

**ANALISIS PERBAIKAN TANAH DENGAN METODE
PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD)
STUDI KASUS : PEMBANGUNAN JALAN TOL TEBING TINGGI –
INDERAPURA**

SKRIPSI

Di Ajukan Untuk Memenuhi Syarat Dalam
Ujian Sidang Sarjana Teknik Sipil
Universitas Medan Area

Disusun oleh
FETRA YAHYA NAKHE
168110007



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
2021**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

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

Document Accepted 15/12/21

Access From (repository.uma.ac.id)15/12/21

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PERBAIKAN TANAH DENGAN METODE
PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD)

STUDI KASUS : PEMBANGUNAN JALAN TOL TEBING TINGGI -
INDERAPURA

SKRIPSI

Di Ajukan Untuk Memenuhi Syarat Dalam

Ujian Sidang Sarjana Teknik Sipil

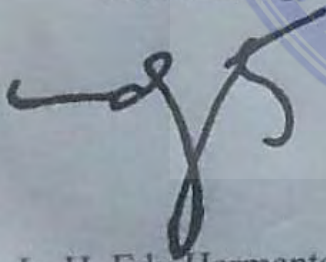
Universitas Medan Area

Disusun Oleh

Fetra Yahya Nakhe
168110007

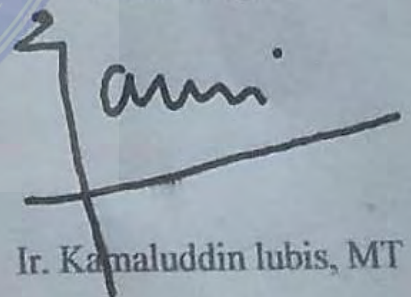
Disetujui

Pembimbing I



Ir. H. Edy Hermanto, MT

Pembimbing II



Ir. Kamaluddin lubis, MT

Mengetahui

Dekan Fakultas Teknik



UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

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



Susilawati, S.Kom., M.Kom

Document Accepted 15/12/21

HALAMAN PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Fetra Yahya Nakhe

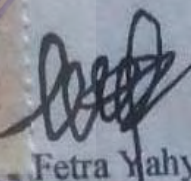
Npm : 168110007

Judul : Analisis Perbaikan Tanah Dengan *Metode Prefabricated Vertical Drain (PVD)*

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi ini merupakan karya saya sendiri. Apabila terdapat karya orang lain yang saya kutip, maka saya akan mencatumkan sumber secara jelas. Jika di kemudian hari dikemudian hari ditemukan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi dengan aturan yang berlaku. Demikian pernyataan ini saya buat tanpa ada paksaan dari pihak manapun.

Medan, 28 September 2021
Penulis,




Fetra Yahya Nakhe
168110007

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

TUGAS AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIK

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

Nama : Fetra Yahya Nakhe
Npm : 168110007
Program Studi : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada universitas medann area hak bebas royalti non-eksklusif (non-eksklusif royalty free right) atas karya ilmiah yang berjudul :

ANALISI PERBAIKAN TANAH DENGAN METODE PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD)

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan) dengan hak bebas royalty non-eksklusif ini universitas medan area berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan tugas akhir/skripsi/tesis selama tetap mencatumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Medan, 28 September 2021
Yang Menyatakan,



Fetra Yahya Nakhe
1681100

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Tuhan yang Maha Esa, yang telah memberikan pengetahuan, kekuatan, dan kesempatan kepada penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “Analisis Perbaikan Tanah Dengan Metode *Prefabricated Vertical Drain* (PVD)”.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Medan Area. Selama penyusunan skripsi ini, banyak rintangan yang penyusun dapatkan, tetapi berkat bantuan, bimbingan dan dorongan dari berbagai pihak, akhirnya dapat terselesaikan dengan baik. Melalui kesempatan ini, penyusun ingin menyampaikan rasa terimakasih atas kerja sama dan dukungan dari berbagai pihak selama proses penelitian hingga penyusunan skripsi bisa terselesaikan dengan baik, untuk itu saya mengucapkan terimakasih kepada :

- Terimakasih penulis ucapkan kepada Bapak Prof. Dr. Dadan Ramdan, M. Eng, M.sc, selaku Rektor Universitas Medan Area.
- Terimakasih penulis ucapkan kepada Ibu Dr. Ir. Dina Maizana. M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Medan Area.
- Terimakasih penulis ucapkan kepada Ibu Kepala Prodi Teknik Sipil, Ibu Susilawati S. Kom., M. Kom yang telah membimbing hingga dapat menyelesaikan studi dengan baik.
- Terimakasih penulis ucapkan kepada dosen pembimbing antara lain, Bapak Ir. H. Edy Hermanto, M.T. sebagai pembimbing satu dan Bapak Ir. Kamalludin M.T. sebagai pembimbing dua yang telah banyak memberikan

saran dan masukan yang bermanfaat bagi penulis sehingga penyusunan skripsi ini bisa terselesaikan dengan baik.

