengan Persamaan 3.8 berikut.

$$U_v = \frac{\sqrt{\frac{4\ x\ Tv}{\pi}}}{(1+\left(\frac{4Tv}{\pi}\right)^{2,8})^{0,179}} \quad (3.8)$$

dengan :

$U_v$ = Derajat konsolidasi arah vertikal,

$\pi$ = Nilai *phi* ($\pi = 3,14159$),

$T_v$ = Faktor waktu konsolidasi vertikal.

Hardiyatmo (2022) menyatakan bahwa faktor waktu penurunan konsolidasi dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.9 berikut.

$$T_v = \frac{t\ x\ Cv}{Hdr^2} \quad (3.9)$$

dengan :

t = Waktu Konsolidasi,

$T_v$ = Faktor waktu konsolidasi vertikal,

$H_{dr}$ = Panjang aliran ($H_{dr}$ = 0,5 H),

$C_v$ = Koefisien Konsolidasi vertikal.

### 3.6 Parameter Penurunan Tanah

Dalam perhitungan penurunan lapisan tanah, diperlukan beberapa parameter sebagai berikut.

3.6.1 Indeks Kompresi Tanah ($C_c$)

Indeks kompresi tanah merupakan parameter yang menunjukkan seberapa besar tanah mengalami pemampatan akibat perubahan tekanan efektif. Terzaghi dan Peck (1967) dalam Barimbing (2017) menyarankan pemakaian persamaan empiris untuk menghitung indeks pemampatan pada lempung yang stuktur tanahnya tidak terganggu atau belum rusak (*undistrubed*). Perhitungan dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.10 berikut

$$Cc = 0{,}009 \times (LL-10) \quad (3.10)$$

dengan :

LL = Batas cair tanah.

3.6.2 Koefisien konsolidasi vertikal (Cv)

Koefisien konsolidasi vertikal (Cv) menentukan kecepatan pengaliran air pada arah vertikal dalam tanah sehingga mempengaruhi kecepatan konsolidasi tanah. Besar kecilnya nilai Cv dipengaruhi oleh batas cair tanah (LL). Ketika terjadi kenaikan nilai batas cair maka nilai Cv dapat menurun. Nilai koefisien konsolidasi vertikal (Cv) didapatkan dari hasil pengujian laboratorium. Pada tanah yang berlapis, nilai koefisien konsoidasi vertikal (Cv) yang digunakan adalah koefisien konsolidasi gabungan (Cv gab) yang ditentukan dengan Persamaan 3.11 berikut

$$Cv\ gab = \frac{(H_1+H_2+\cdots+H_n)^2}{(\frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}}+\frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}}+\cdots+\frac{H_n}{\sqrt{C_{vn}}})^2} \quad (3.11)$$

dengan :

$Cv_{gab}$ = Koefisien konsolidasi gabungan,

$Cv_1$ = Koefisien konsolidasi lapisan tanah ke-1,

$Cv_n$ = Koefisien konsolidasi lapisan tanah ke-n,

$H_1$ = Lapisan tanah ke-1,

$H_n$ = Lapisan tanah ke-n.

3.6.3 Koefisien konsolidasi *horizontal* (Ch)

Muller dan Larsson pada jurnal *Aspects On The Modelling of Smearzones Around Vertical Drain* menyatakan bahwa koefisien konsolidasi *horizontal* (Ch) untuk material tanah jenis lempung homogen dapat ditentukan dengan Persamaan 3.12 berikut.

$$Ch = (1 \text{ s/d } 2) \times Cv \quad (3.12)$$

dengan :

Ch = Koefisien konsolidasi arah *horizontal*/*radial*,

Cv = Koefisien konsolidasi arah vertikal.

3.6.4 Faktor waktu *horizontal* (Th)

Untuk mencari nilai faktor waktu *horizontal* (Th), Hardiyatmo (2022) menyebutkan dapat digunakan Persamaan 3.13 berikut.

$$Th = (Ch \times t) / De^2 \quad (3.13)$$

dengan :

Th = Faktor waktu konsolidasi *horizontal*/*radial*,

Ch = Koefisien konsolidasi arah *horizontal*/*radial*,

De = Diameter jangkauan PVD,

t = Waktu ke-n.

3.6.5 Derajat konsolidasi (arah *horizontal*) (Uh)

Menurut Hardiyatmo (2022), perhitungan untuk menentukan derajat konsolidasi arah *horizontal* (Uh) dapat menggunakan Persamaan 3.14 berikut.

$$Uh = 1 - exp^{((-8 \times T^h) / F(n))} \quad (3.14)$$

dengan :

Uh = Derajat konsolidasi arah *horizontal*/*radial*,

Th = Faktor waktu *horizontal*, dan

F(n) = Faktor hambatan.

3.6.6 Derajat konsolidasi tanah (U)

Derajat konsolidasi tanah (U) merupakan perbandingan penurunan tanah pada waktu tertentu dengan penurunan total. Menurut Hardiyatmo (2022), Persamaan derajat konsolidasi pada tanah yang distabilisasi dengan menggunakan sistem PVD dapat menggunakan Persamaan 3.15 berikut. Untuk menghitung penurunan tanah saat U adalah dengan mengalikan faktor 'U' dengan penurunan total ($S_{p\ total}$).

$$U = 1 - (1 - Uv)(1 - Uh) \quad (3.15)$$

dengan :

U = Derajat konsolidasi rata-rata,

Uv = Derajat konsolidasi arah vertikal, dan

Uh = Derajat konsolidasi arah *radial*.

## 3.7 Perbaikan Tanah

Secara umum lapisan tanah lunak terdiri dari lempung (*clay*) atau lanau (*silt*). Hal ini menimbulkan permasalahan ketika perencana merancang suatu konstruksi diatas tanah dengan kondisi tersebut. Permasalahan terjadi pada daya dukung tanah (*bearing capacity*) dan penurunan (*settlement*). Seiring dengan perkembangan teknologi di bidang konstruksi berbagai inovasi banyak bermunculan. Darwis (2017) menyatakan "Perbaikan tanah (*soil improvement*) adalah suatu jenis stabilisasi tanah yang dimaksudkan untuk memperbaiki dan/atau mempertahankan kemampuan dan kinerja tanah sesuai syarat teknis yang dibutuhkan, dengan menggunakan bahan *additive* (kimiawi), pencampuran tanah (re-*gradation*), pengeringan tanah (*dewatering*) atau melalui penyaluran energi statis atau dinamis ke dalam lapisan tanah". Upaya perbaikan tanah lunak dapat dilakukan diantaranya dengan menerapkan kombinasi antara metode *preloading* dengan *prefabricated vertical drain,* serta metode *vacuum pressure* dengan *prefabricated vertical drain*

### 3.7.1 Metode *Preloading*

*Preloading* atau pembebanan awal merupakan proses kompresi tanah dengan memberikan tekanan vertikal sebelum dilakukan pembebanan kostruksi sebenarnya. Beban *preloading* yang digunakan adalah beban yang setara dengan beban konstruksi sebenarnya, dilakukan dengan memberi timbunan sebanding dengan berat konstruksi yang akan dilaksanakan. Selain itu dapat ditentukan tinggi timbunan sesuai dengan nilai penurunan, agar tanah timbunan efisien/tidak terbuang sia-sia dan dapat dijadikan suatu pondasi dari suatu konstruksi. Perhitungan tinggi timbunana rencana sebagai pembebanan awal dapat menggunakan Persamaan 3.16 berikut.

$$H_R = q / \gamma_{tmb} \quad (3.16)$$

dengan :

$H_R$ = Tinggi rencana timbunan,

q = Beban rencana,

$\gamma_{tmb}$ = Berat volume tanah timbunan.

3.7.2 *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*

*Prefabricated Vertical Drain* (PVD) merupakan pipa sintetis yang ditanam kedalam lapisan tanah lunak, berfungsi untuk mempercepat proses konsolidasi tanah dengan memperpendek lintasan drainase air pori dalam lapisan tanah lunak. Hal tersebut mengakibatkan air pori tanah dapat terdisipasi dengan cepat sehingga mempercepat proses konsolidasi tanah. Penggunaan PVD mampu memaksimalkan konsolidasi arah *radial* dengan menempatkan material ber-permeabilitas tinggi di tanah. Drainase vertikal efektif bekerja hanya saat proses konsolidasi primer berlangsung. Hal ini dikarenakan pengaliran air yang signifikan hanya terjadi pada saat konsolidasi primer, sementara itu konsolidasi sekunder hanya mengalirkan jumlah air yang sangat sedikit dari tanah sehingga penurunan sekunder tidak dipercepat oleh drainase vertikal. Drainase vertikal efektif terhadap deposit lempung yang mengandung banyak lapisan *horizontal* pasir dan sedikit lanau tipis (lapisan mikro). Berikut ini persyaratan teknis material PVD dapat dilihat pada Tabel 3.2

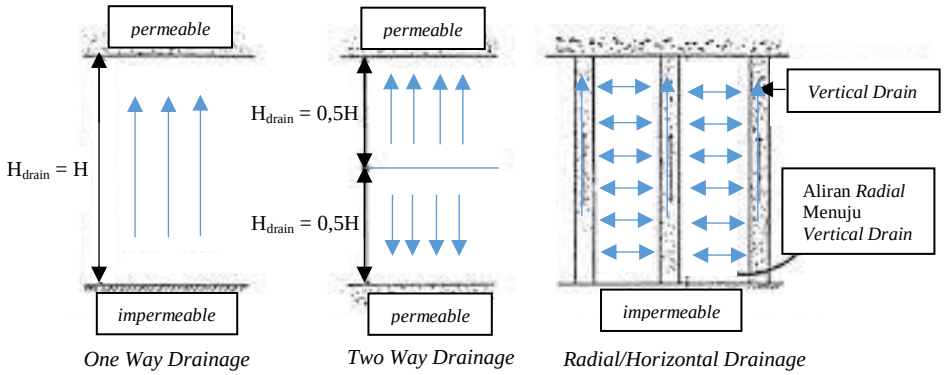
**Tabel 3.2 Persyaratan Teknis Material PVD**

| ***Properties*** | ***Requirement*** | ***Testing Method*** |
|---|---|---|
| *Width* | *Minimum 100 mm* | |
| *ThickNes* | *Minimum 3.3 mm* | |
| *Tensile Strengh* | Lebih besar dari 2000N | *ASTM D-4595* |
| *Strength at 10% elongation, dry and wet condition* | Lebih besar dari 1000N | *ASTM D-4595* |
| *Filter Permeability* | *Minimum $1x10^{-4}$ m/s* | *ASTM D-4491* |
| *Opening Size* | Lebih kecil dari 90 microns | *ASTM D-4751* |
| *Discharge Capacity at 300 kPa, straight* | *Minimum $50x10^{-6}$ $m^3/s$* | *ASTM D-4716* |
| *Discharge Capacityat 200 kPa, buckled* | *Minimum $35x10^{-6}$ $m^3/s$* | *ASTM D-4716* |
| *Discharge Capacity at 100 kPa, buckled* | *Minimum $40x10^{-6}$ $m^3/s$* | *ASTM D-4716* |

Sumber : Barimbing 2017

faktor yang mempengaruhi proses konsolidasi berjalan lebih cepat yaitu sebagai berikut.

1. Jarak antar PVD, berpengaruh terhadap panjang lintasan drainase air pori secara *horizontal*. Semakin jauh jarak antar PVD mengakibatkan semakin jauh jarak yang harus ditempuh air untuk mencapai PVD dan keluar sehingga proses konsolidasi menjadi semakin lama. Jarak minimum yang diperbolehkan adalah 1 meter sebab jika lebih kecil dari 1 meter dapat menurunkan kekuatan tahanan geser tanah.
2. Panjang PVD. Pada proses konsolidasi, PVD hanya mempercepat proses konsolidasi pada daerah sepanjang *vertical drain* saja. PVD hanya mampu memperpendek jarak aliran drainase pada arah sepanjang aliran PVD, sedangkan untuk daerah di bawahnya hanya akan mengalami konsolidasi biasa seperti yang digambarkan pada Gambar 3.5.




