

**PERBAIKAN TANAH DASAR DENGAN METODE *PRELOADING* DAN  
*PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD)***

**(Skripsi)**

**Oleh:**

**ANDRIAN PUTRA AULIA**

**1415011017**



**JURUSAN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
2021**

## **ABSTRAK**

### **Perbaikan Tanah Dasar Dengan Metode *Preloading Prefabricated Vertical Drain (PVD)***

**Oleh**

**ANDRIAN PUTRA AULIA**

Tanah lempung mempunyai sifat kurang baik secara teknis untuk mendukung suatu pekerjaan konstruksi. Tanah tersebut mengalami penurunan yang besar dan dalam waktu yang sangat lama. Hal inilah yang sering menjadi masalah dalam pelaksanaan suatu pekerjaan konstruksi. Pada studi kasus tanah timbunan di proyek tol Sumatera ruas Terbanggi - Kayu Agung ini, perbaikan tanah lempung untuk mengatasi masalah di atas adalah dengan cara menggunakan kombinasi antara *Preloading* dan *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*. Pemasangan PVD dapat mempercepat waktu penurunan yang terjadi karena disipasi air pori terjadi dalam arah vertical.

Dalam tugas akhir ini, dilakukan analisa perhitungan konsolidasi tanah dengan menggunakan metode elemen hingga. Analisa jarak spasi antar PVD untuk mendapatkan jarak yang paling efektif yang disesuaikan dengan waktu konsolidasi yang paling cepat, jarak spasi antar PVD yang diperhitungkan ialah 1 m; 1,5 m dan 2 m. Dari hasil perhitungan tanpa menggunakan PVD diperoleh waktu 25000 hari dan mengalami penurunan sebesar 0,905 m. Sedangkan dengan jarak spasi PVD 1 m menghasilkan waktu konsolidasi 163 hari dan mengalami penurunan 0,868 m, jarak spasi antar PVD 1,5 m menghasilkan waktu konsolidasi 163 hari dan mengalami penurunan 0,868 m, dan jarak spasi 2 m menghasilkan waktu konsolidasi selama 163 hari dengan penurunan 0,882 m. Dari analisa yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa jarak pemasangan yang paling efektif adalah menggunakan kombinasi *preloading* dan PVD dengan jarak PVD 1,5 m.

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

## **ABSTRACT**

### ***Subgrade Improvement Using Preloading Prefabricated Vertical Drain (PVD) Method***

***By***

**ANDRIAN PUTRA AULIA**

*Clay soil has technically unfavorable properties to support a construction work. The land experienced a great decline and in a very long time. This is often a problem in the implementation of a construction work. In this case study of embankment soil in the Terbanggi - Kayu Agung toll road project, the improvement of clay soil to overcome the above problem is by using a combination of Preloading and Prefabricated Vertical Drain (PVD). Installation of PVD can speed up the settlement time that occurs because the pore water dissipation occurs in the vertical direction.*

*In this final project, analysis of soil consolidation calculations is carried out using the finite element method. Analysis of the spacing between PVDs to get the most effective distance adjusted for the fastest consolidation time, the calculated spacing between PVDs is 1 m; 1.5 m and 2 m. From the results of calculations without using PVD that has been carried out, it is obtained that the time reaches 25000 days and has decreased by 0.905 m. Meanwhile, using 1 m PVD spacing resulted in a consolidation time of 163 days and decreased by 0.868 m, 1.5 m spacing between PVDs resulted in a consolidation time of 163 days and decreased by 0.868 m, and a 2 m spacing resulted in a consolidation time of 1 m. 163 days and decreased by 0.882 m. From the analysis that has been done, it can be concluded that the most effective installation distance is to use a combination of preloading and PVD with a PVD distance of 1.5 m.*

*Keywords : Preloading, Prefabricated Vertical Drain (PVD), Consolidation*

**PERBAIKAN TANAH DASAR DENGAN METODE *PRELOADING* DAN  
*PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD)***

**Oleh**

**ANDRIAN PUTRA AULIA**

**Skripsi**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar**

**SARJANA TEKNIK**

**Pada**

**Jurusan Teknik Sipil**

**Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2021**

Judul Skripsi : **PERBAIKAN TANAH DASAR DENGAN  
METODE *PRELOADING* DAN  
*PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD)***

Nama Mahasiswa : **Andrian Putra Aulia**

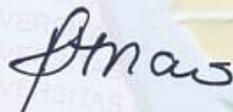
Nomor Pokok Mahasiswa : 1415011017

Jurusan : Teknik Sipil

Fakultas : Teknik

**MENYETUJUI**

1. Komisi Pembimbing

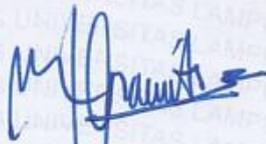


**Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A.**  
NIP 19630510 199303 2 008



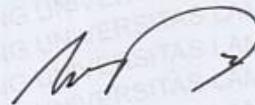
**Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D.**  
NIP 19670514 199303 1 002

2. Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil



**Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D.**  
NIP 19720829 199802 1 001

3. Ketua Jurusan Teknik Sipil



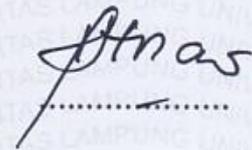
**Ir. Laksmi Irianti, M.T.**  
NIP 19620408 198903 2 001

**MENGESAHKAN**

**1. Tim Penguji**

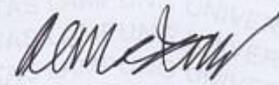
Ketua

**: Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A.**



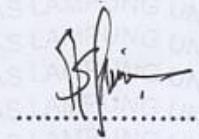
Sekretaris

**: Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D.**



Penguji

Bukan Pembimbing **: Aminudin Syah, S.T., M.Eng.**



**2. Dekan Fakultas Teknik**



**Prof. Drs. Ir. Suharno, Ph.D., IPU., ASEAN Eng.**

NIP 19620717 198703 1 002

**Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 08 November 2021**

## SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini, adalah:

Nama : Andrian Putra Aulia  
NPM : 1415011  
Prodi/ Jurusan : S1/ Teknik Sipil  
Fakultas : Teknik Universitas Lampung.

Dengan ini menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan disuatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebut dalam daftar pustaka. Skripsi ini merupakan bagian dari penelitian dengan judul : Perbaikan Tanah Dasar Dengan Metode *Prelading* dan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD).

Atas pernyataan ini, apabila dikemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi sesuai hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 08 November 2021



**Andrian Putra Aulia**

## RIWAYAT HIDUP



Andrian Putra Aulia lahir di Bandar Lampung, pada tanggal 20 Februari 1996. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan Bapak Aulia Rivai, S.E. dan dr. Indrasari Aulia. Penulis menempuh pendidikan dasar di SD Fransiskus 2 Rawa Laut, Bandar Lampung dan diselesaikan pada tahun 2008. Pendidikan tingkat pertama ditempuh di SMPN 2 Bandar Lampung dan diselesaikan pada tahun 2011, kemudian melanjutkan Pendidikan tingkat atas di SMA Negeri 2 Bandar Lampung dan diselesaikan pada tahun 2014.

Penulis terdaftar sebagai mahasiswa Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung pada tahun 2014. Penulis aktif dalam organisasi kemahasiswaan Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil sebagai anggota pada bidang Advokasi pada tahun 2015/2016. Pada tahun 2018 penulis melakukan Kerja Praktik pada Proyek Pembangunan Jalan Underpass Pada Jalan Z. A. Pagar Alam – Jalan Prof. Dr. Soemantri Brojonegoro Bandar Lampung. Pada tahun yang sama, penulis melakukan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Adirejo, Kecamatan Jabung, Kabupaten Lampung Timur.

# Motto Hidup

“Tidak ada kata terlambat untuk memulai, begitu juga untuk mengakhiri.”  
(Andrian Putra Aulia)

“Kebahagiaan kita tergantung pada diri kita sendiri..”  
(Aristoteles)

"Gantungkan cita-cita mu setinggi langit! Bermimpilah setinggi langit. Jika engkau jatuh, engkau akan jatuh diantara bintang-bintang"  
(Ir. Soekarno)

“Satu-satunya cara untuk melakukan pekerjaan yang hebat adalah dengan mencintai apa yang kamu lakukan.”  
(Steve Jobs)

“Learn from yesterday, live for today, hope for tomorrow. The important thing is not to stop questioning”.  
(Albert Einstein)

“Use your experience yesterday in your experiment today to achieve your expectations tomorrow”  
(Andrian Putra Aulia)

## **PERSEMBAHAN**

Kupersembahkan hasil kerja kerasku ini kepada :

Kedua orangtua tercinta, Ibu tersayang Indrasari Aulia, Ayah tersayang Aulia Rivai , yang telah mencurahkan setiap doa, kasih sayang, harapan, dan dukungan selama ini dalam segala hal.

Kakak tersayang, Anindia Putri dan Adik tersayang Andre Nugraha Putra yang selalu memberikan semangat, doa, dan dorongan.

Untuk semua guru dan dosen yang dengan tulus mengajarkan banyak hal. Terima kasih untuk ilmu pengetahuan, dan pelajaran hidup tak ternilai yang telah diberikan.

Seluruh keluarga besar dan sahabat yang selalu mendukung dan memberikan semangatnya hingga dapat diselesaikannya tugas akhir ini.

Terima kasih sudah menjadi bagian berharga dalam kehidupan ini.