- Terimakasih penulis ucapkan kepada PT. Hutama Karya yang telah mengizinkan saya untuk bisa meneliti di proyek jalan tol Tebing Tinggi – Inderapura.
- Terimakasih kepada para dosen tanpa terkecuali, para staff fakultas, dan petugas kebersihan yang telah memberikan kami kenyamanan dalam belajar.
- Ucapan terimakasih paling spesial kepada kedua orang tua dan saudara – saudara saya, yang selalu mendoakan dan selalu memberikan dorongan moral maupun materi kepada penulis.
- Ucapan terimakasih penulis ucapkan kepada kawan – kawan mahasiswa teknik sipil stambuk 2016 dan Alumni Teknik Sipil Universitas Medan Area dan semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini.

Dalam penyusunan skripsi ini penulis juga menyadari bahwa isi maupun teknik penulisanya jauh dari kesempurnaan, maka dari itu penulis mengharapkan kritikan maupun saran dari para pembaca yang bersifat positif demi menyempurnakan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat khususnya bagi penulis dan umumnya para pembaca sekalian.

Medan, 28 September 2021
Penulis,



Fetra Yahya Nakhe

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN

HALAMAN PERNYATAAN

KATA PENGANTAR..... i

DAFTAR ISI..... iii

DAFTAR TABEL vii

DAFTAR GAMBAR..... viii

ABSTRAK ix

ABSTRACT x

BAB 1 PENDAHULUAN 1

1.1. latar belakang 1

1.2. Rumusan Masalah 2

1.3. Batasan Masalah..... 2

1.4. Tujuan Penelitian..... 3

1.5. Manfaat Penelitian..... 3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... 5

2.1. Tanah 5

2.2. Komponen – Komponen Tanah..... 6

2.2.1. Hubungan Antar Fase Tanah 7

2.2. 2. Jenis – Jenis Tanah	16
2.3. Tanah Lunak	18
2.3.1. Sifat – Sifat Tanah Lunak	20
2.3.2. Tipe Tanah Lunak	21
2.4. Permasalahan Yang Timbul Pada Tanah Lunak	24
2.5. Perbaikan Tanah	27
2.5.1. Mengikatkan Kuat Geser Dan Tekan.....	28
2.5.2. Peningkatan Modulus Elastis, Modulus Geser, Dan <i>Bulk Modulus</i>	29
2.5.3. Mengurangi Kompresibilitas	29
2.5.4. Meningkatkan Stabilitas Volume	30
2.5.5. Mereduksi Bahaya <i>Liquefaction</i>	30
2.6. Tanah Yang Memerlukan Perbaikan	31
2.7. Pemilihan Tipe Perbaikan Tanah	32
2.8. Drainase Vertikal.....	33
2.8.1. Prefabricated Vertical Drain (PVD)	37
2.8.2. Penyelidikan Tanah Untuk Pekerjaan PVD.....	39
2.8.3. Persyaratan Material PVD	40
2.8.4. Verifikasi Pemodelan PVD.....	52
2.9. Alat Alat Pemantau Gerakan Tanah.....	56
2.10. Penurunan (<i>settlement</i>)	57

2.11. Konsolidasi	61
2.11.1. Teori Konsolidasi Drainase Vertikal	67
2.12. Timbunan Bertahap	69
2.12.1. Cara Menentukan Tinggi Timbunan Dengan PVD	70
2.12.2. Distribusi Tegangan Akibat Beban Timbunan	73
2.12.3. Penurunan Timbunan.....	74
2.13. Peningkatan Daya Dukung Tanah	77
BAB III METODE PENELITIAN	78
1.1.Deskripsi Penelitian.....	78
1.2.Lokasi Dan Peta Penelitian.....	78
1.3.Tahap Persiapan.....	79
1.4.Tahapan Penelitian	80
1.5.Kerangka Berpikir Penelitian	81
BAB IV PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN	82
4.1 Data Tanah Dan Material	82
4.1.1 Data Hasil Pengujian PVD (Prefabricated Vertical Drain)	82
4.2. Pembahasan	85
4.2.1. Konsolidasi Tanpa PVD	85
4.2.2. Perencanaan PVD untuk Mempercepat Konsolidasi	86
4.3.2. Perhitungan Derajat Konsolidasi Dengan PVD.....	87
4.3.3. Perhitungan Penurunan Konsolidasi.....	91

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	100
5.1. Kesimpulan.....	100
5.2. Saran	100
DAFTAR PUSTAKA	101
LAMPIRAN.....	