**Gambar 3.5 Modifikasi Jarak Tempuh Air dengan Keberadaan PVD**
(Sumber : Gouw dalam Barimbing, 2017)

Menurut Hasbon (1960) dalam Barimbing (2017) menyatakan bahwa "Pada perhitungan PVD, penampang dari PVD akan dimodelkan menjadi berbentuk lingkaran dengan perhitungan diameter ekuivalen yang diasumsikan sebagai keliling persegi panjang dibagi π ". Asumsi tersebut didasarkan pada Persamaan 3.17 dan Persamaan 3.18. Penjelasan mengenai transformasi panjang PVD dapat dilihat pada Gambar 3.6 berikut.

$$\pi \, dw = 2 \, (p+l) \tag{3.17}$$

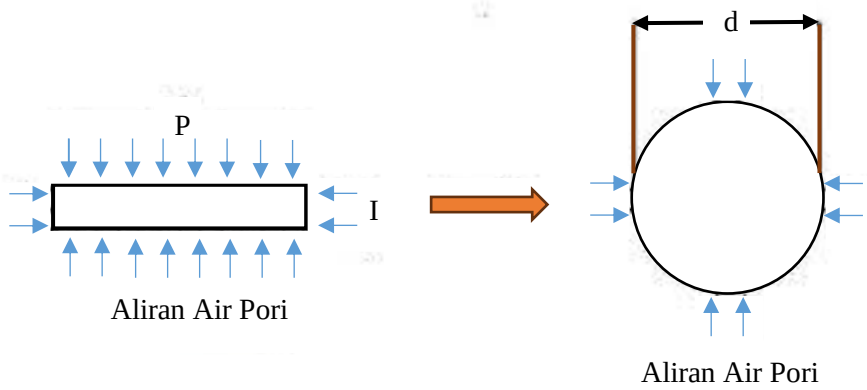
$$dw = 2 \, (p+l) \, \pi \tag{3.18}$$

dengan :

dw = Diameter penampang PVD,

p = Panjang penampang PVD, dan

l = Lebar penampang PVD.




**Gambar 3.6 Transformasi Penampang PVD**
(sumber : Muslih 2020)

Daerah pengaruh pemasangan PVD (jangkauan kerja PVD) yang disebut sebagai diameter ekuivalen (De) merupakan luasan area tanah yang efektif dikeringkan oleh satu buah PVD. Daerah ekuivalen bergantung kepada pola dan jarak pemasangan PVD, dan berguna untuk menentukan efektifitas perbaikan tanah menggunakan PVD. Hardiyatmo (2022) menyebutkan, pada umumnya PVD dipasang dengan pola bujur sangkar atau segitiga seperti Gambar 3.8. Persamaan yang berlaku untuk mengetahui daerah pengaruh pemasangan PVD yaitu Persamaan 3.19 dan Persamaan 3.20.

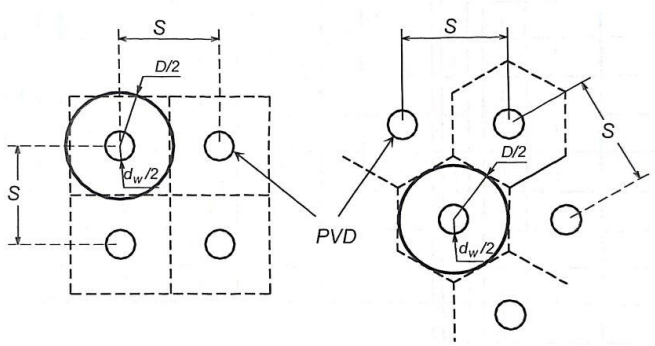
$$De = 1{,}13\ S' \text{ (untuk pola bujur sangkar)} \quad (3.19)$$

$$De = 1{,}05\ S' \text{ (untuk pola segitiga)} \quad (3.20)$$

dengan :

De = Diameter ekuivalen (setelah penampang diubah menjadi bentuk lingkaran),

S’ = spacing atau jarak antar PVD.




**Gambar 3.7 Pola PVD (Kiri Pola Bujur Sangkar, Kanan Pola Segitiga)**
(Sumber : Hardiyatmo (2022))

Pemasangan pola bujur sangkar akan lebih mudah untuk dikontrol, sedangkan dari segi penurunan maka pola segitiga akan memberikan penurunan yang lebih seragam. Nilai faktor hambatan akibat jarak PVD ditentukan dengan menggunakan Persamaan 3.21 berikut

$$F(n) = \ln (De/Dw) - 3/4 \quad (3.21)$$

dengan :

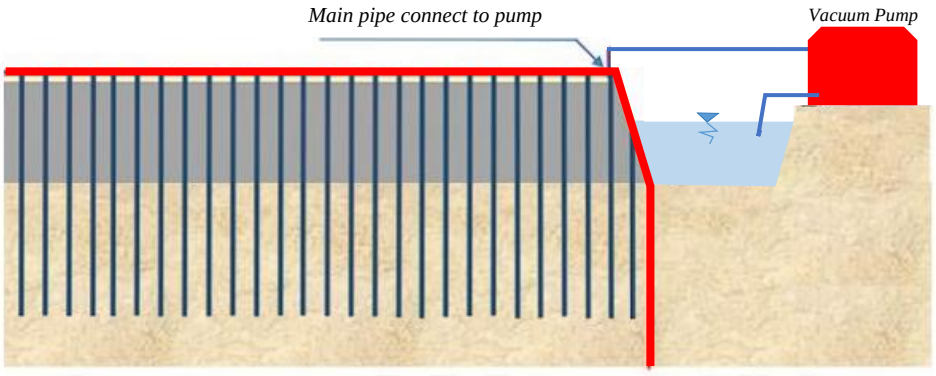
F(n) = Faktor hambatan akibat jarak PVD,

De = Diameter jangkauan kerja PVD, dan

Dw = Diameter lingkaran ekuivalen PVD

3.7.3 *Vacuum Consolidation*

Metode *vacuum consolidation* adalah metode yang bertujuan untuk mengurangi tekanan air pori di dalam tanah dengan menggunakan teknik yang menerapkan penghisapan vakum yang terisolasi massal kedalamnya, sehingga dengan cara tersebut tegangan efektif dapat meningkat tanpa mengubah tegangan total. Metode vakum memiliki kelebihan bila dibandingkan dengan metode *preloading*, metode vakum dinilai lebih murah dan aman dikarenakan metode ini mampu memangkas biaya pemindahan tanah timbunan serta meminimalisir terjadinya kelongsoran timbunan. Metode *Vacum Consolidation* dapat dilihat pada Gambar 3.8 berikut.




**Gambar 3.8 Ilustrasi Sistem *Vacum Consolidation***
(Sumber : PT Hutama Karya Infrastruktur dalam Daun, 2022)

Sistem vakum dipasang dengan memberikan lapisan pasir diatas tanah untuk alas yang memiliki fungsi sebagai lapisan pembuangan. Setelah itu, dipasang PVD yang diikuti dengan pemasangan *Prevabricated Horizontal Drainage*. PVD dapat di pasang dengan pola segitiga ataupun pola segi empat.

### 3.8 *PLAXIS 2D*

*PLAXIS 2D* adalah salah satu program aplikasi komputer yang menghitung konsolidasi dengan menggunakan teori *finite elemen method* (FEM). Pengembangan *PLAXIS 2D* dimulai pada tahun 1987 di Universitas Teknik Delft *(Technical University of Delft)* inisiatif Departemen Tenaga Kerja dan Pengelolaan Sumber Daya Air Belanda *(Dutch Department of Public Works and Water Management).* Tujuan awal adalah untuk menciptakan sebuah program komputer berdasarkan metode elemen hingga 2D yang mudah digunakan untuk menganalisis tanggul-tanggul yang dibangun di atas tanah lunak di dataran rendah Belanda. Pada tahun-tahun berikutnya, *PLAXIS 2D* dikembangkan lebih lanjut hingga mencakup hampir seluruh aspek perencanaan geoteknik lainnya. Program ini melakukan perhitungan berdasarkan metode elemen hingga yang digunakan secara khusus untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas untuk berbagai aplikasi dalam bidang geoteknik. Kondisi sesungguhnya dapat dimodelkan dalam *plane strain* maupun secara *axisymetris*. Program ini menerapkan metode antar muka grafis yang mudah digunakan sehingga pengguna dapat dengan cepat membuat model geometri dan jaring elemen berdasarkan penampang melintang dari kondisi yang

ingin dianalisis. Program ini terdiri dari empat buah sub-program yaitu masukan, perhitungan, keluaran, dan kurva. Pemodelan *Mohr Coulomb* merupakan pemodelan tanah yang paling umum digunakan. Parameter pemodelan *Mohr Coulomb* terdiri atas *Modulus Young (E), Poissons ratio (v),* kohesi (c), sudut geser dalam ($\varphi$) dan sudut dilatasi ($\psi$). Pemodelan *Mohr Coulomb* memiliki kelebihan berupa perhitungan masih relatif sederhana.

Pada saat memodelkan elemen tanah pada program *PLAXIS 2D* dapat dilakukan dalam dua kondisi yaitu sebagai berikut.

1. Kondisi *drained*, merupakan kondisi untuk tanah yang memiliki permeabilitas besar seperti tanah pasir, tanah yang mengalami pembebanan sangat lambat, serta untuk menstimulasikan perilaku tanah dalam jangka panjang. Kondisi *drained* pada program *PLAXIS 2D* digunakan untuk mengatur tidak ada kenaikan tekanan air pori (*porewater pressure)* pada material tanah.
2. Kondisi *undrained*, merupakan kondisi untuk tanah yang memiliki permeabilitas kecil seperti tanah lempung sehingga ketika diberikan excess pore water pressure tidaklangsung terdisipasi atau teralirkan. Kondisi *undrained* pada program *PLAXIS 2D* digunakan untuk mengatur timbulnya kenaikan tekanan air pori (*excess porewater pressure*) pada material tanah.

Parameter-parameter yang digunakan pada pemodelan *Mohr Coulomb* adalah sebagai berikut.

1. Berat Volume ($\gamma$)

   Pada program *PLAXIS 2D* berat volume tanah yang dibutuhkan dalam perhitungan terbagi ke dalam dua jenis yaitu berat volume tanah jenuh dan berat volume kering. Parameter ini akan dipergunakan untuk mendapatkan tegangan *confining* pada kedalaman tertentu pada kondisi jenuh maupun kondisi kering. Berat volume tanah merupakan perbandingan berat tanah terhadap volume dari tanah tersebut.
2. Koefisien Permeabilitas (k)

   Koefisien permeabilitas dari tanah akan dipergunakan untuk menghitung kecepatan pengurangan tegangan air pori ekses selama proses pengeluaran air dari pori-pori tanah. Parameter ini pada analisa *undrain* akan mengontrol

besarnya penurunan terhadap waktu. Harga koefisien rembesan (k) untuk tiap-tiap tanah adalah berbeda-beda.

3. Angka poisson

   Angka poisson atau *poisson's ratio* merupakan harga perbandingan antara regangan lateral dengan tegangan aksial yang digunakan untuk menghubungkan besar modulus elastisitas (E) dengan modulus geser (G). Menurut Das (1995), hubungan antara angka poisson dengan jenis tanah dan konsistensi tanahnya dapat dilihat pada Tabel 3.3 sebagai berikut ini.

**Tabel 3.3 Hubungan Angka Poisson dengan Jenis Tanah dan Konsistensi**

| Jenis Tanah | Angka Poisson |
|---|---|
| Pasir Lepas | 0,20-0,40 |
| Pasir Agak Padat | 0,25-0,40 |
| Pasir Padat | 0,30-0,45 |
| Pasir Berlanau | 0,20-0,40 |
| Lempung Lembek | 0,15-0,25 |
| Lempung Agak Kaku | 0,20-0,50 |

Sumber : Das (1995)

4. Modulus Elastisitas

   Modulus elastisitas (E) atau bisa disebut modulus *young* merupakan perbandingan antara tegangan yang terjadi terhadap regangan pada pengujian *triaxial test.* Menurut Das (1995), nilai modulus elastisitas tanah juga dapat ditentukan berdasarkan jenis tanahnya yang ditunjukkan pada Tabel 3.4 berikut ini.