## SANWACANA

*Assalamu'alaikum Wr. Wb.*

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul ***“Perbaikan Tanah Dasar dengan Metode Preloading dan Prefabricated Vertical Drain (PVD)”*** yang merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih yang tulus dan sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Suharno, M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
2. Ibu Ir. Laksmi Irianti, M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
3. Bapak Ir. Muhammad Karami, S.T.,M.Sc.,Ph.D., selaku ketua Program Studi Teknik Sipil, Universitas Lampung
4. Ibu Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A, selaku Dosen Pembimbing I yang telah sabar dalam membimbing, menasihati serta meluangkan waktunya untuk memberikan pengarahan, masukan, saran dan kritiknya demi kesempurnaan skripsi ini.

5. Bapak., Ir. Ahmad Zakaria, M.T., Ph.D selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu untuk membimbing, memberikan pengarahan, motivasi, dan nasihat demi kesempurnaan skripsi ini.
6. Bapak Aminudin Syah, S.T., M.Eng., selaku Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan pengarahan, kritik, saran, dan motivasi selama masa perkuliahan dan penyusunan skripsi ini.
7. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Sipil, yang telah memberikan ilmu pengetahuan kepada penulis selama menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
8. Seluruh teknisi dan karyawan di Fakultas Teknik, yang telah memberikan bantuan kepada penulis selama menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
9. Kedua orangtua tercinta, ayahku Aulia Rivai dan Ibuku Indrasari Aulia yang telah memberikan kasih sayang, dukungan, dan doa yang tiada henti, sehingga penulis dapat menyelesaikan perkuliahan di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
10. Kakak, Anindia Putri dan Adik, Andre Nugraha Putra yang selalu mendukung dan memberikan semangat.
11. Sahabat, Agil Julianto, Devrisvansyah Irwan, Fazlina Amalia Sunes, Adira Salsabila, Ameliza Indah Mahesa, Bareb Abdi Oktiano, Firman Syahruli, Pandi Aditya, Rizky Prihandoyo, R. Nofan Adyaksa, Sofyan Ramadhan, Yogi Alnasir, berkat kalian 7 tahun perjuangan kita terasa ringan dan indah.

12. Sahabat sekaligus teman yang membantu penelitian, Syahri Abdulrahman, terimakasih atas bantuan, kerja sama, saran, dan kritik selama penelitian berlangsung.
13. Teman seperjuanganku angkatan 2014 yang selama beberapa tahun ini telah berbagi kenangan yang tak akan pernah terlupakan, serta seluruh angkatan yang sudah membantu selama masa perkuliahan ini yang mungkin tidak dapat disebutkan satu per satu.

Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan, khususnya bagi (penulis pribadi). Selain itu, penulis berharap dan berdoa semoga semua pihak yang telah memberikan bantuan dan semangat kepada (penulis), mendapatkan ridho dari Allah SWT.

*Wassalamu'alaikum Wr. Wb.*

Bandar Lampung, November 2021

Penulis

Andrian Putra Aulia

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>DAFTAR ISI</b> .....	i
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	iv
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	v
<b>I. PENDAHULUAN</b>	
A. Latar Belakang .....	1
B. Rumusan Masalah .....	3
C. Tujuan Penelitian.....	4
D. Batasan Masalah.....	4
E. Manfaat Penelitian .....	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
A. Tanah .....	5
B. Tanah Lempung.....	6
1. Sifat Tanah Lempung.....	6
2. Karakteristik Fisik Tanah Lempung .....	8
C. Timbunan pada Tanah Lempung Lunak .....	11
D. Pembebanan Awal ( <i>Preloading</i> ) .....	13
E. <i>Prefabricated Vertical Drain</i> (PVD) .....	14

F. Hubungan Tegangan Total dengan Tegangan Efektif.....	19
G. Konsolidasi.....	20
1. Perhitungan Penentuan Tekanan Prakonsolidasi.....	20
2. Koefisien konsolidasi Arah Vertikal .....	23
3. Koefisien Konsolidasi Arah Horizontal .....	24
4. Koefisien Konsolidasi Arah Vertikal Gabungan .....	24
H. Waktu Konsolidasi.....	25
1. Perhitungan Besarnya Penurunan Konsoildasi.....	25
2. Rekompresi atau Pengembangan ( <i>Recompression of Swell</i> ) .....	26
3. Koefisien Konsolidasi.....	27
I. Settlement.....	28
J. <i>Plaxis</i> sebagai Progam Metode Elemen Hingga .....	29
K. Studi Literatur .....	30

### III. METODE PENELITIAN

A. Ilustrasi Penempatan <i>Preloading</i> dan PVD.....	35
B. Tahapan Umum.....	35
C. Metode Analis Data .....	36
D. Data Sekunder .....	37
E. Diagram Alir.....	38

### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengumpulan Data Sekunder.....	39
B. Rancangan Desain Perbaikan Tanah Menggunakan Program Elemen Hingga.....	40

C. Permodelan Menggunakan Program Elemen Hingga (FEM).....	45
D. Rekapitulasi Dan Analisa.....	51
<b>V. PENUTUP</b>	
A. Kesimpulan.....	53
B. Saran.....	54

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **LAMPIRAN**

**DAFTAR TABEL**

Tabel	Halaman
1. Aktivitas Tanah Lempung .....	9
2. Hasil Analisa Penurunan Berdasarkan Tahap Penimbunan .....	31
3. Hasil Perhitungan Tegangan Air Pori Berlebih dengan Metode Analitis .....	32
4. Penurunan terhadap Waktu Tanpa Menggunakan PVD .....	33
5. Kesimpulan Analisis Pemodelan PVD tiap Spasi .....	33
6. Data Parameter Tanah pada Program Elemen Hingga.....	39
7. Rekapitulasi dan Analisa Menggunakan PVD.....	52

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Aliran Air Pori pada PVD.....	15
2. <i>Prefabricated Vertical Drain</i> .....	16
3. <i>Vertical Drain</i> Tipe Persegi.....	17
4. <i>Vertical Drain</i> Tipe Segitiga .....	17
5. <i>Equivalent Permeability</i> .....	18
6. Prosedur Penentuan Teknan Prakonsolidasi dengan Cara Grafis .....	22
7. Kontur Penurunan yang terjadi menggunakan PVD .....	33
8. Ilustrasi Penempatan <i>preloading</i> dan PVD di Lapangan.....	35
9. Diagram Alir.....	38
10. Desain perbaikan tanah menggunakan metode <i>preloading</i> .....	43
11. Desain perbaikan tanah menggunakan metode <i>preloading</i> dan PVD dengan jarak 1m .....	44
12. Desain perbaikan tanah menggunakan metode <i>preloading</i> dan PVD dengan jarak 1,5m .....	44
13. Desain perbaikan tanah menggunakan metode <i>preloading</i> dan PVD dengan jarak 2m .....	45
14. Grafik perpindahan Tanah Menggunakan Metode <i>Preloading</i> .....	46
15. Tekanan <i>pore excess water</i> tanah menggunakan metode <i>preloading</i> .....	47
16. Grafik Perpindahan Tanah Menggunakan <i>Preload</i> + PVD (Jarak 1 m)...	47

17. Tekanan <i>pore excess water</i> tanah metode <i>preloading</i> dan PVD spasi 1 m .....	48
18. Grafik Perpindahan Tanah Menggunakan <i>Preload</i> +PVD (Jarak 1,5 m) ..	49
19. Grafik tekanan <i>pore excess water</i> tanah metode <i>preloading</i> dan PVD spasi 1,5 m .....	49
20. Grafik Perpindahan Tanah Menggunakan <i>Preload</i> + PVD (jarak 2 m)...	50
21. Grafik tekanan <i>pore excess water</i> tanah metode <i>preloading</i> dan PVD spasi 2 m.....	51
22. Grafik Perpindahan Tanah Menggunakan <i>Preload</i> + PVD.....	51

## I. PENDAHULUAN

### A. Latar belakang

Istilah "Tanah" dalam bidang Mekanika Tanah dimaksudkan adalah mencakup semua bahan seperti lempung, pasir, kerikil dan batu-batuan yang besar (Wesley, 1977). Secara umum tanah terdiri dari tiga bahan, yaitu butiran tanahnya sendiri (*solid*), air (*water*), dan pori (*void*) yaitu udara yang terdapat dalam ruangan antara butir-butir tersebut. Pembentukan tanah dari bahan induknya, dapat berupa proses fisik maupun kimia. Proses pembentukan tanah secara fisik yang mengubah batuan menjadi partikel-partikel yang lebih kecil dapat terjadi akibat adanya pengaruh erosi, air, angin, es, manusia atau hancurnya partikel tanah akibat perubahan suhu atau cuaca. Sedangkan pelapukan akibat proses kimia dapat terjadi oleh pengaruh oksigen, karbon dioksida, air yang mengandung asam atau alkali dan proses kimia yang lain. (Hardiyatmo, 2002).

Pada umumnya tanah lempung sering digunakan dalam pelaksanaan konstruksi namun penggunaan tanah ini kurang menguntungkan secara teknis untuk mendukung suatu pekerjaan konstruksi yang akan dilakukan. Sifat-sifat yang dimiliki dari tanah lempung yaitu antara lain ukuran butiran halus lebih

kecil dari 0,002 mm, permeabilitas rendah, kenaikan air kapiler tinggi, bersifat sangat kohesif, kadar kembang susut yang tinggi dan proses konsolidasi lambat (Hardiyatmo, 2002). Kondisi ini menyebabkan tanah mengalami penurunan yang besar dan dalam waktu yang sangat lama. Untuk menangani masalah ini, maka diperlukan konsolidasi, yaitu salah satu metode untuk mempercepat konsolidasi tersebut dengan menggunakan metode *preloading* yang dikombinasikan dengan *prefabricated vertical drain* (PVD).