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 satuan serta batas nilai sifat – sifat tanah	10
Tabel 2. 2 hubungan antara kekuatan dengan indeks cair.....	12
Tabel 2. 3. batas – batas Atterberg beberapa jenis tanah	12
Tabel 2. 4. hubungan antara indeks plastitas, aktivitas, dan plastitas beberapa mineral lempung	13
Tabel 2. 5. hubungan antara indeks plastisitas dan plastisitas	14
tabel 2. 6. koefisien permeabilitas untuk beberapa jenis tanah	16
Tabel 2. 7. batas – batas ukuran gradasi tanah.....	19
Tabel 2. 8. panduan untuk kuat geser tak terdrainase dari tanah berkohesi.....	21
Tabel 2. 9. batasan – batasan ukuran golongan tanah	22
Tabel 2. 10. Klasifikasi tanah gambut berdasarkan kadar serat.....	23
Tabel 2. 11. variasi faktor waktu terhadap derajat konsolidasi.....	65
Tabel 4. 1. tabel rangkuman hasil pengujian prefabricated vertical drain (PVD)	82
Tabel 4. 2 nilai N - SPT pada penyelidikan tanah pada BH 40	83
Tabel 4. 3. Hasil Test Laboratorium	84
Tabel 4. 4. data hasil uji laboratorium hasil pemboran	85
Tabel 4. 5. perhitungan penurunan konsolidasi	97

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 (a) Elemen tanah dalam keadaan asli, (b) tiga fase elemen tanah.....	8
gambar 2. 2. kurva plastisitas	15
Gambar 2. 3. diagram batas –batas Atterbeng untuk tanah organik dan inorganik	23
Gambar 2. 4 . PVD setelah dikeluarkan dari kemasan.....	37
Gambar 2. 5. Tahapan pemasangan PVD kedalam tanah	41
Gambar 2. 6. PVD pola susunan segiempat.....	43
Gambar 2. 7. PVD pola susunan segitiga.....	43
Gambar 2. 8. Diameter ekivalen (dw) PVD	44
Gambar 2. 9. Posisi pemasangan PVD terhadap mandrel.....	46
Gambar 2. 10. photo pelaksanaan pemasangan drainase vertical, 2020	49
Gambar 2.11.Verifikasi bentuk penampang PVD dalam pemodelan (a) Axisymmetry (b) Plane strain.....	56
Gambar 2. 12. faktor pengaruh (I) akibat beban timbunan (Osterberg. 1957).(sumber: perbaikan tanah, 2020).....	74
Gambar 3. 1. peta lokasi pembangunan jalan tol Tebing Tinggi – Inderapura	79
Gambar 3. 2. bagan alir penelitian.....	82
Gambar 4. 2. grafik perbandingan lamanya hari untuk mencapai derajat konsolidasi90% dengan PVD dan tanpa menggunakan PVD	91

ABSTRAK

Tanah memiliki peranan yang sangat penting karena berfungsi sebagai penopang dari suatu konstruksi seperti jalan raya, gedung, jembatan dan lainnya. Masalah yang sering terjadi pada tanah lunak adalah penurunan yang disebabkan oleh proses konsolidasi akibat ada beban di atasnya. Pada sebuah konstruksi terkadang pembangunan berada pada lokasi tanah yang tidak baik (lunak), oleh karena itu perlu dilakukan perbaikan tanah untuk mempercepat konsolidasi salah satunya adalah metode perbaikan dengan *prefabricated vertical drain* (PVD). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghitung besar dan waktu penurunan tanah dengan metode *prefabricated vertical drain* (PVD) dengan pola pemasangan segitiga dan jarak pemasangan 1,5 m. Dari analisis untuk mencapai derajat konsolidasi 90% dengan menggunakan *prefabricated vertical drain* (PVD) dengan pola pemasangan segitiga dan jarak 1,5 m dibutuhkan waktu selama 12 minggu dengan besar penurunan 1,17 m.

Kata kunci : derajat konsolidasi, penurunan, *prefabricated vertical drain* (PVD).