**Tabel 3.4 Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas**

| Jenis Tanah | E | |
|---|---|---|
| | psi | $kN/m^2$ |
| Lempung Lembek | 250-500 | 1380-3450 |
| Lempung Keras | 850-2000 | 586-13800 |
| Pasir Lepas | 1500-4000 | 10350-27600 |
| Pasir Padat | 5000-10000 | 34500-69000 |

Sumber : Das (1995)

5. Sudut geser dalam ($\varphi$)

   Sudut geser dalam beserta kohesi merupakan parameter yang menentukan kekuatan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja pada tanah. Nilai dari sudut geser dalam diperoleh dari *engineering properties* tanah, yaitu dengan *triaxial test* dan *direct shear test.*

6. Kohesi

   Parameter ini di dalam program *PLAXIS 2D* bersama dengan sudut geser dalam tanah akan menjadi masukan untuk menghitung kekuatan tanah. Ketika dilakukan perhitungan konstruksi akan memunculkan peringatan (*warning*) kepada pengguna apabila tanah telah mengalami keruntuhan (*failure*) ketika dilaksanakan perhitungan. Kohesi memiliki dimensi yang sama dengan tegangan. Kohesi akan cenderung meningkat sesuai dengan kedalaman yang ditinjau. Nilai kohesi dapat diperoleh dari beberapa jenis pengujian antara lain adalah pengujian *triaxial* dan *unconfined compression test.*

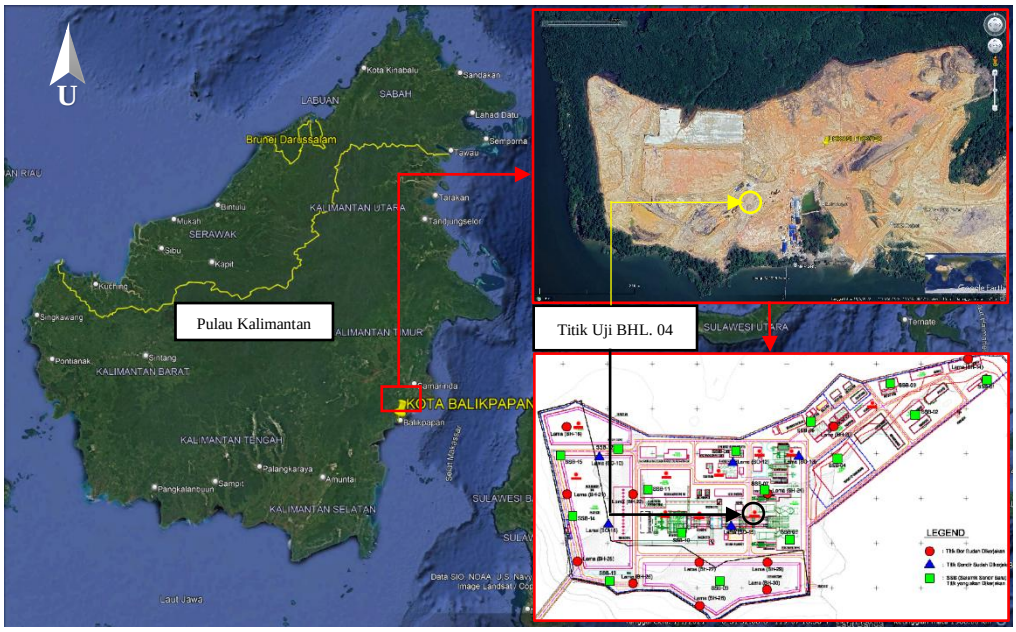
7. Sudut dilatasi

   Sudut dilatasi adalah sudut yang dibentuk bidang *horizontal* dengan arah pengembangan butiran pada saat butiran menerima tegangan deviatorik.Tanah lempung normal konsolidasi tidak memiliki sudut dilantasi. Tetapi pada tanah pasir, besar sudut ini tergantung pada kepadatan relatif (Dr) dan sudut geser dalamnya yang dinyatakan dengan persamaan $\psi = \phi - 30^o$

# BAB IV
# METODE PENELITIAN

## 4.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlokasi di Proyek Pembangunan *Nickel Smelter* di pesisir laut Teluk Balikpapan, Balikpapan Barat, Balikpapan, Kalimantan Timur. Lokasi penelitian dan titik pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.1 sebagai berikut.




**Gambar 4.1 Gambar Eksisting Area Reklamasi Proyek Nickel Smelter**
Sumber : Citra Google Earth, 2025

## 4.2 Alat

Dalam penelitian ini memerlukan beberapa peralatan baik *hardware* maupun *software*. Peralatan *hardware* dan *software* yang digunakan dalam Analisa penelitian ini diantaranya sebagai berikut.

1. Perangkat keras *(hardware)* berupa Laptop dengan spesifikasi prosesor *Intel Core i5 8$^{th}$ Generation*, RAM 8 GB DDR4, SSD 256 GB + HDD 1 TB.
2. Perangkat lunak *(software)* berupa *PLAXIS 2D V21*, *Microsoft Excel 2021*, dengan *OS Windows 11*.

### 4.3 Prosedur Analisis

Prosedur analisis dalam penelitian ini terdiri dari tahapan pengumpulan data, tahapan analisis data, dan tahapan permodelan dengan program *PLAXIS 2D V21*. Tahapan-tahapan tersebut adalah sebagai berikut.

4.3.1 Pengumpulan data

Pengumpulan data merupakan tahap penting dalam melakukan suatu penelitian. Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini diantaranya sebagai berikut.

1. Data Uji N-SPT Tanah
2. Data Uji Laboratorium Tanah
3. Referensi sumber meliputi kajian pustaka, jurnal-jurnal penelitian terkait.

Data yang digunakan pada penelitian ini menggunakan data hasil uji N-SPT titik BHL. 04 di lapangan dan data hasil uji laboratorium yang bersumber dari titik pengujian BHL. 04 yang dapat dilihat pada Tabel 4.1, Tabel 4.2, dan Tabel 4.3 sebagai berikut.

**Tabel 4.1 Hasil Pengujian N-SPT di Lapangan**

| Kode Titik | Metode | Kedalaman (m) | | N-SPT | Deskripsi | Konsistensi |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mulai | Sampai | | | |
| BHL. O4 | Pembebanan Inti | 0 | 3,0 | 0 | LANAU CAMPUR PASIR berwarna abu-abu | Sangat Lunak |
| | | 3 | 5,0 | 0 | LEMPUNG CAMPUR PASIR berwarna abu-abu | |
| | | 5,0 | 5,5 | 0 | | |
| | | 5,5 | 7,0 | 3 | LEMPUNG BERPASIR berwarna abu-abu | Lunak |
| | | 7,0 | 7,5 | 3 | | Teguh |
| | | 7,5 | 8,5 | 8 | | |
| | | 8,5 | 9,0 | 8 | | Sangat Teguh |
| | | 9,0 | 9,5 | 8 | PASIR HALUS berwarna cokelat | Keras |
| | | 9,5 | 10,0 | 60 | | Sangat Keras |
| | | 10,0 | 11,0 | 60 | PASIR HALUS berwarna cokelat keabu-abuan | |
| | | 11,0 | 15,0 | 60 | PASIR HALUS berwarna cokelat kekuningan | |
| | | 15,0 | 20,0 | 60 | PASIR HALUS berwarna cokelat keabu-abuan | |

Sumber : Data Hasil Pengujian N-SPT

Berdasarkan nilai N-SPT pada Tabel 4.1 tersebut, lapisan tanah dasar eksisting yang digunakan pada pengujian terdiri dari 4 lapisan dengan jenis tanah lanau berpasir pada kedalaman 0 m-5,5 m, tanah lempung berpasir pada kedalaman 5,5 m-7,5 m, tanah lempung berpasir pada kedalaman 7,5 m-9,5 m, dan pasir jenis pasir halus pada kedalaman 9,5 m – 20 m.

**Tabel 4.2 Hasil Pengujian Laboratorium**

| Kode Sampel | *Depth* | Kadar Air | Densitas | | *Spesific Gravity* | Angka Pori | *Unconfine Compression* | Sudut Geser Dalam | Kohesi | | Consolidation |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | W | $\gamma$ | | Gs | e | qu | $\varphi$ | c | | Cc |
| | | % | gr/cm$^3$ | kN/m$^3$ | | | Kg/cm$^2$ | | Kg/cm$^2$ | kN/m$^2$ | |
| BHL.04 UDS.01 | 3 - 3,5 m | 52,6 | 1,429 | 14,01 | 2,627 | 0,532 | 0,88 | 25,32 | 0,203 | 20 | 0,27 |
| BHL.04 UDS.02 | 7 - 7,5 m | 48,95 | 1,624 | 16,1 | 2,634 | 0,44 | 0,944 | 28,25 | 0,783 | 76,7 | 0,24 |

Sumber : Data Hasil Pengujian Laboratorium Titik BHL. 04

**Tabel 4.3 Klasifikasi Tanah Berdasarkan USCS**

| Kode Sampel | Atterberg Limit | | | Hydrometer Test and Sieve Analysis | | | | USCS | Jenis Tanah |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | LL | PL | PI | Clay | Silt | Sand | Gravell | | |
| | % | % | % | % | % | % | % | | |
| BHL.04 UDS.01 | 25,89 | 21,37 | 4,52 | 43,35 | 45,13 | 11,52 | 0 | CL-ML | CL : lempung tak organik dengan plastisitas hingga sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus. ML : Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau berlempung. |
| BHL.04 UDS.02 | 26,01 | 21,5 | 4,51 | 42,75 | 45,19 | 12,06 | 0 | | |

Sumber : Data Hasil Pengujian Laboratorium Titik BHL. 04

Dari hasil uji laboratorium, didapatkan parameter-parameter tanah yang digunakan pada penelitian ini yang telah tersaji pada Tabel 4.2 diatas. Tabel 4.3 merupakan tabel yang menerangkan jenis tanah yang dikonsolidasi pada penelitian ini.

4.3.2 Analisis data

Analisis data yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan pemrograman dengan *PLAXIS 2D* serta perhitungan manual menggunakan metode Terzaghi. Perhitungan metode Terzaghi dilakukan pada analisa penurunan dan waktu konsolidasi tanah yang dilakukan dengan kombinasi antara PVD dengan *Vacuum Pressure*. Langkah-langkah melakukan perhitungan metode terzaghi diantaranya sebagai berikut.

1. Menentukan nilai *Overconsolidation Ratio* (OCR)
2. Menentukan nilai konsolidasi primer
3. Menentukan waktu konsolidasi

Perangkat lunak/*software PLAXIS 2D* digunakan dalam analisa penurunan dan waktu konsolidasi tanah. Dalam penelitian ini, program digunakan untuk menganalisa konsolidasi tanah dengan menggunakan metode kombinasi antara PVD dengan *preloading*. Langkah-langkah untuk melakukan analisis menggunakan *PLAXIS 2D* diantaranya sebagai berikut.

1. Menyiapkan data tanah hasil uji laboratorium
2. Mengatur program *PLAXIS 2D*. tahapan dalam mengoperasikan *PLAXIS 2D* diantaranya sebagai berikut.
3. Membuat file baru untuk analisis dalam program *PLAXIS 2D*
4. Mengatur tab proyeksi dan dimensi untuk pemodelan dalam program *PLAXIS 2D*
5. Mempersiapkan geometri proyek
6. Mengatur parameter material
7. Menghitung kondisi awal yang telah ditinjau dari konstruksi
8. Menghitung apa yang telah ditentukan pada konstruksi dan jenisnya
9. Menganalisa hasil analisis program *PLAXIS 2D*

4.3.3 Pemodelan

Geometri pada area konstruksi ditentukan oleh profil tanah eksisting. Gambar geometri tanah disesuaikan dengan lapisan tanah yang tertera pada profil tanah, terdiri dari beberapa lapisan tanah yang memiliki jenis tanah berbeda di setiap lapisannya. Untuk membedakan jenis tanah satu sama lain, setiap jenis tanah akan diberi warna yang berbeda-beda. Ada 3 model yang akan digunakan pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Konsolidasi (*Preloading)*

   Model ini merupakan metode *preloading*/timbunan awal tanpa dilakukan perbaikan tanah dengan pemasangan PVD. Konsolidasi pada model ini memerlukan waktu yang sangat lama, sehingga akan dibandingkan percepatan konsolidasinya dengan metode-metode lain.