*Preloading* atau pembebanan awal dilakukan dengan cara memberikan beban yaitu berupa timbunan sehingga menyebabkan tanah akan termampatkan sebelum konstruksi didirikan. PVD adalah sistem drainase vertikal yang berupa sabuk berpenampang persegi panjang, terdiri dari bagian luar yang berupa penyaring yang dibuat dari bahan *geotextile/synthetic*, kertas atau goni dan bagian dalam yang berfungsi sebagai media aliran yang terbuat dari plastik atau serabut organik.

Pada saat ini penggunaan PVD sudah cukup banyak digunakan karena dalam penggunaannya dapat mempercepat waktu penurunan dan konsolidasi tanah secara signifikan dari beberapa tahun ke dalam hitungan bulan. Ini disebabkan karena *vertical drain* mengalirkan air secara cepat arah horizontal. Seperti umumnya diketahui penggunaan PVD harus disertai dengan pemberian beban (*preloading*) guna menimbulkan efek perbedaan tegangan di dalam tanah dan dipermukaan tanah sehingga air dapat mengalir dengan mudah yang kemudian dipercepat melalui jalur-jalur *vertical drain* yang telah ditanam.

PVD berfungsi untuk mempercepat konsolidasi tanah, terutama pada tanah berjenis lempung (*clay*) atau lanau (*silt clay*). Konstruksi pemasangan PVD biasa dilakukan untuk lahan reklamasi pantai, lahan perumahan dan industri, jalan raya, jalan kereta api, landasan pesawat terbang, konstruksi pelabuhan dan konstruksi tanah timbunan. Seiring dengan perkembangan dan mempertimbangkan berbagai faktor, melalui serangkaian penelitian diketahui bahwa penggunaan material timbunan sebagai beban *preloading* sampai dengan ketinggian tertentu digantikan dengan tegangan vakum. Metode ini dikenal dengan nama *Vacum preloading system* atau *Vacum Consolidation System*. Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh Kjellman (Swedia) pada tahun 1952 (Suhendra dan Irsyam 2011), dan mulai dilirik untuk menjadi alternatif solusi guna mempercepat proses konsolidasi pada tanah lempung lunak jenuh air beberapa tahun kemudian.

## **B. Rumusan Masalah**

Rumusan Masalah dari penelitian ini adalah :

1. Berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk konsolidasi tanah lunak menggunakan kombinasi *preloading* dan PVD.
2. Bagaimana pengaruh perbandingan jarak yang dibutuhkan dalam pemasangan PVD.
3. Bagaimana analisis stabilitas keamanan tanah (*Safety Factor*).

### **C. Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisis besarnya penurunan tanah menggunakan kombinasi *preloading* dan PVD.
2. Menganalisis waktu yang dibutuhkan untuk konsolidasi tanah lunak menggunakan kombinasi *preloading* dan PVD.
3. Menganalisis perbandingan lama waktu konsolidasi tanah menggunakan PVD dengan jarak 1 m, 1,5 m, dan 2m.

### **D. Batasan Masalah Penelitian**

Batasan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Jenis tanah yang digunakan adalah tanah lempung dengan kadar air yang Tinggi.
2. Pemodelan menggunakan software metode elemen hingga.
3. Analisis menggunakan kombinasi metode *preloading* dan PVD.
4. Menganalisis pemodelan tanah dengan menggunakan model tanah *soft soil*.

### **E. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam analisis perbaikan tanah dasar dengan metode *preloading* dan *prefabricated vertical drain* (PVD) baik digunakan dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan dapat menjadi bahan untuk menambah wawasan dan inspirasi.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Tanah

Tanah adalah himpunan mineral, bahan organik dan endapan-endapan yang relatif lepas (*loose*) yang terletak diatas batu dasar (*bedrock*) (Hardiyatmo, 2002). Menurut Terzaghi definisi tanah yaitu tanah terdiri dari butiran-butiran hasil pelapukan massa batuan *massive*, dimana ukuran tiap butirnya dapat sebesar kerikil-pasir-lanau-lempung dan kontak antar butir tidak tersementasi termasuk bahan organik.

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

Berdasarkan definisi-definisi diatas dapat disimpulkan bahwa tanah adalah kumpulan material yang tidak terikat yang dihasilkan dari pelapukan batuan.

## B. Tanah Lempung

Tanah liat atau lempung akan menjadi sangat keras dalam keadaan kering, dan tak mudah terkelupas hanya dengan jari tangan (Terzaghi, 1987). Tanah liat atau lempung mempunyai sifat permeabilitas sangat rendah dan berifat plastis pada kadar air sedang. Lempung atau tanah liat adalah suatu silika hidro aluminium yang kompleks. Mineral lempung mempunyai daya tarik menarik individual yang mampu menyerap 100 kali volume partikelnya, ada atau tidaknya air (selama pengeringan) dapat menghasilkan perubahan volume dan kekuatan yang besar. Partikel- partikel lempung juga mempunyai tenaga antar partikel yang sangat kuat yang untuk sebagian menyebabkan kekuatan yang sangat tinggi pada bongkahan kering (batu lempung).

### 1. Sifat Tanah Lempung

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

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

Sifat fisik dan sifat keteknikan tanah, lebih ditentukan oleh jenis dari klasifikasi tanah itu sendiri. Pengklasifikasian tanah dimaksudkan untuk mempermudah pengelompokkan berbagai jenis tanah kedalam kelompok tanah yang sesuai dengan sifat teknik karakteristiknya. Pengelompokkan

tanah menempatkan tanah dalam 3 kelompok, tanah berbutir kasar, tanah berbutir halus dan tanah organik.

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

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

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

## 2. Karakteristik Fisik Tanah Lempung

Menurut (Bowles E.J, 1989) mineral – mineral pada tanah lempung umumnya memiliki sifat – sifat ;

### a. Hidrasi

Partikel mineral lempung biasanya bermuatan negatif sehingga partikel lempung selalu mengalami hidrasi, yaitu dikelilingi oleh lapisan lapisan molekul air yang disebut sebagai air terabsorpsi. Lapisan ini pada umumnya mempunyai tebal dua molekul, oleh karena itu disebut sebagai lapisan difusi ganda atau lapisan ganda. Lapisan difusi ganda adalah lapisan yang dapat menarik molekul air atau kation disekitarnya. Lapisan ini akan hilang pada temperatur yang lebih tinggi dari 600 sampai 1000 C dan akan mengurangi plastisitas alamiah, tetapi sebagian air juga dapat menghilang cukup dengan pengeringan udara saja.

### b. Aktivitas

Hasil pengujian index properties dapat digunakan untuk mengidentifikasi tanah ekspansif. (Hardiyatmo, 2006) mendefinisikan aktivitas tanah lempung sebagai perbandingan antara Indeks Plastisitas (IP) dengan persentase butiran yang lebih kecil dari 0,002 mm yang dinotasikan dengan huruf C, disederhanakan dalam persamaan

$$\text{Aktivitas} = \frac{\text{Indeks Plastisitas}}{C}$$

Untuk nilai  $A > 1,25$  digolongkan aktif dan sifatnya ekspansif. Nilai  $1,25 < A < 0,75$  digolongkan normal sedangkan nilai  $A < 0,75$  digolongkan tidak aktif. Aktivitas berhubungan dengan kadar air potensial relatif. Nilai-nilai khas aktivitas dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Aktivitas tanah lempung

Minerologi Tanah Lempung	Nilai Aktivitas
Kaolinite	0,4 – 0,5
Illinite	0,5 – 1,0
Montmorillonite	1,0 – 7,0

Sumber: *Skempton, 1953*

#### c. Flokulasi dan Dispersi

Apabila mineral lempung terkontaminasi dengan substansi yang tidak mempunyai bentuk tertentu atau tidak berkristal maka daya negatif netto, ion-ion  $H^+$  dari air gaya *Van Der Waals* dan partikel berukuran kecil akan bersama-sama tertarik dan bersinggungan atau bertabrakan di dalam larutan tanah dan air. Beberapa partikel yang tertarik akan membentuk flok (*flock*) yang berorientasi secara acak atau struktur yang berukuran lebih besar akan turun dari larutan itu dengan cepatnya membentuk sedimen yang lepas. Flokulasi adalah peristiwa penggumpalan partikel lempung di dalam larutan air akibat mineral lempung umumnya mempunyai  $pH > 7$ . Flokulasi larutan dapat dinetralkan dengan menambahkan bahan-bahan yang mengandung asam (ion  $H^+$ ), sedangkan penambahan bahan-bahan alkali akan mempercepat flokulasi. Untuk menghindari flokulasi larutan air dapat ditambahkan zat asam.