ABSTRACT

Soil has a very important role because it functions as a support for a construction such as roads, buildings, bridges and others. The problem that often occurs in soft soil is the settlement caused by the consolidation process due to the load on it . In a construction, sometimes the development is in a location where the soil is not good (soft), therefore it is necessary to improve the soil to accelerate consolidation, one of which is the repair method with prefabricated vertical drain (PVD). The purpose of this study was to calculate the magnitude and time of land subsidence using the prefabricated vertical drain (PVD) method with a triangular installation pattern and a distance of 1.5 m. In this study, a decline analysis was carried out on the Tebing Tinggi - Inderapura toll road construction project. From the analysis to achieve a degree of consolidation of 90% by using a prefabricated vertical drain (PVD) with a triangular installation pattern and a distance of 1.5 m, it took 12 weeks and a large decrease of 1.17 m.

Keywords: degree of consolidation, settlement, prefabricated vertical drain (PVD).

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur sering kali dibangun diatas tanah yang lunak yang dapat menyebabkan kegagalan pada struktur bila tidak dilakukan perbaikan. Seperti pada pembangunan jalan tol Tebing Tinggi – Inderapura dimana berdasarkan hasil penyelidikan tanah, kondisi tanah pada proyek tersebut adalah berlempung lunak.

Permasalahan yang terjadi pada tanah berlempung lunak adalah terjadinya penurunan tanah apabila tanah tersebut menerima beban yang besar (Hary C. H., 2020). Penurunan pada tanah lunak terjadi akibat penyusutan pori-pori tanah secara vertikal dan horizontal dimana berhubungan dengan dengan perubahan volume tanah disebut penurunan konsolidasi (Braja M. Das, 2018).

Lokasi yang ditinjau pada tugas akhir ini adalah proyek pembangunan jalan tol Tebing Tinggi – Indrapura pada STA 103 – 400, berdasarkan hasil penelitian tanah pada lokasi tersebut yang di lakukan oleh PT. Hutama Karya dengan menggunakan alat *drilling log* adalah tanah berlempung lunak dan mengandung banyak air. Adapun kondisi tanah yang demikian merupakan kondisi tanah yang tidak baik jika digunakan sebagai tanah dasar untuk membangun sebuah konstruksi diatasnya, karena penurunan yang akan terjadi cukup besar dan waktu yang dibutuhkan untuk mendisipasi air pori juga sangat lama .

Dalam mengatasi masalah penurunan tanah yang besar dan waktu konsolidasi yang lama pada tanah lempung lunak, maka perlu diadakan perbaikan

tanah untuk mempercepat proses konsolidasi pada tanah (Heny Susiazti, 2020). Salah satu metode perbaikan tanah yang umumnya digunakan dalam mengatasi tanah lunak adalah perbaikan tanah dengan metode prefabricated vertikal drain (PVD). Karena perbaikan tanah dengan metode prefabricated vertikal drain (PVD) dapat mempercepat proses konsolidasi pada tanah (Rifki A., 2020)

dari uraian diatas maka untuk mengatasi masalah tanah lunak pada pembangunan jalan tol Tebing Tinggi - Inderapura di gunakan perbaikan tanah dengan metode prefabricated vertikal drain (PVD).

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Berapa lamanya waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi 90% dengan menggunakan perbaikan tanah dengan metode *prefabricated vertical drain* (PVD) dengan pola pemasangan 1,5 m?
2. Berapa besarnya penurunan tanah yang terjadi dengan menggunakan perbaikan tanah metode *prefabricated vertical drain* (PVD)?

1.3. Batasan Masalah

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

- a. analisis besar penurunan dan waktu konsolidasi pada tugas akhir ini dilakukan pada STA 301 – 400 pada proyek pembangunan jalan tol Tebing Tinggi – Inderapura.

- b. Parameter – parameter tanah yang digunakan dalam menganalisa konsolidasi yang terjadi didapatkan dari PT. Utama Karya, berdasarkan hasil test lapangan dengan menggunakan alat uji drilling bor untuk mengetahui elevasi muka air, jenis- jenis tanah, kedalaman tanah keras dan juga pengujian dilaboratorium untuk mengetahui berat jenis tanah, angka pori, dan parameter – parameter tanah lainnya.
- c. Penurunan yang ditinjau hanya penurunan konsolidasi.
- d. Perhitungan lama waktu konsolidasi ditinjau hingga mencapai derajat konsolidasi 90 persen.
- e. Tidak menghitung variasi jarak pemasangan PVD dan biaya.