2. Konsolidasi (*Preloading* dengan *PVD*)

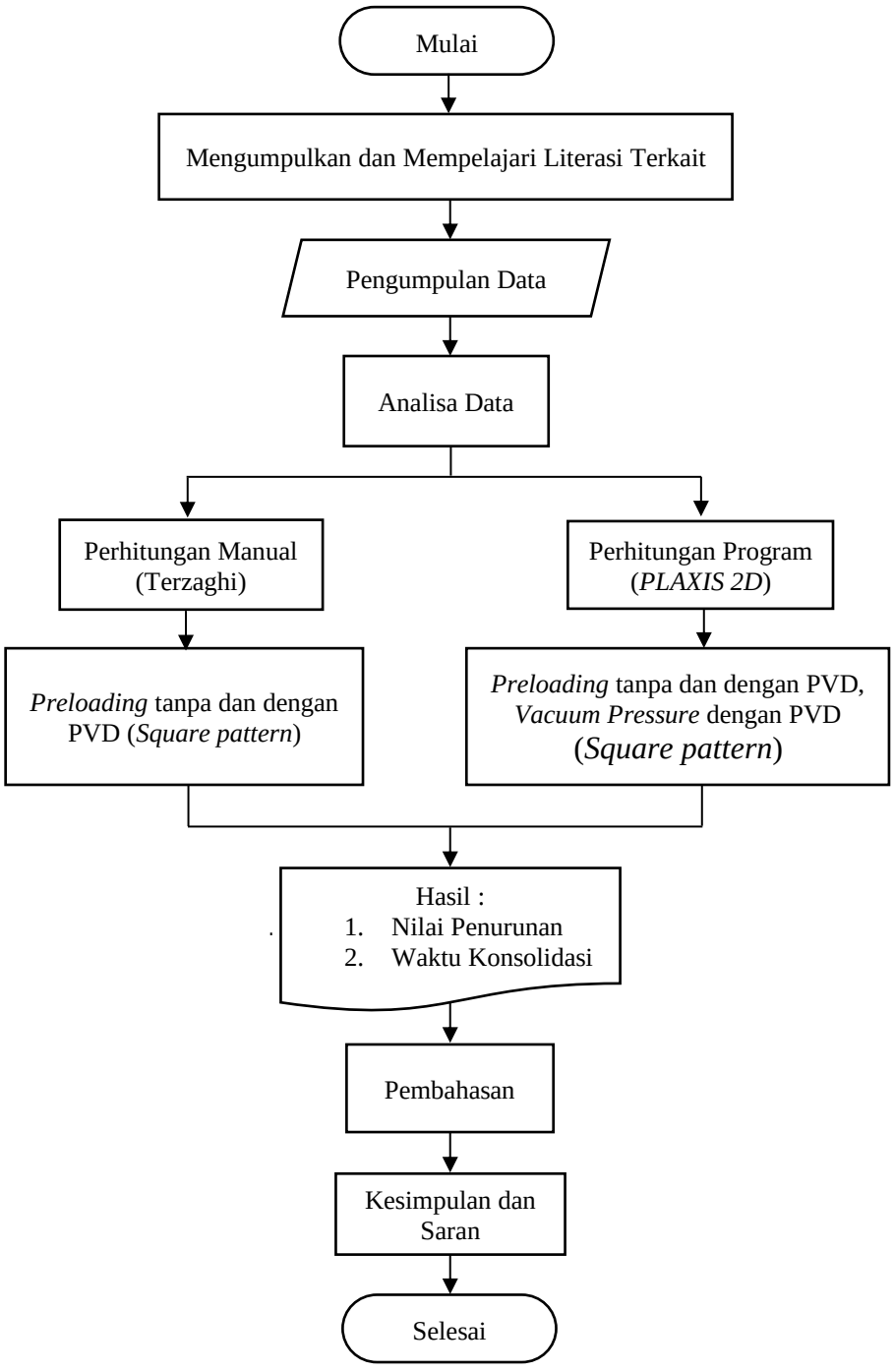
   Model ini merupakan perpaduan antara metode *preloading* dengan penambahan sistem drainase yang berguna untuk mengalirkan air terdisipasi. Semakin cepat air dikeluarkan maka waktu konsolidasi yang ditempuh semakin singkat. PVD dapat mengurangi jumlah beban tambahan pada timbunan *preloading* dengan waktu konsolidasi yang sama.

3. Konsolidasi (*Vacuum Pressure* dengan *PVD*)

   Model ini merupakan kombinasi antara PVD yang dilengkapi dengan mesin *Vacuum Pressure*. Vakum akan berfungsi sebagai beban tambahan, bekerja dengan menghisap air dan udara dari tanah. Pada program PLAXIS 2D, vakum dianalogikan dengan pemberian *lineload* sebesar 70 Kpa disepanjang garis pemasangan PVD.

### 4.4 Bagan Alir

Metode penelitian ini secara ringkas dapat dilihat pada bagan alir yang telah tersaji pada Gambar 4.2 pada poin 4.4 sebagai berikut.




**Gambar 4.2 Bagan Alir Penelitian**

# BAB V
# PEMBAHASAN

## 5.1 Umum

Dalam pembahasan ini akan disajikan analisis dan hasil analisis serta perbandingan metode pada penurunan tanah lunak dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi (U) = 90%. Metode yang digunakan dalam analisis ini diantaranya metode *preloading*, *preloading* dengan PVD, dan *Vacum pressure* dengan PVD. Analisis dilakukan dengan metode perhitungan analitik (Teori Terzaghi), dan menggunakan program *PLAXIS 2D*. Analisis metode analitik dilakukan pada konsolidasi tanah metode *preloading*, dan *preloading* dengan PVD. Analisis menggunakan program *PLAXIS 2D* dengan permodelam *mohr-coulomb* dilakukan pada konsolidasi tanah metode *preloading, preloading* dengan PVD, dan *vacuum pressure* dengan PVD

## 5.2 Data Penelitian

Parameter tanah yang digunakan pada penelitian ini untuk 4 lapisan tanah dasar dan timbunan dapat dilihat pada Tabel 5.1, serta tanah titik uji BHL.04 sebagai objek penelitian dapat dilihat pada Gambar 5.1 sebagai berikut.

**Gambar 5.1 Gambar Titik BHL. 04 Area Reklamasi Proyek *Nickel Smelter***
Sumber : Citra *Google Earth*, 2025

Penelitian ini menggunakan data tanah sekunder BHL-04 yang diperlukan untuk analisis secara analitik dan permodelan *software PLAXIS 2D*. Data tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut.

**Tabel 5.1 Parameter Tanah Eksisting pada BHL-04**

| **Karakteristik** | **Simbol** | **Unit** | **Lapisan 1** | **Lapisan 2** | **Lapisan 3** | **Lapisan 4** | **Tanah Timbunan** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | **BHL 04** | | | | |
| Kedalaman | H | m | 0 - 5,5 | 5,5 -7,5 | 7,5 - 9,5 | 9,5 - 20 | +6 |
| Kadar Air | W | % | 0,53 | 0,49 | 0,49 | 0,09 | |
| Berat Volume (*Unsaturated*) | $\gamma$ | kN/m$^3$ | 14,01 | 16,10 | 16,10 | 20,50 | 16 |
| Berat Volume (*Saturated*) | $\gamma_{sat}$ | kN/m$^3$ | 20,20 | 20,90 | 20,90 | 21,60 | 19 |
| Berat Volume (dry) | $\gamma_d$ | kN/m$^3$ | 9,20 | 10,80 | 10,50 | 18,60 | |
| Koef. Permeabilitas | k | m/hari | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,60 | 0,25 |
| Angka Pori | e | - | 0,53 | 0,44 | 0,44 | 0,40 | 0,60 |
| *Poisson's Ratio* | v | - | 0,30 | 0,20 | 0,20 | 0,25 | 0,30 |
| Modulus Elastisitas | E | kN/m$^2$ | 2500 | 3500 | 3500 | 50000 | 11000 |
| Kohesi | c | kN/m$^2$ | 20 | 76,70 | 76,70 | 15 | 11 |
| Sudut Geser Dalam | $\varphi$ | $^o$ | 25,32 | 28,25 | 29,40 | 45 | 35 |
| Sudut Dilatasi | $\psi$ | $^o$ | 0 | 0 | 0 | 15 | 5 |
| Koef. Konsolidasi vertikal | Cv | | 0,00436 | 0,00602 | 0,00602 | 0,53333 | |

*Prefabricated Vertical Drain (PVD)* yang digunakan telah memenuhi spesifikasi seperti pada Tabel 3.2. Pada penelitian ini, menggunakan PVD dengan pola pemasangan *square pattern*, ukuran 100 mm x 5 mm, jarak antar PVD sebesar 1 m, dan Panjang penyaluran PVD sebesar 9 m.

## 5.3 Analisis Perhitungan Metode Analitik

Analisis perhitungan metode analitik/manual menggunakan teori Terzaghi dilakukan dalam beberapa tahapan sebagai berikut.

5.3.1 Menentukan Propertis Awal

1. Menghitung Nilai *Overconsolidation Ratio (OCR)*

Perhitungan nilai OCR dilakukan untuk menentukan jenis kondisi konsolidasi, apakah *normally consolidated* atau *Overconsolidated.* Selain itu, nilai OCR digunakan untuk menentukan waktu konsolidasi. Untuk menghitung nilai OCR, diperlukan nilai $P_0$ dan Pc' yang dapat dihitung dengan Persamaan 3.5 sebagai berikut.

$$P_0 = \gamma' \text{ x } H_{el} \quad (3.5)$$

$$P_{0\,1} = (20{,}2 - 9{,}81)(5{,}5)$$

$$= 57{,}301 \text{ kN/m}^2$$

Nilai $P_0$ untuk seluruh lapisan dapat dilihat pada Tabel 5.2 Rekapitulasi Perhitungan Nilai $P_0$ sebagai berikut.

**Tabel 5.2 Rekapitulasi Perhitungan Nilai $P_0$**

| **Lapisan** | **Nilai Tegangan *Overburden* Efektif ($P_0$) (kN/m$^2$)** |
|---|---|
| 1 | 57,301 |
| 2 | 22,263 |
| 3 | 22,263 |
| 4 | 123,606 |
| Total | 79,564 |

Berdasarkan tabel diatas, didapatkan nilai total $P_0$ sebesar 79,564 kN/m$^2$. Nilai tekanan prakonsolidasi ($P_c$') didapatkan dari gambar Grafik Tekanan vs Angka Pori yang didapatkan dari hasil uji laboratorium. Berdasarkan grafik tersebut, didapatkan nilai $P_c$' sebesar 1,28 Kg/cm$^2$ atau 125,525 kN/m$^2$. Nilai OCR didapatkan dari Persamaan 3.1 sebagai berikut.

$$OCR = P_0 / P_c' \quad (3.1)$$
$$= 79{,}564/125{,}525$$
$$= 1{,}578 > 1$$

nilai OCR sebesar 1,578 dan lebih besar dari 1, sehingga tipe konsolidasi tanah merupakan *Overconsolidated Type*.

2. Menghitung Nilai Indeks Kompresi Tanah (Cc)

Nilai Cc ditentukan dengan Persamaan 3.10 sebagai berikut, dan rekapitulasi perhitungan Cc dapat dilihat pada Tabel 5.3.

$$Cc = 0{,}009 \times (LL - 10) \quad (3.10)$$
$$Cc_1 = 0{,}009 \times (25{,}89 - 10)$$
$$= 0{,}14301 \text{ cm}^2/\text{s} \qquad = 1{,}236 \text{ m}^2/\text{hari}$$

**Tabel 5.3 Rekapitulasi Perhitungan Nilai Cc**

| Lapisan | Batas Plastis (LL) (%) | Cc ($cm^2/s$) | Cc ($m^2$/hari) |
|---|---|---|---|
| 1 | 25,89 | 0,14301 | 1,236 |
| 2 | 26,01 | 0,14409 | 1,245 |
| 3 | 26,01 | 0,14409 | 1,245 |
| 4 | 11,11 | 0,01 | 0,086 |

3. Menghitung Koefisien Konsolidasi Vertikal Gabungan ($Cv_{gab}$)

Nilai Cv didapatkan dari hasil pengujian laboratorium. Cv yang digunakan merupakan Cv gabungan ($Cv_{gab}$) yang ditentukan dengan Persamaan 3.11 sebagai berikut.

$$Cv_{gab} = \frac{(H_1+H_2+\cdots+H_n)^2}{(\frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}}+\frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}}+\cdots+\frac{H_n}{\sqrt{C_{vn}}})^2} \quad (3.11)$$

$$Cv_{gab} = \frac{(5{,}5+7{,}5+9{,}5+20)^2}{(\frac{5{,}5}{\sqrt{0{,}00436}}+\frac{7{,}5}{\sqrt{0{,}00602}}+\frac{9{,}5}{\sqrt{0{,}00602}}+\frac{20}{\sqrt{0{,}53329}})^2}$$
$$= 0{,}01453 \text{ m}^2/\text{hari}$$

5.3.2 Perhitungan Penurunan Konsolidasi Primer Metode Terzaghi

1. Perhitungan Tinggi Timbunan Rencana

Diketahui $\gamma_{timb}$ = 16 kN/m$^3$, elevasi rencana dari tanah eksisting $H_{el}$ = +5m, sehingga

$$q = H_{el} \times \gamma_{timb} \quad (3.7)$$
$$= 5 \times 16$$
$$= 80 \text{ kN/m}^2$$

kemudian ditambahkan dengan tambahan beban konstruksi diatas timbunan sebesar 10 kN/m$^2$, sehingga

$$q_{pakai} = q + 10 \text{ kN/m}^2$$
$$= 80 + 10$$
$$= 90 \text{ kN/m}^2$$

Tinggi rencana didapatkan dari perhitungan persamaan 3.7 sebagai berikut.

$$H_R = q / \gamma_{tmb} \quad (3.7)$$
$$= 90 / 16$$
$$= 5{,}70 \text{ m, dibulatkan menjadi 6 m.}$$

2. Perhitungan Nilai Distribusi Tegangan Tanah ΔP

Perhitungan nilai distribusi tegangan tanah (ΔP) dapat menggunakan Persamaan 3.6 sebagai berikut.

$$q_0 = H_R \times \gamma_{timb} \quad (3.7)$$
$$= 6 \times 16$$
$$= 96 \text{ kN/m}^2$$

Untuk mengetahui nilai I, dapat digunakan Grafik Osterberg, 1957 pada Gambar 3.2 Diketahui a = 6 m, b = 27 m, dan z = 20 m.

$$a/z = 6/20 = 0{,}30 \text{ m,}$$

b/z = 27/20

= 1,35 m,

dan didapatkan nilai I = 0,46, sehingga

$\Delta P = 2 \times q_0 \times I$ (3.6)

$= 2 \times 96 \times 0,46$

$= 88\ kN/m^2$

3. Perhitungan Penurunan Tanah Konsolidasi

Pada lapisan pertama, diketahui dilakukan perhitungan penurunan tanah konsolidasi primer dengan menggunakan Persamaan 3.4 dikarenakan

$P_0 + \Delta P > P_c'$

$79,56 + 88 > 125,5$

$167,88 > 125,5$

Diketahui :

$H_1 = 5,5$ m

$Cc_1 = 1,236\ m^2/hari$

$Cs_1 = 0,2 \times Cc$

$= 0,2 \times 1,236$

$= 0,247\ m^2/hari$

$e_{01} = 0,532$

$P_{01} = 57,3\ kN/m^2$

$\Delta P = 88\ kN/m^2$

sehingga perhitungan penurunan tanah konsolidasi primer sebagai berikut.

$$Sp_1 = \frac{C_s \times H}{1+e_0}\log\left(\frac{Pc'}{Po'}\right) + \frac{C_c \times H}{1+e_0}\log\left(\frac{Po+\Delta P}{Pc'}\right) \quad (3.4)$$

$$= \frac{0,247 \times 5,5}{1+0,532}\log\left(\frac{125,5}{79,56}\right) + \frac{1,236 \times 5,5}{1+0,532}\log\left(\frac{57,3+88}{125,5}\right)$$

$= 0,588$ m

Rekapitulasi perhitungan penurunan tanah konsolidasi dapat dilihat pada Tabel 5.4 sebagai berikut dan didapatkan penurunan tanah konsolidasi primer sebesar 1,205 m.