#### d. Pengaruh Zat Cair

Fase air yang berada di dalam struktur tanah lempung adalah air yang tidak murni secara kimiawi. Pada pengujian di laboratorium untuk batas

*Atterberg*, ASTM menentukan bahwa air suling ditambahkan sesuai dengan keperluan. Pemakaian air suling yang relatif bebas ion dapat membuat hasil yang cukup berbeda dari apa yang didapatkan dari tanah di lapangan dengan air yang telah terkontaminasi. Air yang berfungsi sebagai penentu sifat plastisitas dari lempung. Satu molekul air memiliki muatan positif dan muatan negatif pada ujung yang berbeda (dipolar). Fenomena ini hanya terjadi pada air yang molekulnya dipolar dan tidak terjadi pada cairan yang tidak dipolar seperti karbon tetraklorida ( $\text{CCl}_4$ ) yang jika dicampur lempung tidak akan terjadi apapun.

e. Sifat Kembang Susut (*Swelling Potential*)

Plastisitas yang tinggi terjadi akibat adanya perubahan sistem tanah dengan air yang mengakibatkan terganggunya keseimbangan gaya-gaya di dalam struktur tanah. Gaya tarik yang bekerja pada partikel yang berdekatan yang terdiri dari gaya elektrostatis yang bergantung pada komposisi mineral, serta gaya *Van Der Waals* yang bergantung pada jarak antar permukaan partikel. Partikel lempung pada umumnya berbentuk pelat pipih dengan permukaan bermuatan negatif dan ujung-ujungnya bermuatan positif. Muatan negatif ini diseimbangkan oleh kation air tanah yang terikat pada permukaan pelat oleh suatu gaya listrik. Sistem gaya internal kimia-listrik ini harus dalam keadaan seimbang antara gaya luar dan hisapan matrik. Apabila susunan kimia air tanah berubah sebagai akibat adanya perubahan komposisi maupun keluar masuknya air tanah, keseimbangan gaya-gaya dan jarak antar

partikel akan membentuk keseimbangan baru. Perubahan jarak antar partikel ini disebut sebagai proses kembang susut. Tanah-tanah yang banyak mengandung lempung mengalami perubahan volume ketika kadar air berubah. Perubahan itulah yang membahayakan bangunan. Tingkat pengembangan secara umum bergantung pada beberapa faktor yaitu:

1. Tipe dan jumlah mineral yang ada di dalam tanah.
2. Kadar air.
3. Susunan tanah
4. Konsentrasi garam dalam air pori
5. Sementasi
6. Adanya bahan organik, dll.

### **C. Timbunan pada Tanah Lempung Lunak**

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

Timbunan pada lapisan tanah lempung berfungsi sebagai *preloading* yang mempercepat proses konsolidasi. Dengan terdisipasinya air pori pada lapisan tanah tersebut maka akan meningkatkan kuat geser tanah dan kohesi tanah, sehingga lapisan tanah tersebut dapat memikul beban yang besar dan mempengaruhi tinggi timbunan yang akan dipergunakan. Penentuan tinggi

timbunan sesuai dengan nilai penurunan agar tanah timbunan tidak dibuang sia-sia dan dapat dijadikan pondasi dari suatu konstruksi. Tinggi timbunan kritis beban *preloading* ini dihitung berdasarkan dari dukung tanah lempung mula-mula, kemudian dibandingkan dengan tinggi timbunan atau beban yang mampu diterima oleh tanah dasar yaitu H kritis ( $H_{cr}$ ).

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

$$Q_u = 2 \cdot C_u \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

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

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

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

$$\gg \text{timbunan} \cdot H_{cr} = \frac{Q_u}{SF}$$

Maka

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

Dimana :

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

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

$H_{cr}$  = Tinggi timbunan kritis (m)

$\gg \text{timbunan}$  = Berat Volume tanah timbunan ( $t/m^3$ )

Kombinasi antara metode *preloading* dengan instalasi PVD merupakan salah

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

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

#### **D. Pembebanan Awal (*Preloading*)**

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

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

Beban total *preloading* berupa timbunan tanah yang diaplikasikan ke tanah asli harus lebih besar atau sama dengan 1,3 kali beban yang direncanakan

pada kondisi layan bila efek gaya angkat (*bouyancy effect*) yang diterima beban timbunan pada saat proses preloading berlangsung tidak diperhitungkan. Sedangkan jika efek gaya angkat (*bouyancy effect*) yang diterima beban timbunan pada saat proses preloading diperhitungkan, maka beban total preloading berupa timbunan tanah yang diaplikasikan ke tanah asli harus lebih besar atau sama dengan 1,2 kali beban yang direncanakan pada kondisi layan (SNI-8460, 2017).

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

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

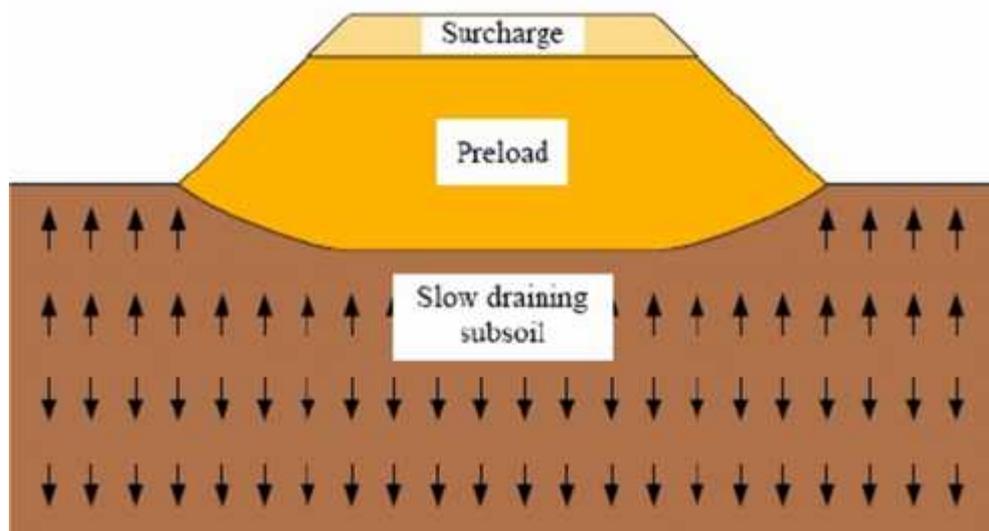
#### **E. Prefabricated Vertical Drain (PVD)**

PVD Merupakan material *geosynthetic* yang konsep kerjanya sama dengan kolam pasir yang mempunyai karakteristik sebagai pengumpul air pori yang kemudian akan dialirkan secara vertikal baik ke atas maupun ke bawah lapisan tanah sepanjang PVD tersebut. Laju konsolidasi yang rendah pada lempung jenuh dengan permeabilitas rendah dapat dinaikkan dengan

menggunakan PVD, kemudian konsolidasi yang diperhitungkan akibat pengaliran horizontal menyebabkan disipasi kelebihan tekanan air pori yang lebih cepat, sedangkan pengaliran vertical sangat kecil pengaruhnya. Dalam teori, besar penurunan konsolidasi akhir adalah sama, hanya laju penurunannya yang berbeda - beda.

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

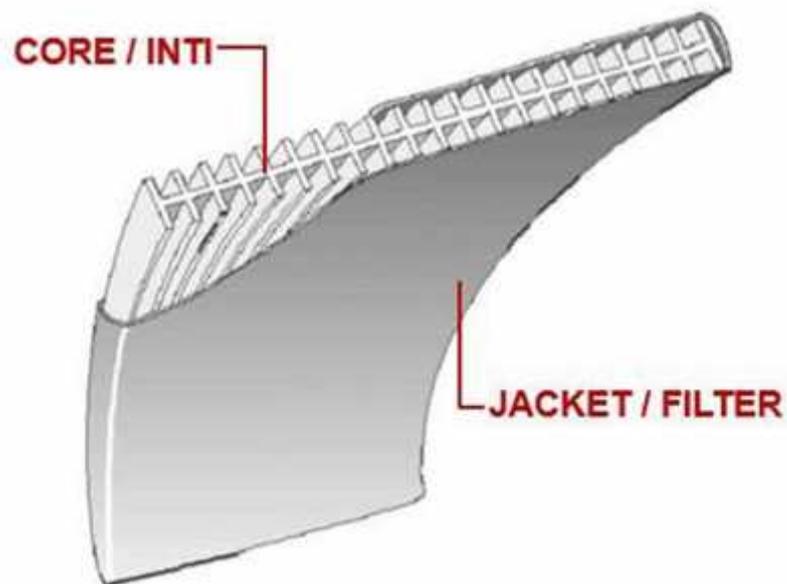
PVD berbahan alami ini sudah diaplikasikan pada beberapa proyek infrastruktur di Indonesia (Rudy Purwondho, 2018). Pemasangan PVD berbahan alami ini terbukti dapat mencapai nilai konsolidasi diatas 90% dalam waktu 4-6 bulan dengan kedalaman penetrasi 15-30 m, tergantung pada



ketebalan dari lapisan kompresibel.

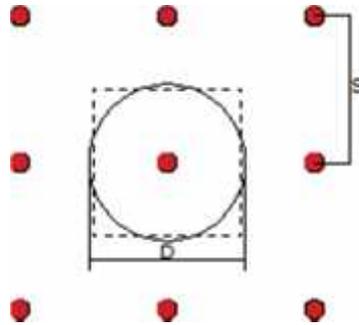
Gambar 1. Aliran air pori pada PVD  
Sumber : Gulhati dan Shaskhi K. (2005)

PVD umumnya berbentuk pita dengan sebuah inti plastik beralur terbuat dari material gesintesis (material polimer) yang dibentuk seperti potongan yang panjang. Material polimer dapat berupa Material PVC dengan lebar 90 sampai 100 mm, ketebalan 2 sampai 6 mm). Gambaran lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.