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui lamanya waktu yang dibutuhkan mencapai derajat konsolidasi 90% dan besarnya penurunan yang terjadi setelah terjadinya konsolidasi 90% pada tanah, dengan menggunakan *prefabricated vertical drain* (PVD) dengan pola pemasangan segitiga dan jarak 1,5 m pada proyek pembangunan jalan tol Tebing Tinggi – Indrapura.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Penulis

Memberikan atau menambah wawasan bagi penulis, terutama dalam penerapan ilmu yang didapat dibangku kuliah dengan menyatukan materi perkuliahan dengan objek permasalahan yang dijadikan materi pembahasan, sehingga menambah pengalaman langsung tentang cara menganalisis perbaikan

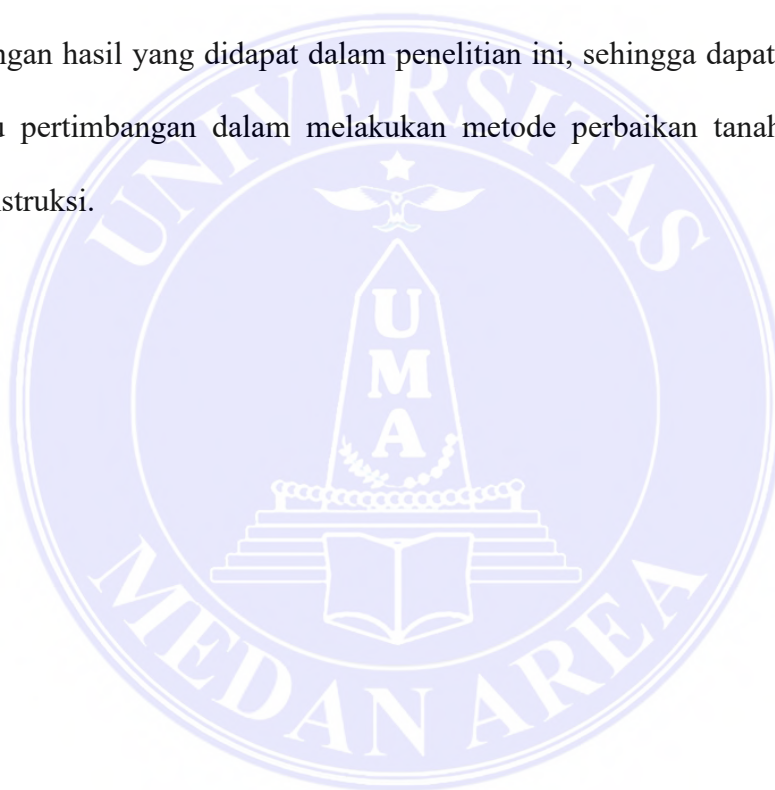
tanah dengan metode *prefabricated vertical drain* (PVD) sehingga bisa diterapkan nantinya didalam dunia kerja.

b. Akademik

Dapat dijadikan sebagai bahan masukan atau refrensi dalam pembelajaran terutama bagi mahasiswa.

c. Instansi

Dengan hasil yang didapat dalam penelitian ini, sehingga dapat menjadi salah satu pertimbangan dalam melakukan metode perbaikan tanah dalam dunia konstruksi.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tanah

Tanah adalah bahan bangunan yang merupakan produk alami yang bersifat unik tidak universal, yang berarti tanah akan berbeda dari satu lokasi ke lokasi yang lainnya. Semua jenis bangunan seperti bangunan gedung, jalan raya, jalan kereta api, jembatan, bendungan, dan lain-lain, pasti dibangun di atas tanah oleh sebab itu tanah harus memenuhi syarat tertentu agar dapat mendukung beban yang berasal dari bangunan di atasnya. Namun demikian, didalam membangun suatu bangunan sipil, sering kali bahwa keberadaan tanah jelek tidak dapat dihindari (Wesley, 2017).

Istilah tanah dalam bidang mekanika tanah dimaksudkan untuk mencakup semua bahan dari tanah lempung sampai kerakal, jadi semua endapan alam yang bersangkutan dengan teknik sipil kecuali batuan. Tanah dibentuk oleh pelapukan fisika dan kimiawi pada batuan. Pelapukan fisika tidak pernah menghasilkan tanah bersifat lempung sekalipun ukurannya sama kecilnya dengan butiran lempung. Untuk menghasilkan lempung, harus ada juga pelapukan kimiawi (Braja M. Das, 2010).

Pelapukan kimiawi memerlukan air serta oksigen dan karbondioksida. Proses kimiawi ini mengubah mineral yang terkandung dalam batuan menjadi jenis mineral lain yang sangat berbeda sifatnya. Mineral baru ini disebut mineral lempung (*clay*). Dan besar umumnya lebih kecil dari 0,002 mm. mineral lempung inilah yang menghasilkan sifat lempung khusus, yaitu kohesi serta plastisitas.