**Tabel 5.4 Rekapitulasi Perhitungan Penurunan Tanah Konsolidasi Primer**

| Lapisan Tanah | H (m) | Cc ($kN/m^2$) | Cs ($kN/m^2$) | $e_0$ | $P_0$ ($kN/m^2$) | Sp (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5,5 | 1,236 | 0,247 | 0,532 | 57,301 | 0,588 |
| 2 | 7,5 | 1,245 | 0,249 | 0,44 | 22,263 | 0,617 |
| 3 | 9,5 | 1,245 | 0,249 | 0,44 | 22,263 | 0,782 |
| 4 | 20 | 0,086 | 0,017 | 0,4 | 123,6 | 0,282 |
| Total Penurunan | | | | | | 1,205 |

5.3.3 Perhitungan Derajat Konsolidasi Metode *Preloading* (Tanpa PVD)

Perhitungan derajat konsolidasi menggunakan persamaan-persamaan sebagai berikut.

$H_{dr}$ = 0,5 H

= 0,5 (9,5 m)

= 4,75 m

$T_{v \text{ hari ke-1}} = \frac{t \; x \; Cv}{Hdr^2}$ (3.9)

$= \frac{1 \; x \; 0{,}01453}{4{,}75^2}$

= 0,0006439 hari

$U_{v \text{ hari ke-1}} = \frac{\sqrt{\frac{4 \; x \; Tv}{\pi}}}{(1+\left(\frac{4Tv}{\pi}\right)^{2,8})^{0,179}}$ (3.8)

$= \frac{\sqrt{\frac{4 \; x \; 0{,}0006439}{3{,}14}}}{(1+\left(\frac{4(0{,}0006439)}{3{,}14}\right)^{2,8})^{0,179}}$

= 0,028633 = 2,8633 %

Penurunan tanah pada waktu t = 1 dapat dihitung dengan Persamaan sebagai berikut.

$S_1$ = $Uv_1$ x $Sp_{total}$

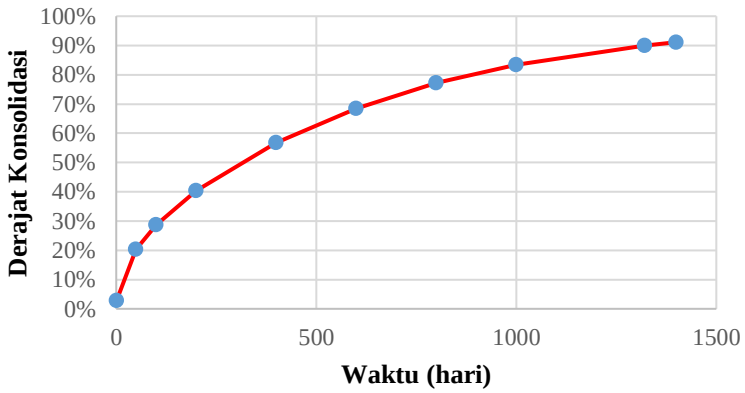
= 0,028633 x 1,205

= 0,0345 m

Rekapitulasi perhitungan derajat konsolidasi metode *preloading* tanpa PVD dapat dilihat pada Tabel 5.5, dan gambar grafik derajat konsolidasi terhadap waktu dapat dilihat pada Gambar 5.2.

**Tabel 5.5 Rekapitulasi Perhitungan Derajat Konsolidasi Metode *Preloading* (Tanpa PVD)**

| t (hari) | Cv gabungan ($m^2$/hari) | Tv | Uv | S (m) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,01453 | 0,000644 | 0,028633 | 0,0345 |
| 50 | | 0,032196 | 0,202463 | 0,2441 |
| 100 | | 0,064392 | 0,286286 | 0,3451 |
| 200 | | 0,128784 | 0,404479 | 0,4876 |
| 400 | | 0,257568 | 0,568261 | 0,6850 |
| 600 | | 0,386352 | 0,685414 | 0,8262 |
| 1000 | | 0,643920 | 0,834902 | 1,0064 |
| 1200 | | 0,772705 | 0,879692 | 1,0604 |
| 1321 | | 0,850619 | 0,900062 | 1,0850 |



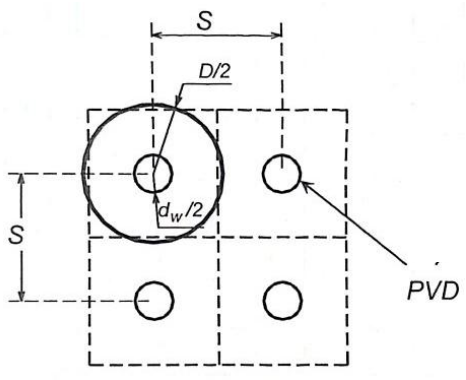

**Gambar 5.2 Grafik Derajat Konsolidasi terhadap Waktu Metode *Preloading* (tanpa PVD)**

Dari hasil perhitungan, didapatkan waktu untuk mencapai derajat konsolidasi 90% selama 1321 hari dengan penurunan tanah sebesar 1,085 m.

5.3.4 Perhitungan Derajat Konsolidasi Metode *Preloading* Menggunakan PVD

Perhitungan derajat konsolidasi menggunakan PVD dilakukan dengan pola pemasangan PVD *square pattern*, dengan jarak pemasangan antar PVD 1 m.

Ukuran PVD yang digunakan adalah 100 mm x 5 mm. dan pola pemasangan PVD *square pattern* dapat dilihat pada Gambar 5.3 sebagai berikut.




**Gambar 5.3 Pola Pemasangan PVD *Square Pattern***
Sumber : Hardiyatmo (2022)

Perhitungan waktu konsolidasi yang diperlukan untuk mencapai derajat konsolidasi 90%, pada hari pertama (t = 1 hari) adalah sebagai berikut.

$Cv_{gab}$ = 0,01453 $m^2$/hari

$T_{v \text{ hari ke-1}} = \frac{t \; x \; Cv}{Hdr^2}$ (3.9)

$= \frac{1 \; x \; 0{,}01453}{4{,}75^2}$

= 0,000644 hari

$U_{v \text{ hari ke-1}} = \frac{\sqrt{\frac{4 \; x \; Tv}{\pi}}}{(1+\left(\frac{4Tv}{\pi}\right)^{2,8})^{0,179}}$ (3.8)

$= \frac{\sqrt{\frac{4 \; x \; 0{,}000644}{3{,}14}}}{(1+\left(\frac{4(0{,}000644)}{3{,}14}\right)^{2,8})^{0,179}}$

= 0,028633 = 2,8633 %

Untuk menghitung koefisien konsolidasi *horizontal* (Ch), dapat digunakan Persamaan 3.12 sebagai berikut.

Ch = (1 s/d 2) x Cv (3.12)

= 1,5 x 0,01453

= 0,021793 $m^2$/hari

Untuk menentukan daerah ekuivalen (De), dapat ditentukan dengan Persamaan 3.19 sebagai berikut.

$$De = 1{,}13 \times s \quad (3.19)$$
$$= 1{,}13 \times 1$$
$$= 1{,}13 \text{ m}$$

Untuk menentukan diameter ekuivalen drainase vertikal (dw), dapat ditentukan dengan Persamaan 3.18 sebagai berikut.

$$dw = 2\,(p + l)/\pi \quad (3.18)$$
$$= 2\,(0{,}1 + 0{,}005)/3{,}14$$
$$= 0{,}066845 \text{ m}$$

Untuk mencari faktor hambatan akibat jarak PVD (F(n)), dapat ditentukan dengan Persamaan 3.21 sebagai berikut.

$$F(n) = \ln (De / dw) - 3/4 \quad (3.21)$$
$$= \ln (1{,}13 / 0{,}066845) - ¾$$
$$= 2{,}077595$$

Untuk mencari faktor waktu *radial* (Th), dapat ditentukan dengan Persamaan 3.13 sebagai berikut.

$$Th = (Ch \times t) / De^2 \quad (3.13)$$
$$= (0,\ 021793 \times 1) / (1{,}13)^2$$
$$= 0{,}017067 \text{ hari}$$

Untuk mencari derajat konsolidasi *radial* (Uh), dapat ditentukan dengan Persamaan 3.14 sebagai berikut.

$$Uh = 1 - exp^{((-8 \times Th) / F(n))} \quad (3.14)$$
$$= 1 - exp^{((-8 \times 0{,}017067) / 2{,}077595)}$$
$$= 0{,}063605 \quad = 6{,}3605\ \%$$

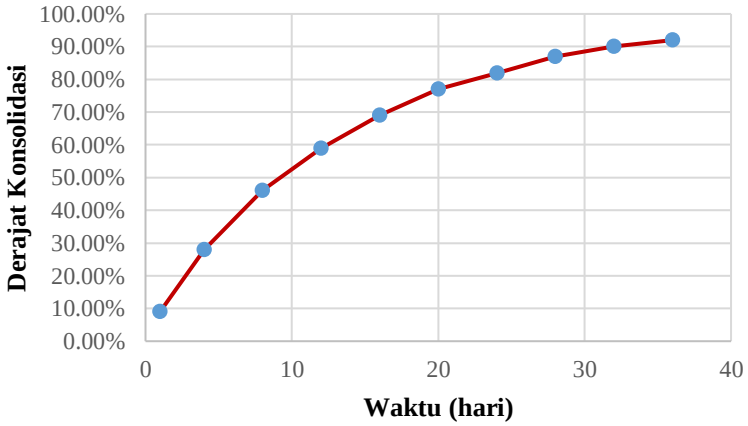
Untuk mencari derajat konsolidasi pada tanah yang distabilkan menggunakan PVD, dapat ditentukan dengan Persamaan 3.15 sebagai berikut.

$$U = 1 - (1 - Uv)(1 - Uh) \quad (3.15)$$
$$= 1 - (1 - 0{,}028633)(1 - 0{,}063605)$$
$$= 0{,}0904$$
$$= 9{,}04\ \%$$

Hasil perhitungan derajat konsolidasi tanah metode *preloading* menggunakan PVD dapat dilihat pada Tabel 5.6, dan gambar grafik konsolidasi tanah 90 % terhadap waktu pada metode ini dapat dilihat pada Gambar 5.4 sebagai berikut,

**Tabel 5.6 Rekapitulasi Perhitungan Derajat Konsolidasi Metode *Preloading* Menggunakan PVD Pola Segiempat dan Jarak 1 m**

| t (hari) | Cv ($m^2$/hari) | Tv | Uv | Ch ($m^2$/hari) | Th | Uh | U | S (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,01524 | 0.000644 | 0.028633 | 0.0227 | 0.017067 | 0.0636 | 9% | 0.109 |
| 5 | | 0.003220 | 0.064026 | | 0.085334 | 0.2801 | 33% | 0.393 |
| 15 | | 0.009659 | 0.110896 | | 0.256003 | 0.6268 | 67% | 0.806 |
| 20 | | 0.012878 | 0.128052 | | 0.341337 | 0.7314 | 77% | 0.923 |
| 25 | | 0.016098 | 0.143166 | | 0.426672 | 0.8066 | 83% | 1.006 |
| 30 | | 0.019318 | 0.156830 | | 0.512006 | 0.8608 | 88% | 1.064 |
| 32 | | 0.020605 | 0.161973 | | 0.546140 | 0.8779 | 90% | 1.082 |




**Gambar 5.4 Grafik Derajat Konsolidasi terhadap Waktu Metode *Preloading* dengan PVD**

Dari Tabel 5.6, dapat disimpulkan bahwa untuk mencapai derajat konsolidasi tanah 90 %, pada metode ini membutuhkan waktu 32 hari dengan penurunan tanah sebesar 1,082 m.