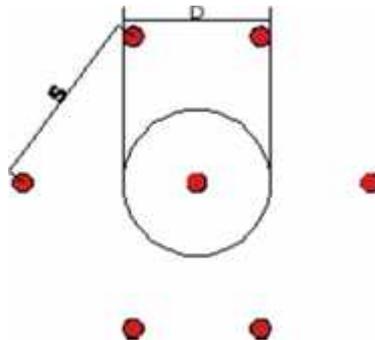
Gambar 2. *Prefabricated Vertical Drain*  
Sumber : Jie Han (2015)

PVD biasanya dipasang sampai pada kedalaman lapisan tanah *undrained* dengan menggunakan rig penetrasi statis. Untuk yang lebih dalam dibutuhkan rig yang lebih besar untuk mempermudah proses penetrasi. Karena tujuannya adalah untuk mengurangi panjang lintasan pengaliran, maka jarak antara drainase merupakan hal yang terpenting. PVD tersebut biasanya diberi jarak dengan pola persegi atau segitiga. Di lapangan, saluran vertikal sering dipasang dalam pola persegi atau segitiga Gambar 3.



Gambar 3. Vertikal drain tipe persegi

Sumber : Jie Han (2015)



Gambar 4. Vertikal Drain tipe segitiga

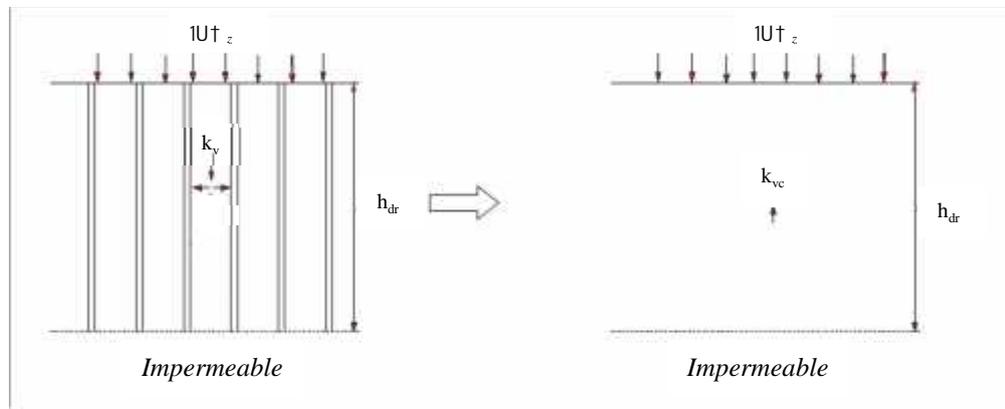
Sumber : Jie Han (2015)

Ukuran *band drain* atau PVD adalah 100 mm kali 4 mm dengan bentuk penampang persegi panjang. Oleh karena itu perlu dilakukan transformasi tampang dari PVD. Pada saat itu dilakukan perhitungan terhadap PVD tersebut maka penampang dari PVD akan dimodelkan menjadi berbentuk lingkaran dengan perhitungan diameter ekuivalen yang diasumsikan sebagai keliling persegi panjang dibagi (S. Hansbo, 1960).

PVD harus memiliki kekuatan tarik yang cukup untuk bertahan selama instalasi. (S. Hansbo, 1960) mengemukakan bahwa kekuatan tarik inti lunak,

filter, seluruh drain, dan drain tersambung harus lebih besar dari 1 kN pada regangan tarik 10% dalam kondisi kering dan basah.

*Equivalent Permeability* (Chai *et al*, 2001) mengusulkan metode yang digunakan untuk memperkirakan peningkatan konsolidasi drainase yang dilakukan secara vertikal. Dalam metode mereka, permeabilitas vertikal yang setara dapat diperkirakan dengan mempertimbangkan keberadaan saluran vertikal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. *Equivalent Permeability*.

Sumber : Jie Han (2015)

Dimana :

$k_{ve}$  = ekuivalen vertikal permeabilitas

$h_{dr}$  = jarak maksimum drainase dari saluran vertikal

Adapun proses pemasangan PVD secara bertahap adalah sebagai berikut :

1. Persiapkan alat yaitu berupa *excavator*, *stitcher*, PVD, *mandrel* dan *plate* angkur baja. Pada dasar *mandrel*, material PVD dilingkarkan ke pengait baja atau *drain shoe* yang dapat memperkuat posisi PVD supaya tidak lepas dengan *mandrel* pada saat proses pemasangan .
2. PVD dipasang dengan menekan *mandrel* baja yang sudah dikaitkan

dengan PVD. *Mandrel* didorong masuk kedalam tanah dengan menggunakan alat *excavator*.

3. Setelah PVD mencapai kedalaman yang diinginkan atau alat sudah mencapai lapisan keras, *mandrel* kemudai dilepas dan ditarik keatas tanah. Sementara itu, PVD dan plat pengait dari baja tetap dibiarkan didalam tanah. Setelah *mandrel* telah sepenuhnya keluar dari lapisan tanah, sisa PVD tersebut dipotong 12-20 cm dari permukaan tanah lantai kerja.
4. Untuk dapat mendorong *mandrel* kedalam tanah, nilai resisten pada tanah (tanah dilantai kerja yang biasanya padat atau dilapisin *geotextile*) harus tidak melebihi 5 Mpa. Apabila lapisan tanah dipermukaan adalah merupakan jenis tanah sangat kuat, untuk memasukkan mandrel ke dalam tanah diperlukan sistem getar, *hammer* maupun *drilling system*.

#### **F. Hubungan Tegangan Total Dengan Tegangan Efektif**

Prinsip tegangan efektif yang bekerja pada segumpal tanah (Terzaghi, 1923).

Prinsip ini hanya berlaku pada tanah yang jenuh sempurna, yaitu :

1. Tegangan normal total (  $\sigma$  ) pada bidang di dalam massa tanah, yaitu tegangan yang dihasilkan dari beban akibat berat total tanah termasuk air dalam ruang pori, persatuan luas bidangnya, yang arahnya tegak lurus bidang.
2. Tekanan air pori (u), disebut juga dengan tekanan netral yang bekerja ke segala arah sama besar, yaitu tekanan air yang mengisi rongga diantara butiran padat.

3. Tegangan normal efektif ( $\sigma'$ ) pada bidang didalam tanah, yaitu tegangan yang dihasilkan dari beban akibat berat butiran tanah persatuan luas bidangnya.

Dimana hubungan dari ketiganya dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\sigma = \sigma' + u \dots\dots\dots (2.3)$$

## G. Konsolidasi

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

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

### 1. Perhitungan Penentuan Tekanan Prakonsolidasi

Tegangan maksimum yang pernah dialami tanah disebut tekanan prakonsolidasi (*preconsolidation pressure*). Menurut riwayat

pembebanannya, tanah dibedakan atas :

1. *Normally consolidated*, dimana  $OCR = 1$

Ialah tekanan prakonsolidasi (*preconsolidation pressure*) atau tekanan prakonsolidasi = tekanan *overburden* efektif. Tegangan yang pernah terjadi = tegangan yang dialami sekarang.

2. *Over consolidated*, dimana  $OCR > 1$

Jika tekanan prakonsolidasi  $>$  tekanan *overburden* efektif yang ada pada waktu, *Over consolidated* terjadi apabila

- a. Perubahan tegangan total yang terjadi karena erosi, penggalian, melelehnya lapisan salju yang menutupi.
- b. Perubahan tekanan pori karena penguapan oleh pohon-pohon, pemompaan air tanah dalam, pengaliran air tanah ke lorong saluran, dan pengeringan lapisan permukaan.

3. *Under consolidated*, dimana  $OCR < 1$

Ialah jika tanah tersebut sedang mengalami konsolidasi, tidak stabil. Tanah dalam proses pembentukan (baru diendapkan) dan belum sampai pada kondisi setimbang.

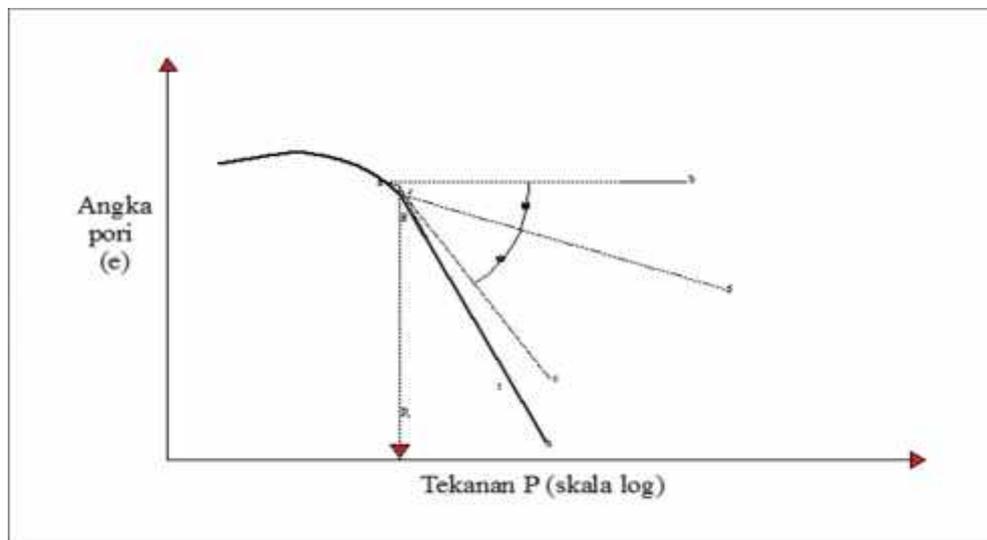
Dimana,

$$OCR = \text{Overconsolidation ratio} = p' / o'$$

$$p' = \text{Preconsolidation pressure (kN/m}^2\text{)}$$

$$o' = \text{Effective overburden pressure (kN/m}^2\text{)}$$

Tanah dikatakan dalam kondisi *underconsolidated* jika tanah tersebut tidak stabil, tanah dalam proses pembentukan (baru diendapkan) dan belum sampai pada kondisi setimbang. Sedangkan tanah dalam kondisi *overconsolidated* terjadi akibat perubahan tegangan total yang terjadi karena erosi, penggalian, melelehnya lapisan salju yang menutupi dan terjadi akibat perubahan tekanan pori karena penguapan oleh pohon-pohon, pemompaan air tanah dalam, pengaliran air tanah ke lorong saluran dan pengeringan lapisan permukaan.