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 di antara partikel-partikel padat tersebut (Braja M. Das, 2010).

Tanah berguna sebagai bahan bangunan pada berbagai macam pekerjaan teknik sipil, disamping itu tanah berfungsi juga sebagai pendukung pondasi dari bangunan. Semua proyek konstruksi sipil pasti didirikan di atas tanah, seperti gedung-gedung bertingkat, jalan raya, jembatan, bandar udara, dermaga, pelabuhan, kanal dan lain sebagainya dibangun di atas tanah. Oleh karena itu tanah mengambil peranan yang sangat penting dalam proyek konstruksi (Juanda A., 2017).

Tanah merupakan salah satu hal yang wajib diperhatikan karena keadaan tanah di lapangan pada umumnya tidak homogen. Tanah memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda-beda. Apabila tanah difungsikan sebagai pendukung pondasi bangunan, tanah tersebut harus memiliki kondisi tanah yang stabil, sehingga apabila ada sifat tanah yang kurang mampu mendukung bangunan harus diperbaiki terlebih dahulu agar mencapai daya dukung tanah yang diperlukan. Dan penurunan yang terjadi akibat pembebanan tidak boleh melebihi penurunan yang diijinkan. Salah satu jenis tanah yang mempunyai daya dukung rendah adalah tanah lunak (Braja M. Das).

2.2. Komponen – Komponen Tanah

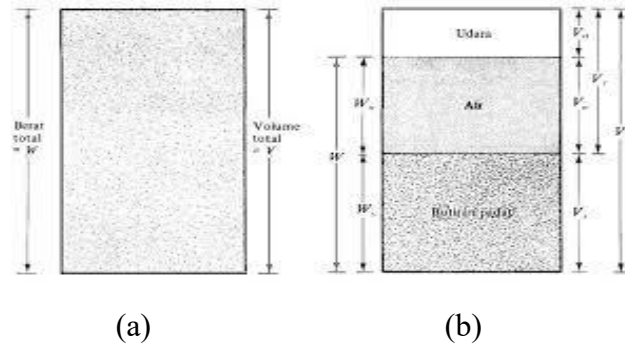
Tanah merupakan bahan yang memiliki sifat yang tidak seragam. Umumnya tanah terdiri atas 2 macam bahan, akan tetapi, tidak jarang

ditemukan tanah dengan terdiri atas 3 macam bahan. Bahan – bahan komponen ini disebut fase. Ketiga fase ini adalah butiran tanah (padat), air dan udara. Sebaian besar yang ditemukan oleh ahli geoteknik hanya mengandung air pada rongga pori. Tanah seperti itu disebut tanah jenuh (L.D. Wesley, 2017).

2.2.1. Hubungan Antar Fase Tanah

Ada berbagai defenisi dan istilah yang digunakan untuk menjelaskan sifat dan perbandingan ketiga fase pembentuk tanah. Istilah – istilah yang digunakan untuk mendefinisikan massa, berat dan volume dari masing – masing fase dapat dilihat pada persamaan parameter tanah dibawah. Pada beberapa parameter ini juga terdapat nilai maksimum yang mungkin diperoleh, bergantung pada cara definisi yang dipakai untuk parameter tersebut. Misalnya, porositas memiliki nilai antara 0 sampai dengan 1. Parameter lain, angka pori tidak memiliki batasan nilai. Derajat kejenuhan hanya dapat bernilai dari 0 – 100%.

Ada satu parameter lagi yang sebaiknya diterangkan disini, yaitu berat satuan dibawah air (*submerged unit weight*). Definisi parameter ini adalah $\gamma' = \gamma - \gamma_w$ dimana γ' adalah berat satuan tanah terendam (*submerged*). Jadi, berat satuan terendam adalah berat efektif pada tanah dibawah muka air tanah. Berat satuan ini memperhitungkan tegangan mengapung yang berasal dari air, dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 (a) Elemen tanah dalam keadaan asli, (b) tiga fase elemen tanah (Sumber : L.D. Wesley, 2017).