### 5.4 Analisis Menggunakan *Software PLAXIS 2D*

Analisis konsolidasi tanah dilakukan dengan menggunakan *software PLAXIS 2D,* dengan menggambar geometri tanah pada halaman kerja, kemudian memasukkan parameter tanah dan memasukkan struktur tanah dan drainase, dan kemudian dianalisis. Hasil analisis dari *PLAXIS 2D* berupa *deformed mesh* dan *total displacement*. Spesifikasi PVD yang digunakan adalah sama seperti yang digunakan dalam perhitungan manual, dan parameter tanah yang di masukkan kedalam *PLAXIS 2D* dapat dilihat pada Tabel 5.7 sebagai berikut.

**Tabel 5.7 *Input* Parameter Program PLAXIS 2D**

| Karakteristik | Simbol | Unit | Lapisan 1 | Lapisan 2 | Lapisan 3 | Lapisan 4 | Tanah Timbunan |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Elevasi | H | m | -5,5 | -7,5 | -9,5 | -20 | +6 |
| Berat Volume (*Unsaturated*) | $\gamma$ | kN/m$^3$ | 14,01 | 16,1 | 16,1 | 20,5 | 16 |
| Berat Volume (*Saturated*) | $\gamma_{sat}$ | kN/m$^3$ | 20,2 | 20,9 | 20,9 | 21,6 | 19 |
| Koef. Permeabilitas | k | m/hari | 0,248 | 0,248 | 0,248 | 0,60 | 0,248 |
| Angka Pori | e | - | 0,53 | 0,44 | 0,44 | 0,4 | 0,6 |
| *Poisson's Ratio* | $\nu$ | - | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,25 | 0,3 |
| Modulus Elastisitas | E | kN/m$^2$ | 2500 | 3500 | 3500 | 50000 | 11000 |
| Kohesi | c | kN/m$^2$ | 20 | 76,7 | 76,7 | 15 | 11 |
| Sudut Geser Dalam | $\varphi$ | $^o$ | 25,32 | 28,25 | 29,4 | 45 | 35 |
| Sudut Dilatasi | $\psi$ | $^o$ | 0 | 0 | 0 | 15 | 5 |

5.4.1 Analisis Konsolidasi Tanah Metode *Preloading* dengan *PLAXIS 2D*

Langkah-langkah analisis konsolidasi tanah metode konvensional/*preloading* (tanpa PVD) dengan *PLAXIS 2D* dapat dilihat pada Tabel 5.8 sebagai berikut.

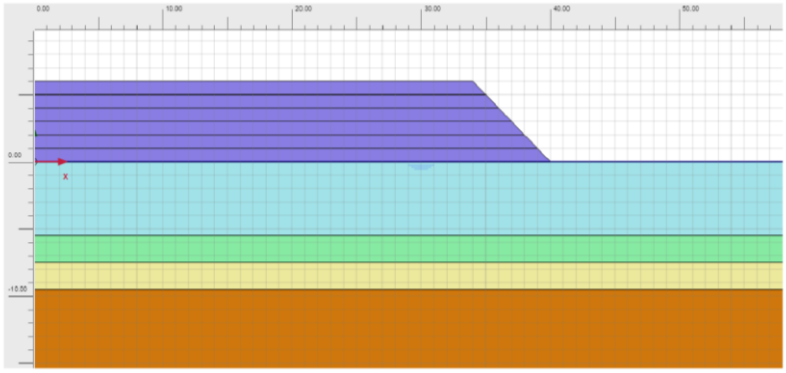
**Tabel 5.8 Langkah Analisis Konsolidasi Tanah Metode *Preloading* dengan Program *PLAXIS 2D***

| No | Halaman | | Langkah |
|---|---|---|---|
| 1. | *Soil* | a. | Membuat borehole dan memodifikasi lapisan tanah dengan kedalaman tertentu. |
| | | b. | Menentukan jenis tanah dan meng-*input* parameter tanah. |
| 2. | *Structure* | a. | Membuat poligon timbunan tanah dan menentukan jenis tanah timbunan. |
| | | b. | Menentukan layer lapisan tanah timbunan |
| 3. | *Mesh* | a. | *Generate Mesh* dan pilih '*fine'* |
| | | b. | Menentukan '*Point of Curves'* |
| 4. | *Flow Condition* | a | Menentukan '*Ground Water Level'* |
| 5. | *Stage construction* | a | Menentukan *phase* dan parameter *phase* |
| | | b | Menganalisis *Minimum Excess Pore Pressure* |

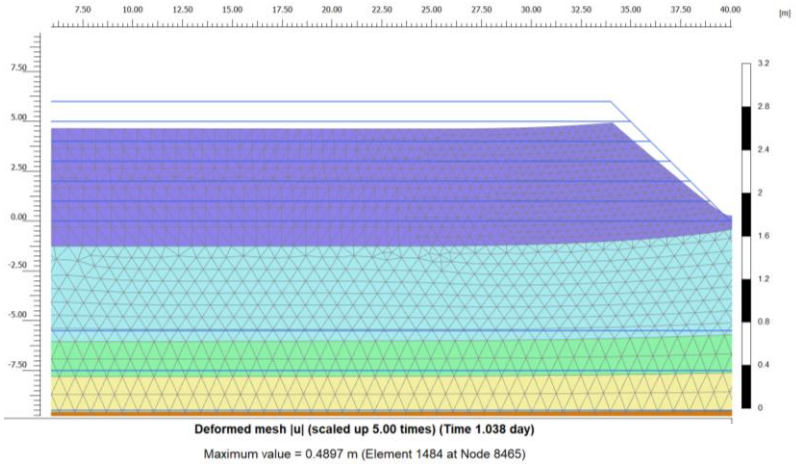
Pada tahapan *stage construction*, phase yang digunakan dalam metode ini dapat dilihat pada Tabel 5.9. Hasil *output* PLAXIS 2D metode ini dapat dilihat pada Gambar 5.5 hingga 5.7 sebagai berikut. Berdasarkan hasil analisis, didapatkan penurunan tanah maksimum sebesar 0.498 m dengan waktu 1038 hari.

**Tabel 5.9 *Phase* pada Staged Construction Kondisi Timbunan Tanpa PVD Program *PLAXIS 2D***

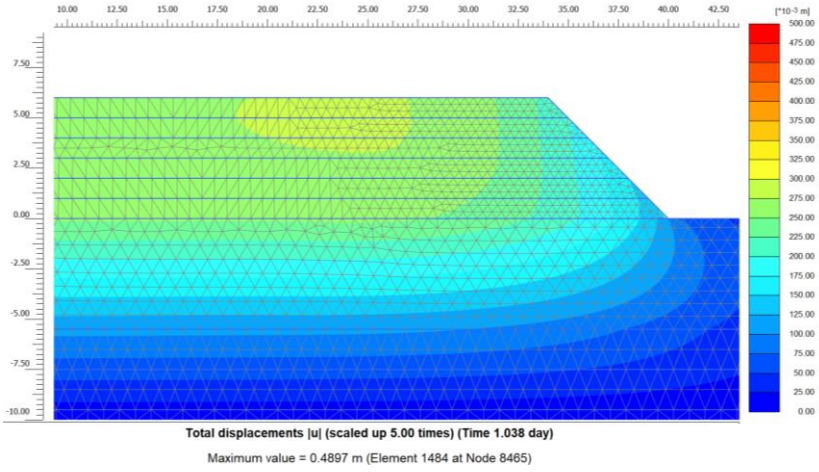
| ***Identification*** | ***Phase*** | ***Strat From Phase*** | ***Calculation Type*** | ***Loading Type*** | ***Time (day)*** | ***Activation*** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Initial Phase* | 0 | - | *K0 Procedure* | *Staged Construction* | 0 | - |
| *1st Embankment* | 1 | 0 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *1st Embankment* |
| *Consolidation 1st Embankment* | 2 | 1 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 10 | *1st Embankment* |
| *2nd Embankment* | 3 | 2 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *1st - 2nd Embankment* |
| *Consolidation 2nd Embankment* | 4 | 3 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 10 | *1st - 2nd Embankment* |
| *3rd Embankment* | 5 | 4 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *1st - 3rd Embankment* |
| *Consolidation 3rd Embankment* | 6 | 5 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 10 | *1st - 3rd Embankment* |
| *4th Embankment* | 7 | 6 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *1st - 4th Embankment* |
| *Consolidation 4th Embankment* | 8 | 7 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 10 | *1st - 4th Embankment* |
| *5th Embankment* | 9 | 8 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *1st - 5th Embankment* |
| *Consolidation 5th Embankment* | 10 | 9 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 10 | *1st - 5th Embankment* |
| *6th Embankment* | 11 | 10 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *1st - 6th Embankment* |
| *Consolidation 6th Embankment* | 12 | 11 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 10 | *1st - 6th Embankment* |
| *Construction* | 20 | 0 | *Plastic* | *Staged Construction* | 0 | *1st - 6th Embankment* |
| *MEPP* | 19 | 20 | *Consolidation* | *Degree of Consolidation* | - | *1st - 6th Embankment* |



**Gambar 5.5 Permodelan pada *PLAXIS 2D* Kondisi Timbunan Tanpa PVD**




**Gambar 5.6 *Deformed Mesh* Kondisi Beban Timbunan Tanpa PVD pada Program *PLAXIS 2D***




**Gambar 5.7 *Total Displacement* Berdasarkan Bidang Gelincir Kondisi Beban Timbunan Tanpa PVD pada Program *PLAXIS 2D***

5.4.2 Analisis Konsolidasi Tanah Menggunakan PVD dengan Program *PLAXIS 2D*

Langkah-langkah analisis konsolidasi tanah metode *preloading* menggunakan PVD dengan *PLAXIS 2D* dapat dilihat pada Tabel 5.10 sebagai berikut.

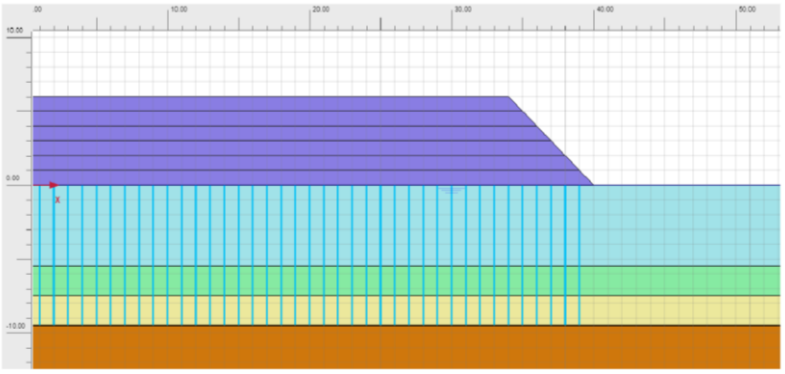
**Tabel 5.10 Langkah Analisis Konsolidasi Tanah Kondisi Timbunan + PVD Program *PLAXIS 2D***

| No | Halaman | | Langkah-Langkah |
|---|---|---|---|
| 1. | *Soil* | a. | Membuat borehole dan memodifikasi lapisan tanah dengan kedalaman tertentu. |
| | | b. | Menentukan jenis tanah dan meng-*input* parameter tanah. |
| 2. | *Structure* | a. | Membuat poligon timbunan tanah dan menentukan jenis tanah timbunan. |
| | | b. | Menentukan layer lapisan tanah timbunan |
| | | c | Membuat struktur drainase vertikal |
| 3. | *Mesh* | a. | *Generate Mesh* dan pilih '*fine'* |
| | | b. | Menentukan '*Point of Curves'* |
| 4. | *Flow Condition* | a | Menentukan '*Ground Water Level'* |
| 5. | *Stage construction* | a | Menentukan *phase* dan parameter *phase* |
| | | b | Menganalisis *Minimum Excess Pore Pressure* |

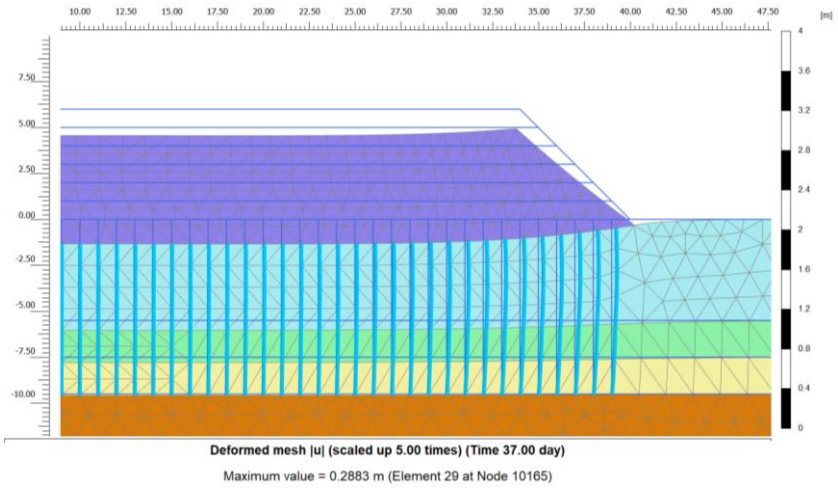
Pada tahapan *stage construction*, phase yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 5.11. Hasil *output* PLAXIS 2D metode ini dapat dilihat pada Gambar 5.8 hingga 5.10 sebagai berikut. Berdasarkan hasil analisis, didapatkan penurunan tanah maksimum sebesar 0.3 m dengan waktu 37 hari.