Gambar 6. Prosedur penentuan tekanan prakonsolidasi dengan cara grafis.

Sumber : Das, B.M. (1995)

Untuk menentukan nilai  $C_c$ , sebelumnya kita perlu menentukan terlebih dahulu besarnya tekanan prakonsolidasi. Cassagrande (1936) menyarankan suatu cara yang mudah untuk menentukan besarnya tekanan prakonsolidasi,  $P_c$ , dengan berdasarkan grafik angka pori ( $e$ ) terhadap  $\log p$  yang digambar dari hasil percobaan konsolidasi di laboratorium. Prosedurnya adalah sebagai berikut :

1. Melakukan pengamatan secara visual pada grafik, tentukan titik a dimana grafik e versus log p memiliki jari – jari kelengkungan yang paling minimum.
2. Gambar garis datar ab
3. Gambar garis singgung ac pada titik a.
4. Gambar garis ad yang merupakan garis bagi sudut bac
5. Perpanjang bagian grafik e versus log p yang merupakan garis lurus hingga memotong garis ad di titik f.
6. Absis untuk titik f adalah besarnya tekanan prakonsolidasi (pc). Setelah mendapatkan harga tekanan prakonsolidasi, maka harga Cc dapat ditentukan dengan menggunakan prinsip sebagai berikut :
  - a. Dari grafik e vs log p dicari grafik yang paling linear pada bagian dimana tanah sudah melewati tekanan prakonsolidasi.
  - b. Diambil dua titik ujung pada grafik yang paling linear tersebut
  - c. Mengaplikasikan rumus

$$= \frac{e_1 - e_2}{\log\left(\frac{P_2}{P_1}\right)} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dengan :

Cc : Indeks Kompresi

P1 : tegangan 1

P2 : tegangan 2

e1 : angka pori pada tegangan 1

e2 : angka pori pada tegangan 2

### 1. Koefisien Konsolidasi Arah Vertikal

Koefisien konsolidasi 24ertical ( $C_v$ ) menentukan kecepatan pengaliran air pada arah 24ertical dalam tanah. Karena pada umumnya konsolidasi berlangsung satu arah saja, yaitu arah 24ertical, maka koefisien konsolidasi sangat berpengaruh terhadap kecepatan konsolidasi yang akan terjadi. Harga  $C_v$  dapat dicari menggunakan persamaan berikut

$$C_v = \frac{T_v \times C_s}{t} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

$C_v$  = Koefisien konsolidasi arah vertikal ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$T_v$  = Faktor Waktu konsolidasi arah vertikal

$t$  = Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi pada saat tertentu (s)

$H$  = Panjang maksimum lintasan drainase (cm)

### 2. Koefisien Konsolidasi Arah Horizontal

Menurut (Royal, 2013) pada jurnal *Aspects on the Modelling of Smearzones Around Vertical Drain* untuk material tanah jenis lempung homogen maka nilai konsolidasi horizontal ( $C_h$ ) ;

$$C_h = 1 - 2 \cdot C_v$$

### 3. Koefisien Konsolidasi Arah Vertikal Gabungan

$C_v$  gabungan didapat dari nilai  $C_v$  dan tebal lapisan tanah setiap pengujian yang didapatkan dari *borehole*. Menurut CUR (*centre for civil*

*engineering research and codes*), rumus untuk mencari  $C_v$  gabungan adalah sebagai berikut :

$$C_v \text{ Gabungan} = \frac{(C_1+C_2+C_3+C_4+C_5)^2}{\left[\left(\frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}}\right)+\left(\frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}}\right)+\left(\frac{H_3}{\sqrt{C_{v3}}}\right)+\left(\frac{H_4}{\sqrt{C_{v4}}}\right)+\left(\frac{H_5}{\sqrt{C_{v5}}}\right)\right]^2} \dots\dots\dots(2.5)$$

**H. Waktu Konsolidasi**

Besarnya waktu konsolidasi akibat pemakaian PVD dihitung menggunakan persamaan :

$$t = \left(\frac{D^2}{8.Ch}\right) \cdot 2 \cdot F(n) \cdot \ln\left(\frac{1}{1-U_r}\right) \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana :

- $t$  = Waktu yang diperlukan untuk mencapai  $U_h$  (detik)
- $l$  = Diameter ekivalen lingkaran (cm)
  - = 1,13 S (untuk pola susunan persegi) dan
  - = 1,05 S (untuk pola susunan segitiga)
- $Ch$  = Koefisien konsolidasi arah horizontal (cm<sup>2</sup>/s)
- $F(n)$  = Faktor hambatan disebabkan karena jarak PVD
- $U_r$  = Derajat Konsolidasi arah radial

Perhitungan lamanya waktu konsolidasi di lapangan dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{C_s} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana :

- $T_v$  = Faktor waktu konsolidasi 25 *vertical*

$H$  = Panjang maksimum lintasa drainase (cm)

$C_v$  = Koefisien konsolidasi arah vertical (cm<sup>2</sup>/s)

$t$  = Waktu konsolidasi (s)

1. Perhitungan Besarnya Penurunan Konsolidasi

Besarnya penurunan konsolidasi dapat dicari dengan mempergunakan persamaan sebagai berikut :

$$s = \frac{C_c \cdot H}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \dots\dots\dots(2.8)$$

Sedangkan besarnya penurunan pada kondisi tanah lempung yang terlalu terkonsolidasi adalah :

Apabila  $(P_0 + \Delta P) < P_c$

$$s = \frac{C_s \cdot H}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0}$$

Apabila  $(P_0 + \Delta P) > P_c$

$$s = \frac{C_s \cdot H}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} + \frac{C_c \cdot H}{1+e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_c}$$

dimana :

$s$  = Penurunan akibat proses konsolidasi (m)

$C_c$  = Indeks kompresi tanah

$C_s$  = Indeks pengembangan tanah

$P_0$  = Tegangan *overbuden* efektif (t/m<sup>2</sup>)

$P_c$  = Tegangan prakonsolidasi efektif (t/m<sup>2</sup>)

$P$  = Penambahan tegangan (t/m<sup>2</sup>)

$e_0$  = Angka Pori

$H$  = Tebal lapisan tanah (m)

Adapun cara untuk mendapatkan parameter-parameter konsolidasi diatas adalah sebagai berikut :

1. Tekanan Prakonsolidasi ( $P_c$ )

Menunjukkan besarnya tekanan vertikal maksimum yang pernah terjadi terhadap tanah tersebut.

2. Indeks Kompresi Tanah ( $C_c$ )

Didapat dari kurva hasil terkonsolidasi kompresi asli yang merupakan bagian kurva dengan tekanan melebihi prakonsolidasi, bentuk kurvanya mendekati linier. Dari bagian kurva ini dapat dihitung Indeks Kompresi. (*Compression Index*)  $C_c$ , yang merupakan kemiringan dari bagian kurva ini. Holts dan Kovacs (1986), menentukan persamaan empiris untuk korelasi nilai  $C_c$  sebagai berikut :

a. Untuk Tanah *Undisturb Clays of Low to Medium Sensivity*

$$C_c = 0,009 \cdot (LL - 10) \dots\dots\dots(2.9)$$

b. Untuk Tanah *Remolded Clays*

$$= 0,007 \cdot (LL - 7) \dots\dots\dots(2.10)$$

3. Rekompresi atau Pengembangan (*Recompression or Swell*)

Bagian rekompresi dari kurva konsolidasi menunjukkan tingkah laku tanah jika mengalami tambahan beban kembali setelah sebelumnya mengalami

penurunan tegangan, sedangkan jika tanah mengalami penurunan tegangan, tidak seluruhnya volume tanah kembali, dari bagian kurva ini dapat dihitung Index Rekompresi (*Recompression Index*).

#### 4. Koefisien Konsolidasi ( $C_v$ )

Koefisien konsolidasi menunjukkan kecepatan pengaliran air pori selama konsolidasi, secara empiris dapat ditentukan dengan 2 cara, yaitu metoda logaritma waktu (*Casagrande*) dan metoda akar waktu (*Taylor*).