Defenisi dan hubungan antar fase tanah dapat dilihat pada persamaan – persamaan dibawah ini :

➤ $\rho = M/V \dots\dots\dots(2.1)$

Dimana : ρ = kepadatan total (kg/m³)

M = massa total (kg)

V = volume total (m³)

➤ $\gamma = W/V \dots\dots\dots(2.2)$

Dimana : γ = berat satuan (kN/m³)

W = berat total (kN)

V = volume total (m³)

➤ $\omega = M_w/M_s \dots\dots\dots(2.3)$

Dimana : ω = kadar air (%)

M_w = berat air (%)

M_s = berat butiran (%)

➤ $\rho_d = M_s/V \dots\dots\dots(2.4)$

Dimana : ρ_d = kepadatan kering (kg/m³)

M_s = massa butiran (kg)

V = volume total (m³)

➤ $\gamma_d = W_s/V$ (2.5)

Dimana : γ_d = berat satuan kering (kN/m³)

W_s = berat butiran (kN)

V = volume total (m³)

➤ $\rho_s = M_s/V_s$ (2.6)

Dimana : ρ_s = kepadatan butiran (kg/m³)

M_s = massa butiran (kg)

V_s = volume butiran (m³)

➤ $G_s = \rho_s/\rho_w$ (2.7)

Dimana : G_s = berat jenis

ρ_s = berat satuan butiran

ρ_w = berat satuan air

➤ $e = V_v/V_s$(2.8)

dimana : e = angka pori

V_v = volume pori

V_s = volume butiran

➤ $n = V_v/V$ (2.9)

dimana : n = porositas

$V_v =$ volume pori

$V =$ volume total

➤ $S_r = V_w/V_v \dots\dots\dots(2.10)$

Dimana : $S_r =$ derajat kejenuhan (%)

$V_w =$ volume air

$V_v =$ volume pori

➤ $a_v = V_a/V \dots\dots\dots(2.11)$

dimana : $a_v =$ kadar udara %

$V_a =$ volume udara

$V =$ volume total

Parameter yang terpenting dalam tanah adalah berat satuan dan kadar air. Nilai kedua parameter ini dapat ditentukan langsung dengan pengujian dilaboratorium. Berat jenis tanah juga didapat dari hasil pengujian dilaboratorium. Parameter – parameter tanah lainnya dapat dihitung dari ketiga parameter tersebut. Berdasarkan hasil pengujian dilobarotorium batas – batas nilai sifat – sifat tanah dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1satuan serta batas nilai sifat – sifat tanah

Istilah	Satuan	Batas – batas nilai
Kecepatan total (ρ)	Kg/m ³	1500 – 1200
	Gram/cm ³	1,5 – 2,1
	Ton/m ³	1,5 – 2,1
Berat satuan (γ)	kN/m ³	15 – 21
Kadar air (ω)	%	15 – 80 (boleh > 100)
Kepadatan kering (ρ_d)	Kg/m ³	1200 – 1800
Berat satuan kering (γ_d)	KN/m ³	12 – 18
Kepadatan butiran (ρ_s)	Kg/m ³	2600 – 2750
	Gram/cm ³	2,6 – 2,75
Berat jenis (Gs)	-	2,6 – 2,75

Istilah	Satuan	Batas – batas nilai
Porositas (n)	-	0,2 – 0,6
Derajat kejenuhan (Sr)	%	0 – 100
Kadar udara (a _v)	%	0 – 20

Sumber : L. D. Wesley (2017)

a. Indeks Propertis Tanah Berbutir Halus

Sifat – sifat fisika dan mekanika tanah berbutir halus dibedakan menjadi empat keadaan yaitu padat, setengah padat, plastis, dan cair tergantung pada kadar air pada tanah tersebut. Secara intuitif dapat dikatakan bahwa dalam fase cair, tanah pada kondisi paling lemah. Sebaliknya pada fase padat, tanah pada kondisi paling kuat. Untuk mengukur kekuatan tanah digunakan indeks cair (I_L) yang diekspresikan pada persamaan :

$$I_L = \left(\frac{w - w_p}{I_p} \right)$$

Dengan :

I_L = indeks cair

w_p = batas plastis

I_p = indeks plasititas

Indeks cair adalah perbandingan antara kadar air dalam keadaan normal dikurangi dengan batas plastisnya dengan indeks plasititasnya. Tabel 2.2. menunjukkan hubungan antara indeks cair dengan kekuatan tanah.

Tabel 2. 2 hubungan antara kekuatan dengan indeks cair

Indeks cair (I_L)	Deskripsi kekuatan tanah
$I_L < 0$	Fase setengah padat – kekuatan tinggi, getas, Nampak ada keretakan.
$0 < I_L < 1$	Fase plastis – kekuatan tanah sedang, tanah mudah terdeformasi, berperilaku seperti tanah plastis.
$I_L > 1$	Faase cair – kekuatan tanah rendah, tanah berperilaku seperti cairan, dapat mengalir pada bidang miring.