**Tabel 5.11 *Phase* pada Staged Construction Kondisi Timbunan + PVD Program *PLAXIS 2D***

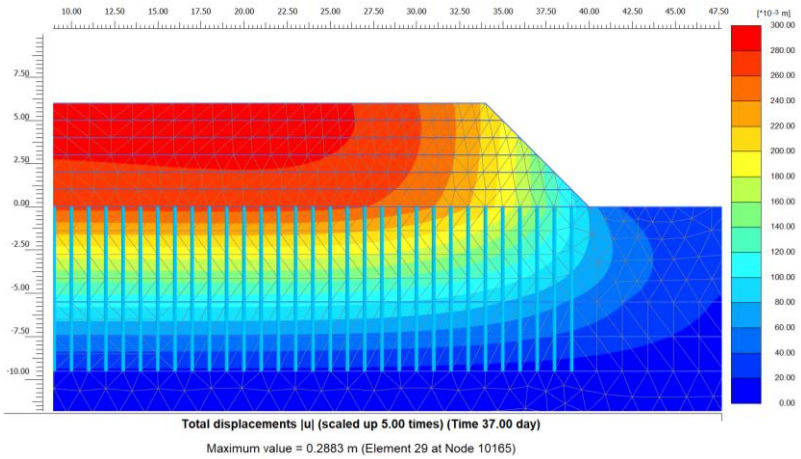
| ***Identification*** | ***Phase*** | ***Strat From Phase*** | ***Calculation Type*** | ***Loading Type*** | ***Time (day)*** | ***Activation*** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Initial Phase* | 0 | - | *K0 Procedure* | *Staged Construction* | 0 | - |
| *Instal PVD* | 20 | 0 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *PVD* |
| *1st Embankment* | 1 | 20 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st Embankment* |
| *Consolidation 1st Embankment* | 2 | 1 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 5 | *PVD, 1st Embankment* |
| *2nd Embankment* | 3 | 2 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st - 2nd Embankment* |
| *Consolidation 2nd Embankment* | 4 | 3 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 5 | *PVD, 1st - 2nd Embankment* |
| *3rd Embankment* | 5 | 4 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st - 3rd Embankment* |
| *Consolidation 3rd Embankment* | 6 | 5 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 5 | *PVD, 1st - 3rd Embankment* |
| *4th Embankment* | 7 | 6 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st - 4th Embankment* |
| *Consolidation 4th Embankment* | 8 | 7 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 5 | *PVD, 1st - 4th Embankment* |
| *5th Embankment* | 9 | 8 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st - 5th Embankment* |
| *Consolidation 5th Embankment* | 10 | 9 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 5 | *PVD, 1st - 5th Embankment* |
| *6th Embankment* | 11 | 10 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st - 6th Embankment* |
| *Consolidation 6th Embankment* | 12 | 11 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 5 | *PVD, 1st - 6th Embankment* |
| *MEPP* | 19 | 12 | *Consolidation* | *Degree of Consolidation* | - | *PVD, 1st - 6th Embankment* |



**Gambar 5.8 Permodelan pada *PLAXIS 2D* Kondisi Timbunan + PVD *Square Pattern* Jarak Pemasangan 1 m**




**Gambar 5.9 *Deformed Mesh* Kondisi Beban Timbunan + PVD pada Program *PLAXIS 2D***




**Gambar 5.10 *Total Displacement* Berdasarkan Bidang Gelincir Kondisi Beban Timbunan + PVD pada Program *PLAXIS 2D***

5.4.3 Analisis Konsolidasi Tanah Menggunakan PVD + *Vacum Pressure* dengan *PLAXIS 2D Sofware*

Langkah-langkah analisis konsolidasi tanah metode *vacuum pressure* dan PVD dengan *PLAXIS 2D* dapat dilihat pada Tabel 5.12 sebagai berikut.

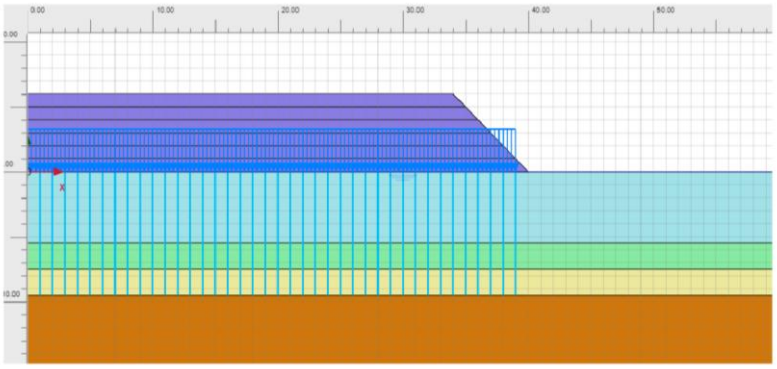
**Tabel 5.12 Langkah Analisis Konsolidasi Tanah Kondisi Vacuum Pressure + PVD Program *PLAXIS 2D***

| No | Halaman | | Langkah |
|---|---|---|---|
| 1. | *Soil* | a. | Membuat borehole dan memodifikasi lapisan tanah dengan kedalaman tertentu. |
| | | b. | Menentukan jenis tanah dan meng-*input* parameter tanah. |
| 2. | *Structure* | a. | Membuat poligon timbunan tanah dan menentukan jenis tanah timbunan. |
| | | b. | Menentukan layer lapisan tanah timbunan |
| | | c | Membuat struktur drainase vertikal |
| | | d | Menginput *line load* sebesar 70 Kpa disepanjang garis PVD sebagai beban *Vacum Pressure* |
| 3. | *Mesh* | a. | *Generate Mesh* dan pilih '*fine'* |
| | | b. | Menentukan '*Point of Curves'* |
| 4. | *Flow Condition* | a | Menentukan '*Ground Water Level'* |
| 5. | *Stage construction* | a | Menentukan *phase* dan parameter *phase* |
| | | b | Menganalisis *Minimum Excess Pore Pressure* |

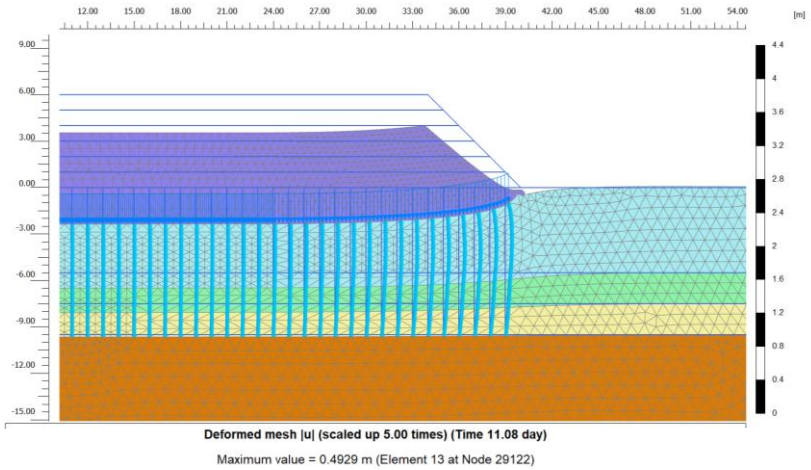
Pada tahapan *stage construction*, phase yang digunakan pada metode ini dapat dilihat pada Tabel 5.13. Hasil *output* PLAXIS 2D metode ini dapat dilihat pada Gambar 5.11 hingga 5.13 sebagai berikut. Berdasarkan hasil analisis, didapatkan penurunan tanah maksimum sebesar 0.3 m dengan waktu 37 hari. Berdasarkan hasil analisis, didapatkan penurunan tanah maksimum sebesar 0.3 m dengan waktu selama 37 hari.

**Tabel 5.13 *Phase* pada Staged Construction Kondisi *Vacuum Pressure* + PVD Program *PLAXIS 2D***

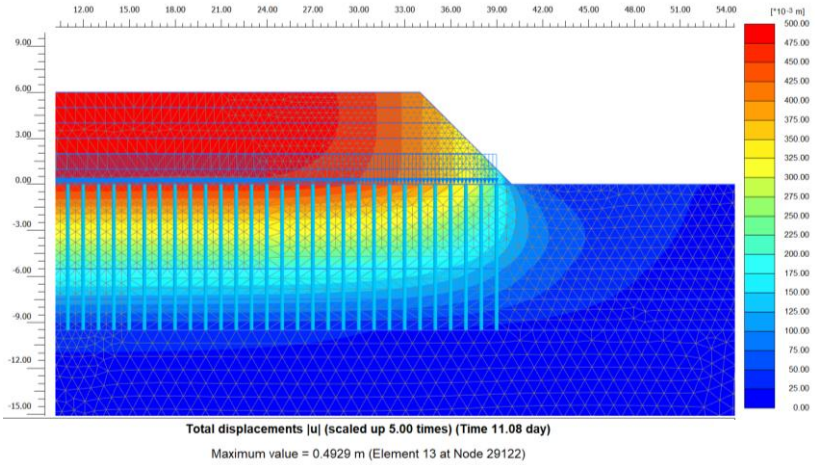
| ***Identification*** | ***Phase*** | ***Strat From Phase*** | ***Calculation Type*** | ***Loading Type*** | ***Time (day)*** | ***Activation*** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Initial Phase* | 0 | - | *K0 Procedure* | *Staged Construction* | 0 | - |
| *Instal PVD* | 20 | 0 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *PVD* |
| *1st Embankment* | 1 | 20 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st Embankment, Line Load* |
| *Consolidation 1st Embankment* | 2 | 1 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st Embankment, Line Load* |
| *2nd Embankment* | 3 | 2 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st - 2nd Embankment, Line Load* |
| *Consolidation 2nd Embankment* | 4 | 3 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st - 2nd Embankment, Line Load* |
| *3rd Embankment* | 5 | 4 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st - 3rd Embankment, Line Load* |
| *Consolidation 3rd Embankment* | 6 | 5 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st - 3rd Embankment, Line Load* |
| *4th Embankment* | 7 | 6 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st - 4th Embankment, Line Load* |
| *Consolidation 4th Embankment* | 8 | 7 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st - 4th Embankment, Line Load* |
| *5th Embankment* | 9 | 8 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st - 5th Embankment, Line Load* |
| *Consolidation 5th Embankment* | 10 | 9 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st - 5th Embankment, Line Load* |
| *6th Embankment* | 11 | 10 | *Plastic* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st - 6th Embankment, Line Load* |
| *Consolidation 6th Embankment* | 12 | 11 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 1 | *PVD, 1st - 6th Embankment, Line Load* |
| *Instal Vacum* | 21 | 20 | *Plastic* | *Staged Construction* | 0 | *PVD, Line Load* |
| *Vacum On* | 22 | 21 | *Consolidation* | *Staged Construction* | 10 | *PVD, Line Load* |
| *Construction* | 13 | 22 | *Plastic* | *Staged Construction* | 0 | *PVD, 1st - 6th Embankment, Line Load* |
| *MEPP* | 19 | 13 | *Consolidation* | *Degree of Consolidation* | - | *PVD, 1st - 6th Embankment, Line Load* |



**Gambar 5.11 Permodelan pada *PLAXIS 2D* Kondisi *Vacum Pressure* dengan *Line Load* + PVD *Square Pattern* Jarak Pemasangan 1 m**




**Gambar 5.12 *Deformed Mesh* Kondisi *Vacum Pressure* dengan *Line Load* + PVD pada Program *PLAXIS 2D***




**Gambar 5.13 *Total Displacement* Berdasarkan Bidang Gelincir Kondisi *Vacum Pressure* dengan *Line Load* + PVD pada Program *PLAXIS 2D***

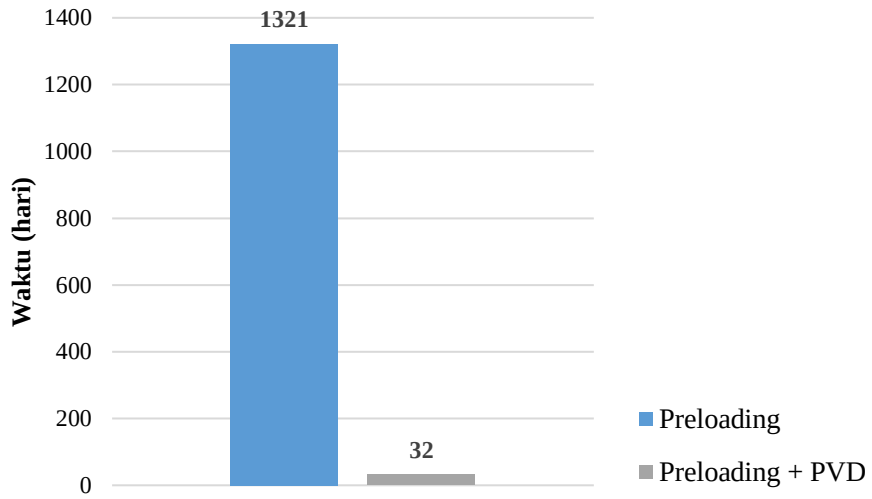
## 5.5 Pembahasan

Hasil dari analisis secara manual dan menggunakan program *PLAXIS 2D* secara keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 5.14 sebagai berikut.