### I. *Settlement*

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

Bilamana suatu lapisan tanah lempung yang jenuh air yang mampu mampat (*compressible*) diberi penambahan tegangan berupa timbunan (*preloading*) di atasnya, maka penurunan (*settlement*) tanah tersebut akan terjadi dengan segera. Koefisien rembesan lempung adalah sangat kecil dibandingkan dengan koefisien rembesan pasir sehingga penambahan tekanan air pori yang disebabkan oleh pembebanan akan berkurang secara lambat laun dalam waktu yang sangat lama. Jadi untuk tanah lempung lembek, perubahan volume yang

disebabkan oleh keluarnya air dari dalam pori (konsolidasi) akan terjadi sesudah penurunan segera. Penurunan konsolidasi tersebut biasanya jauh lebih besar dan lebih lambat serta lama dibandingkan dengan penurunan segera. Secara umum, penurunan (*settlement*) pada tanah yang disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi dalam tiga kelompok besar, yaitu :

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

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

$$S_t = S_i + S_c + S_s \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana :

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

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

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

#### **J. *Plaxis* Sebagai Program Metode Elemen Hingga**

*Plaxis* adalah salah satu program aplikasi komputer yang menghitung

konsolidasi dengan menggunakan teori konsolidasi Biot. 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 regangan bidang maupun secara *axisymetris*. Program ini menerapkan metode antarmuka 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. Kondisi lapangan yang disimulasikan ke dalam program *Plaxis* ini bertujuan untuk mengimplementasikan tahapan pelaksanaan di lapangan kedalam tahapan pengerjaan pada program, dengan harapan pelaksanaan lapangan dapat didekati sedekat mungkin pada program, sehingga respon yang dihasilkan dari program dapat diasumsikan sebagai cerminan dan kondisi yang sebenarnya terjadi di lapangan.

## **K. Studi Literatur**

Beberapa penelitian yang menjadi bahan pertimbangan dan acuan penelitian ini dikarenakan adanya beberapa kesamaan metode akan tetapi dengan perlakuan yang berbeda pada sampel tanah yang digunakan, antara lain :

1. (Michael, 2017) dengan penelitian tentang analisis konsolidasi tanah lunak menggunakan *preloading* dan PVD dengan metode analitis dan metode elemen hingga dengan studi kasus proyek jalan bebas hambatan Medan-Kualanamu KM 36+100. Data-data analisis didapat dari parameter tanah berasal dari lokasi proyek. Adapun tujuan penelitian ini

untuk mengetahui besarnya penurunan konsolidasi tanah lunak yang menggunakan *preloading* dan PVD, mengetahui lamanya waktu konsolidasi tanah, menganalisa perbandingan lama waktu konsolidasi menggunakan dan tanpa menggunakan PVD. Hasil yang didapat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

Hasil analisa perhitungan penurunan secara analitis, dengan metode elemen hingga dan dari pembacaan *settlement plate* di lapangan seperti pada tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2. Hasil analisa penurunan berdasarkan tahap penimbunan

Tahap penimbunan	Tinggi Timbunan (cm)	Lama Konsolidasi (hari)	Penurunan di Titik Nodal (cm)			Penurunan di Lapangan
			A	B	C	SP-39
			1	0,533	2	2,591
2	2,474	18	10,139	10,612	10,137	0,300
3	2,849	6	11,327	12,033	11,324	0,300
4	2,959	92	11,941	12,829	11,939	6,400
5	3,143	2	12,372	13,398	12,369	6,500
6	3,379	56	13,119	14,525	13,118	7,700
7	3,423	42	13,234	14,713	13,233	8,700
8	3,612	24	13,661	15,456	13,695	9,300

Sumber: *Michael, (2017)*

Secara analitis lama waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi 95% tanpa menggunakan PVD adalah 136 hari sedangkan jika menggunakan PVD hanya membutuhkan waktu yang lebih singkat untuk mencapai derajat konsolidasi 95% yaitu 25 hari.

Tabel 3. Hasil perhitungan tegangan air pori berlebih dengan metode analitis

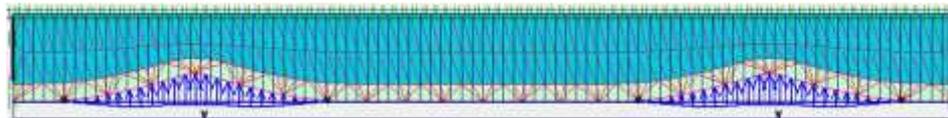
Pekerjaan	Tinggi timbunan perlapisan (m)	Total Tinggi timbunan (m)	Konsolidasi (hari)	Ekses Air Pori (kN/m <sup>2</sup> )	Ekses Air Pori Total (kN/m <sup>2</sup> )	Ekses Air Pori Sisa (kN/m <sup>2</sup> )
Timbunan	0,6					
<i>Sand Blanked</i>		1,153	2	17,248	17,248	12,281
Timbunan 1	0,553					
Timbunan 2	1,921	3,074	18	30,736	43,017	3,35
Timbunan 3	0,375	3,449	6	6	9,350	2,592
Timbunan 4	0,11	3,559	92	1,76	4,325	0,002
Timbunan 5	0,184	3,743	2	2,944	2,945	2,096
Timbunan 6	0,236	3,979	56	3,776	5,872	0,008
Timbunan 7	0,044	4,023	42	0,704	0,712	0,005

Sumber: *Michael, (2017)*

Nilai bangkitan tertinggi tegangan air pori secara analitis lebih besar (43,017 kN/m<sup>2</sup>) daripada dengan metode elemen hingga (2,395 kN/m<sup>2</sup>).

- (Sinaga, 2020) dengan penelitian tentang analisis perbaikan tanah dasar menggunakan *preloading* dan PVD dengan studi kasus timbunan proyek muara bakti, Bekasi. Tanah yang digunakan pada penelitian ini adalah tanah lempung dengan kadar air yang tinggi. Analisis ini menggunakan kombinasi *preloading* dan PVD dengan pola segitiga pada pemasangan

PVD. Tujuan penelitian ini antara lain untuk mengetahui besarnya penurunan tanah lunak dengan menggunakan *preloading* dan PVD, menganalisis lamanya waktu konsolidasi tanah lunak yang dibutuhkan menggunakan *preloading* dan PVD, menganalisis perbandingan lama waktu konsolidasi tanah lunak tanpa menggunakan PVD dan menggunakan PVD, dan menganalisis perbandingan jarak 1 m, 1,5 m, dan 2 terhadap pemasangan PVD. Hasil yang didapat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :



Gambar 7. Kontur penurunan yang terjadi pada Aplikasi Elemen Hingga

Tabel 4. Penurunan terhadap waktu tanpa menggunakan PVD

No.	Spasi (m)	Penurunan (m)	Konsolidasi (hari)
1	-	1,38	1579
2	-	1,6	1579
3	-	1,4	1579

Sumber: *Sinaga (2020)*

Tabel 5. Kesimpulan analisis pemodelan PVD tiap spasi

No	Spasi (m)	Waktu (hari)
1	1	12
2	1,5	25
3	2	44

Sumber: *Sinaga (2020)*

Berdasarkan penelitian ini didapatkan hasil analisis pemodelan kasus tanah lempung tanpa menggunakan PVD menghasilkan waktu konsolidasi sebesar 1597 hari dan mengalami penurunan sebesar 1,6 m, sehingga dibutuhkan perbaikan tanah seperti *Preloading* dan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) untuk mempercepat waktu konsolidasi. Pada hasil analisis pemodelan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) disimpulkan konfigurasi spasi 1m menghasilkan waktu konsolidasi yang lebih cepat yaitu 12 hari dan spasi 1,5 m menghasilkan waktu konsolidasi selama 25 hari dan pemasangan spasi 2 mmmenghasilkan waktu terkonsolidasi sebesar 44 hari. Pada hasil analisis pemodelan bahwa penurunan yang terjadi tidak berpengaruh terhadap perbedaan antara spasi PVD yang digunakan. Pada titik tinjau A dan C mengalami penurunan  $\pm 1,4$  m sedangkan titik tinjau B mengalami penurunan sebesar 1,6 m dan Pada hasil analisis pemodelan stabilitas keamanan tanah diperoleh nilai *Safety Factor* sebesar 1,57. Dimana kondisi tanah baik dalam melakukan perbaikan tanah dan aman sebagai penahan beban yang berada di atasnya.

### III. METODE PENELITIAN

#### A. Ilustrasi Penempatan *Preloading* dan PVD

Penempatan *preloading* dan PVD berlokasi di proyek tol Sumatera ruas Terbanggi - Kayu Agung. Pemodelan pemasangan terbagi atas 3 macam pemodelan yaitu, pemodelan tanah tanpa menggunakan PVD, pemodelan menggunakan PVD dengan spasi 1 m, pemodelan menggunakan PVD dengan spasi 1,5 m dan pemodelan menggunakan PVD dengan spasi 2 m. Ilustrasi pemasangan *preloading* dan PVD dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Ilustrasi Penempatan *preloading* dan PVD di Lapangan

## **B. Tahapan Umum**

Tahapan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Identifikasi masalah
2. Perumusan masalah
3. Studi literatur
4. Penentuan material yang digunakan
5. Pemodelan geometri menggunakan Metode Elemen Hingga
6. Analisis konsolidasi dan waktu penurunan tanah

## **C. Metode Analisis Data**

Metode analisis data yang dilakukan pada tugas akhir ini meliputi hasil penyelidikan tanah, adapun analisis yang dilakukan adalah sebagai berikut:

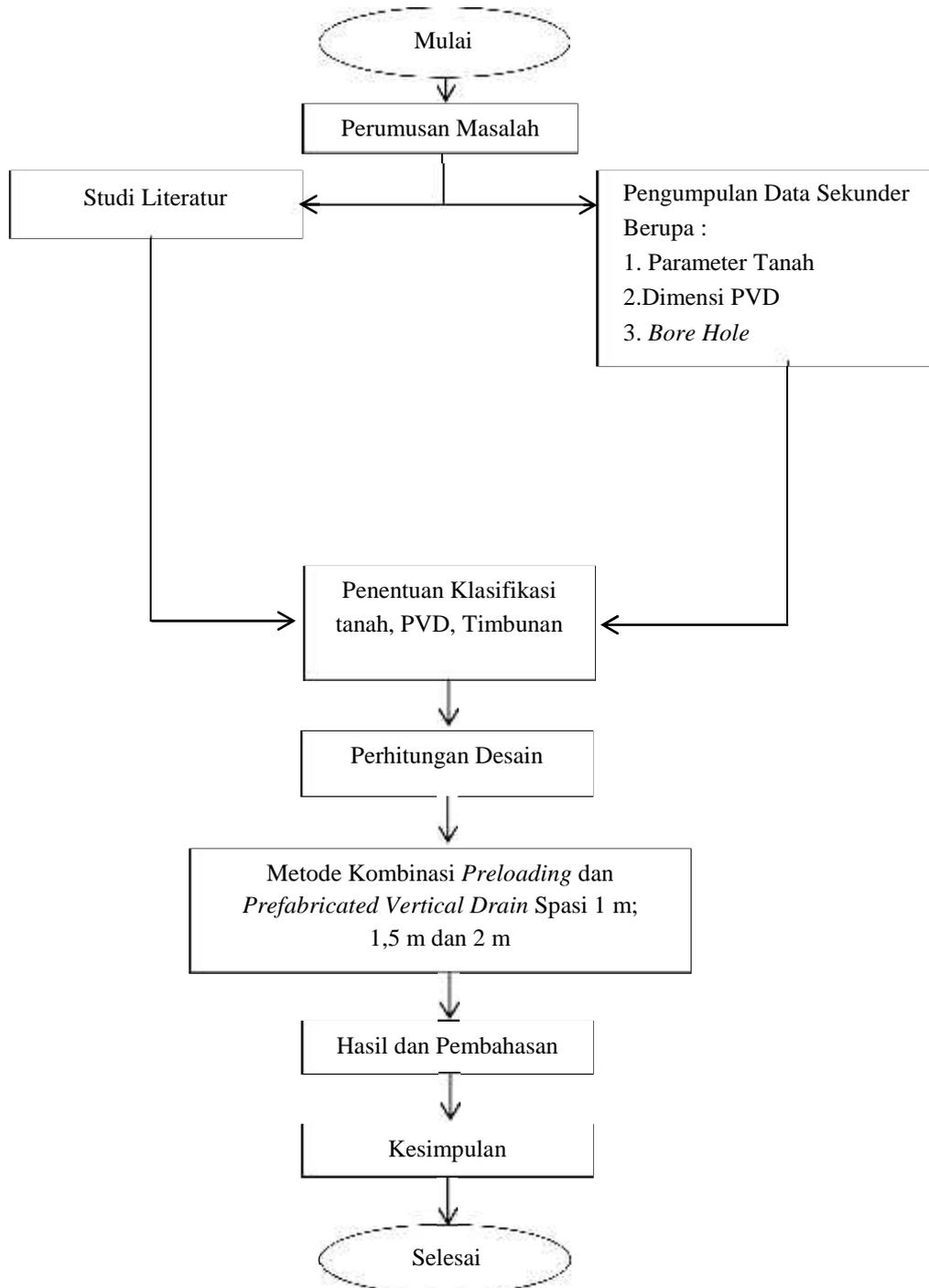
1. Material dan jenis tanah
2. Korelasi parameter tanah
3. Pemodelan tanah
4. Hasil analisis
5. Faktor Keamanan

Data-data didapat dari pengujian lapangan dan laboratoirum. Beberapa parameter tanah juga didapat dari referensi dan jurnal.

#### **D. Data Sekunder**

Data sekunder merupakan data pendukung yang dipakai dalam proses pembuatan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir. Data sekunder yang digunakan adalah data hasil penyelidikan tanah dan literatur-literatur penunjang. Langkah selanjutnya setelah mengetahui data-data yang diperlukan adalah menentukan metode pengumpulan data. Metode pengumpulan data dilakukan dengan mengambil data-data dari hasil penyelidikan, penelitian, tes atau uji laboratorium, pedoman, bahan acuan, maupun standar yang diperlukan dalam perencanaan konstruksi melalui buku dan jurnal yang terkait. Setelah diperoleh data-data yang diperlukan, maka selanjutnya dapat dilakukan proses perhitungan.

### E. Diagram Alir



Gambar 9. Diagram Alir

## V. PENUTUP

### A. Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang didapatkan dari hasil analisis BAB IV adalah sebagai berikut :

1. Besar penurunan tanah menggunakan kombinasi *preloading* dan PVD yang efektif dengan jarak PVD 1,5 m yaitu 0,868 m.
2. Waktu yang dibutuhkan untuk konsolidasi tanah lunak menggunakan kombinasi *preloading* dan PVD rata-rata waktu yang dibutuhkan yaitu 163 hari agar mendapatkan hasil yang efektif.
3. Diketahui bahwa metode *preloading* + PVD dengan jarak 1,5 m adalah metode yang terbaik dalam melakukan perbaikan tanah. Dikarenakan penurunan tanah pada saat konsolidasi pertama dan kedua tanah dapat turun dengan cepat dibanding dengan metode lainnya serta tekanan *pore excess water* pada metode tersebut adalah yang paling besar. Ini menunjukkan bahwa PVD bekerja dengan baik untuk mengeluarkan air dari dalam tanah.

## B. Saran

Adapun saran yang dapat penulis berikan sebagai berikut :

1. Untuk mendapatkan perbandingan respon program yang benar, diperlukan penelitian lanjutan
2. Perlu dilakukan penelitian lanjut dengan variasi *spasi* antar PVD, dan material yang lebih beragam agar menghasilkan hasil yang lebih baik.
3. Penggunaan *software* berbasis elemen hingga sebaiknya memperhatikan pemilihan tipe, karena sangat mempengaruhi hasil *output* program. Semakin baik kualitas *software* maka hasil analisis semakin mendekati perilaku sebenarnya, namun diperlukan *hardware* yang cukup baik untuk dapat melakukan proses komputasi dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- A. W. Skempton, 1953. The Colloidal Activity of Clays. *3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Switzerland)*, 1, 57–61.
- Bowles E.J., 1989. *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah*. PT. Erlangga. Jakarta.
- Casagrande, 1936. Classification and Identification of Soils. *Transactions. ASCE*, 113, 901.
- Chai, J.-C., Shen, S.-L., Miura, N., and Bergado, D.T., 2001. Simple Method of Modeling PVD-Improved Subsoil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (11), 965–972.
- Das, B.M., 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip - Prinsip Rekayasa Geoteknis)*. II. Jakarta: Erlangga.
- Gulhati dan Shaskhi K, 2005. Material polimer dapat berupa Material PVD dengan lebar 90 sampai 100 mm, ketebalan 2 sampai 6 mm.
- Hardiyatmo, H.C., 1999. *Mekanika Tanah II*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Hardiyatmo, H.C., 2002. *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

- Hardiyatmo, H.C., 2006. *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Han, Jie., Principle and Practice of Ground Improvement, 2015. 432 pp. Hardback. ISBN: 9781118259917
- Hausmann, M.R., 1990. *Engineering Principles of Ground Modification*. McGraw Hill.
- Hidayati, A. dan Wirya Ardana, M., 2008. Kombinasi Preloading Dan Penggunaan Pre-Fabricated Vertical Drains Untuk Mempercepat Konsolidasi Tanah Lempung Lunak (Studi Kasus Tanah Lempung Suwung Kangin). *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 12 (2), 187–195.
- Holts, R. D., dan Kovacs, W.D., 1986. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. USA: Prentice Hall.
- Holtz, W.G. dan Gibbs, H.J., 1956. *Engineering Properties of Expansive Clay Transactions*. ASCE.
- Lestari, M.I., Manoppo, F.J., dan Rondonuwu, S., 2019. Analisis Kestabilan Tanah Timbunan (Embankment) Pada Tanah Rawa Dengan Menggunakan Bambu (Studi Kasus: Jalan Toll Manado-Bitung). *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 8 (2), 1078–1091.
- Michael, 2017. Analisis Konsolidasi Tanah Lunak Menggunakan Preloading dan PVD Dengan Metode Analitis Dan Metode Elemen Hingga (Studi Kasus Proyek Jalan Bebas Hambatan Medan-Kualanamu Km 36 + 100). *Skripsi*, Universita, Medan.

Royal, K.T.H., 2013. Aspects on on the the modelling modelling of of smear smear zones zones around around vertical vertical drains drains zone remaniée autour, 2965–2968.

Rudy Purwondho, B., 2018. Development of Drains made of Natural Fibers for Accelerate Consolidation in Soft Soil, 9 (1), 1–6.

S. Hansbo, 1960. Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains. *Ground Engineering*, 12 (July).

Skempton. 1953. The Colloidal Activity of Clays Proceeding 3 th International Conference of Soil Mecanic and Fondation Engineering, London, Vol. 1, Page 57 – 61.

SNI-8460, 2017. Persyaratan Perancangan Geoteknik.

Suhendra, A. dan Irsyam, M., 2011. Studi Aplikasi Vacuum Preloading Sebagai Metode Alternatif Percepatan Proses Konsolidasi pada Tanah Lempung Lunak Jenuh Air: Trial GVS pada Perumahan Pantai Indah Kapuk, Jakarta. *ComTech: Computer, Mathematics and Engineering Applications*, 2 (2), 1055.

Terzaghi, 1923. *Mekanika Tanah Jilid 1*. Surabaya: Erlangga.

Terzaghi, 1987. *Mekanika Tanah Dalam Praktek Rekayasa*. Jakarta: Erlangga.

Wesley, L.D., 1977. *Mekanika Tanah*. Jakarta: Badan Penerbit Pekerjaan Umum.