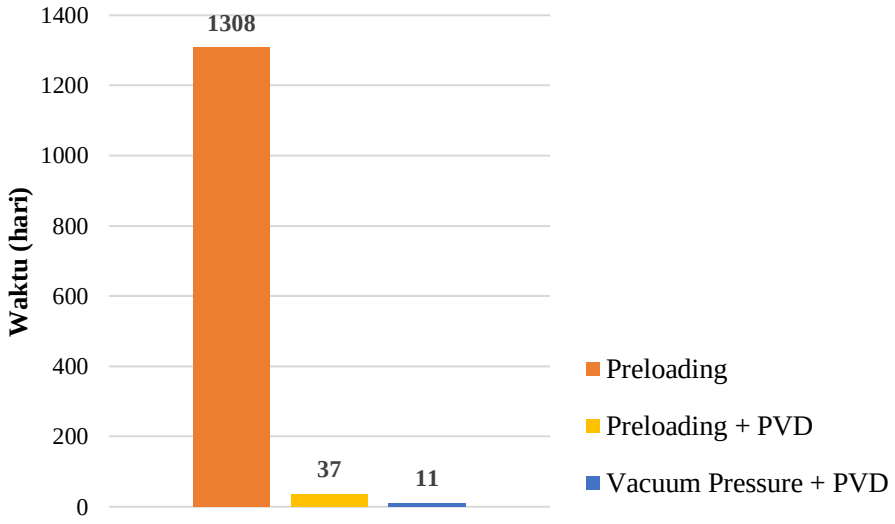
**Tabel 5.14 Rekapitulasi Perhitungan Analisis Konsolidasi Tanah**

| No | Kondisi | Waktu (hari) | | Penurunan Pada Konsolidasi 90% (m) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Manual | *PLAXIS 2D* | Manual | *PLAXIS 2D* |
| 1 | Konsolidasi (*Preloading*) | 1321 | 1038 | 1,085 | 0,498 |
| 2 | Konsolidasi (*Preloading* + PVD) | 32 | 37 | 1,082 | 0,3 |
| 3 | Konsolidasi (Vacuum Pressure + PVD) | - | 11 | - | 0.3 |

Dari hasil analisis, pada perhitungan manual didapatkan waktu yang dibutuhkan untuk konsolidasi 90% untuk kondisi *preloading* adalah 1321 hari dengan besar penurunan 1,085 m, kondisi *preloading* dengan PVD membutuhkan waktu lebih cepat, sebesar 32 hari dengan penurunan tanah sebesar 1,082 m. untuk perhitungan metode elemen hingga/Program *PLAXIS 2D* kondisi *preloading* adalah 1038 hari dengan besar penurunan maksimum 0,498 m, kondisi *preloading* dengan PVD membutuhkan waktu sebesar 37 hari dengan penurunan tanah sebesar maksimum 0,3 m, dan kondisi *vacuum pressure* dengan PVD membutuhkan waktu sebesar 11 hari dengan penurunan tanah sebesar 0,3 m. Pada Gambar 5.12, permodelan konsolidasi tanah (*vacuum pressure + PVD*) menggunakan *line load* sebesar 70 Kpa sebagai model mesin *vacuum pressure* bertekanan 70 Kpa. Diagram perbandingan waktu konsolidasi antar metode dapat dilihat pada Gambar 5.14 dan Gambar 5.15 berikut.




**Gambar 5.14 Diagram Perbandingan Waktu Konsolidasi 90% Perhitungan Manual**




**Gambar 5.15 Diagram Perbandingan Waktu Konsolidasi 90% Perhitungan Program *PLAXIS 2D***

Dilihat dari gambar diagram tersebut, diketahui bahwa penanganan yang dilakukan dengan metode yang berbeda, menghasilkan efisiensi waktu yang berbeda. Pada kasus konsolidasi (*preloading*) membutuhkan waktu lebih lama, jauh bila dibandingkan dengan waktu konsolidasi dengan PVD (*preloading* + PVD). Hal ini dikarenakan PVD mampu mempercepat air pori tanah terdisipasi keluar sehingga konsolidasi tanah berlangsung lebih cepat. Kemudian pada konsolidasi tanah metode *vacuum pressure* + PVD, waktu konsolidasi tanah semakin cepat. Hal

ini dikarenakan adanya kinerja tambahan mesin pompa hisap bertekanan 70 Kpa yang dipasang pada sisi luasan bidang konsolidasi menggunakan PVD, dengan bantuan *geotextile* sehingga menimbulkan efek hisap pada luasan bidang tanah konsolidasi. Hal ini semakin mempercepat air pori terdisipasi keluar dari lapisan tanah sehingga waktu konsolidasi semakin cepat. Hal ini selaras dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Ali (2020) bahwa penggunaan PVD mempercepat waktu konsolidasi dan semakin dipercepat dengan penggunaan *vacuum pressure.* Apabila waktu konsolidasi tanah semakin singkat, maka penambahan timbunan diatas tanah eksisting dapat dilakukan lebih cepat, dan pekerjaan konstruksi yang akan dibangun diatas tanah timbunan dapat dimulai lebih cepat. Apabila pembangunan konstruksi dilakukan tanpa menstabilkan tanah terlebih dahulu, maka penurunan tanah yang terjadi dalam jangka waktu yang lama dapat menimbulkan kerusakan pada elevasi tanah, dan kegagalan struktur pada konstruksi yang telah dibangun.

Dalam analisis perhitungan, terdapat perbedaan hasil perhitungan antara perhitungan manual dan perhitungan menggunakan *PLAXIS 2D,* hal ini dapat terjadi dikarenakan pada perhitungan manual dilakukan dengan teori konsolidasi satu dimensi Terzaghi dan penurunan tersebut dianggap hanya satu arah vertikal. Sedangkan pada perhitungan menggunakan *PLAXIS 2D,* merupakan program analisis 2 dimensi dimana penurunan tanah disebabkan oleh tegangan dari dua arah, vertikal dan *horizontal*. *Input* parameter permeabilitas tanah (k) pada *PLAXIS 2D* pun dilakukan secara 2 arah, arah sumbu x (*horizontal*), dan arah sumbu y (vertikal) sehingga perhitungan menggunakan program *PLAXIS 2D* dinlai memiliki kalkulasi matematis yang lebih kompleks dan komprehensif.

# BAB VI
# KESIMPULAN

## 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan pembahasan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

1. Besar penurunan tanah pada saat konsolidasi 90% pada kondisi timbunan/*preloading* adalah 1,085 m selama 1321 hari untuk perhitungan manual, dan 0,495 m selama 1038 hari untuk perhitungan *PLAXIS 2D.*
2. Besar penurunan tanah pada saat konsolidasi 90% pada kondisi timbunan/*preloading* dengan PVD adalah 1,082 m selama 32 hari untuk perhitungan manual, dan 0,3 m selama 37 hari untuk perhitungan *PLAXIS 2D.*
3. Besar penurunan tanah pada saat konsolidasi 90% pada kondisi *vacuum pressure* dengan PVD adalah 0,3 m selama 11 hari untuk perhitungan *PLAXIS 2D.*
4. Penggunaan PVD pada proses konsolidasi tanah mampu mempercepat waktu konsolidasi, dan semakin dipercepat dengan penggunaan mesin *vacuum pressure* pada proses konsolidasi tanah.

## 6.2 Saran

Dari kesimpulan yang telah dipaparkan diatas, penulis memberi beberapa poin saran sebagai berikut.

1. Keakuratan hasil Analisa dipengaruhi oleh kevalidan data sehingga perlu dipastikan seluruh parameter tanah terpenuhi sebelum dilakukan analisa.
2. Apabila aspek efisiensi biaya diperhitungkan, perlu dilakukan studi perbandingan dengan pola pemasangan PVD lebih dari satu pola (tidak hanya satu pola) dengan variasi jarak pemasangan yang lebih variatif sehingga didapatkan manfaat yang maksimal.

# DAFTAR PUSTAKA


Ali, R. dan Wulandari, S. 2020. Perbaikan Tanah Lempung Lunak Dengan Metode Prefabricated Vertical Drain (PVD). *Jurnal Politeknologi*. Vol 19, No. 2. Depok.

Anonim. 2017. *Pengujian Tanah Tambahan Jalan Tol Ruas Palembang-Indralaya.* PT Hutama Karya Infrastruktur. Palembang.

Atmaja dan Hendra, S.K. 2021. Analisis Penurunan Dan Waktu Konsolidasi Pada Perbaikan Tanah Lunak Dengan Metode *Prefabricated Vertical Drain* Dan *Preloading*. *Tugas Akhir*. (Tidak Diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Barimbing, dan Fanny, R. 2017. Analisis Penurunan dan Waktu Konsolidasi Tanah Lunak Menggunakan Metode *Preloading* dan *Pre-Fabricated Vertical Drain*. *Tugas Akhir*. (Tidak Diterbitkan). Universitas Sumatera Utara. Medan.

Chairullah, B. 2011. Stabilisasi tanah lempung lunak untuk material tanah dasar subgrade dan subbase jalan raya. *Jurnal Teknik Sipil*, Vol.1 No.1:61-70.

Darwis. 2017. *Dasar -Dasar Teknik Perbaikan Tanah.* Yogyakarta. Pustaka AQ.

Das, B.M. 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 1*. Terjemahan oleh Noor Endah Mochtar dan Indrasurya B. Mochtar. Erlangga. Jakarta.

Daun, I. P. 2022. *Analysis of Soil Improvement With Combination of PVD and Vacuum Consolidation Using Program. Final Project. (Unpublished)* Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. 2002. *Panduan Geoteknik 4 tentang Timbunan Jalan Pada Tanah Lunak.* Pedoman Kimpraswil No: Pt T-10-2002-B. Indonesia.

Gunasro, A. 2017. Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif dengan Campuran Larutan NaOH 7,5%. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, Vol.6 No.2:238-245.

Hardiyatmo, H.C. 2010. *Mekanika Tanah II*, Edisi Ketiga. *Gadjah Mada University Press.* Yogyakarta.

Hardiyatmo, H.C. 2019. *Mekanika Tanah I*, Edisi Ketujuh. *Gadjah Mada University Press*. Yogyakarta.

Hardiyatmo, H.C. 2022. *Perbaikan Tanah*, Edisi Kedua. *Gadjah Mada University Press*. Yogyakarta.

Liu, C and Evett J. B. (1992). *Soils and Foundations*. Prentice-Hall, Inc.

Purba, B. 2022. Analisis Konsolidasi dengan Metode *Preloading* Dikombinasikan dengan PVD Berdasarkan Perhitungan Analitis dan *PLAXIS 2D*. *Jurnal Syntax Admiration*. Vol.3 No.12.

Puspita, N. dan Saggaf, A. 2018. Pengaruh VCM *(Vacuum Consolidation Method)* Pada Tanah Gambut. *Jurnal Seminar Nasional AvoER X*. Palembang. 31 Oktober 2018:209-216.

Susiazti. 2020. Analisis Penurunan Konsolidasi Metode *Preloading* dan Prefabricated Vertical Drain (PVD). *Jurnal Teknologi Sipil*. Vol.4 No.1.

Tama, T. 2019. Analisis Efek Kedalaman PVD dengan Vacuum *Preloading* Terhadap Settlement Rate Menggunakan Program *PLAXIS 2D*. *Tugas Akhir*. (Tidak Diterbitkan). Universitas Katolik Parahyangan. Bandung.