Sumber : teknologi perbaikan tanah, 2020

Batas – batas Atterberg sangat tergantung pada kandungan mineral didalam tanah lempung. Untuk lempung *montmorillonite*, batas cair dapat mencapai diatas 100%, karena ikatan diantara lapis silika dan alumina sangat rendah sehingga air dapat dengan mudah terserap pada tanah jenis ini melalui sela antara lempeng – lempeng tersebut. Di lain pihak, lempung *kaolinite* memiliki ikatan yang cukup kuat sehingga air sulit masuk di antara lempeng – lempeng alumina dan silika. Oleh sebab itu, batas – batas Atterberg tanah ini akan lebih rendah dibandingkan pada lempung *illite* dan *montmorillonite*. Tabel 2.3. menunjukkan hubungan antara batas–batas Atterberg dengan jenis tanah.

Tabel 2. 3. batas – batas Atterberg beberapa jenis tanah

Jenis tanah	$W_L\%$	$W_P\%$	$I_p\%$
Pasir	Non plastis	Non plastis	Non plastis
Lanau	30 – 40	20 -25	10 – 15
Lempung	40 – 150	25 -50	15 – 100

Sumber : teknologi perbaikan tanah, 2020

Indeks plasititas tanah dengan mineralogy tertentu berhubungan linear terhadap fraksi lempung, dan aktivitas tanah lempung (A) merupakan perbandingan antara

indeks plasititas dengan fraksi lempung yang terkandung di dalam tanah, sehingga persamaan aktivitas tanah lempung dapat dituliskan sebagai :

$$A = \left(\frac{I_p}{\% \text{ fraksi lempung}} \right)$$

Di mana fraksi lempung adalah ukuran butir yang lebih kecil dari 2 μm (0,002 cm). plastisitas tanah terjadi disebabkan oleh terserapnya air disekitar partikel tanah lempung tergantung pada mineral yang terkandung didalamnya. Mineral *montmorillonite* berkempuan menyerap air cukup tinggi diikuti oleh mineral *illite* dan yang terendah adalah *kaolinite*. Hubungan antara indeks plasititas, aktivitas, dan plasititas mineral – mineral lempung ditunjukkan pada tabel 2.3.

Tabel 2. 4. hubungan antara indeks plasititas, aktivitas, dan plasititas beberapa mineral lempung

Mineral	Batas Plastis (LL)	Batas Plastis (PL)	Indeks Plasititas (PI)	Aktivitas	keterangan
Kaolinite	35 – 100	20 – 40	15 – 60	0,3 – 0,5	Plasitas
Illite	60 – 120	35 – 60	25 – 60	0,5 – 1,2	tinggi
Montmorillonite	100 – 900	50 – 100	50 – 800	1,5 – 7,0	Plasitas tinggi
Holloysite (terhidrasi)	50 – 70	40 – 60	10	0,1 – 0,2	Plastisitas sangat tinggi
Hooloysite (taktehidasi)	40 – 55	30 -45	5 – 10	0,4 – 0,6	Plastisitas sedang
Attapulgate	150 – 250	100 – 125	25 – 125	0,4 – 1,3	Plastisitas rendah
Allophane	200 – 250	120 - 150	80 – 100	0,4 – 1,3	Plastisitas sangat tinggi
					Plastisitas sangat tinggi

Sumber : Teknologi Perbaikan Tanah, 2020

Hubungan antara indeks plastisitas (PI) dengan plastisitas tanah lempung dapat dilihat pada tabel 2.5.

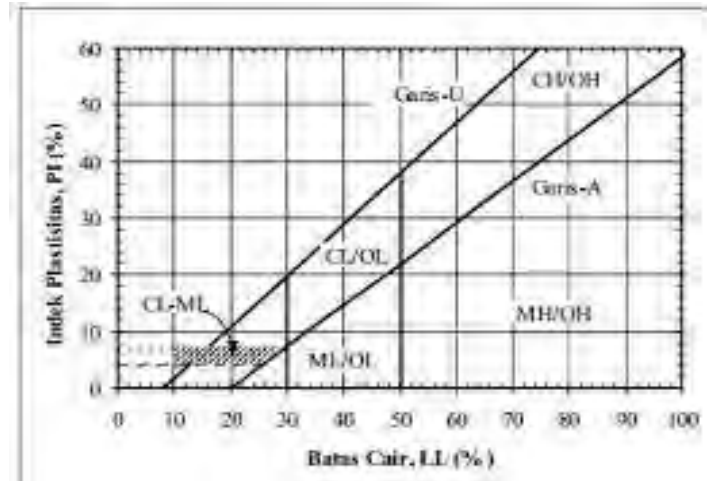
Tabel 2. 5. hubungan antara indeks plastisitas dan plastisitas

Indeks plastisitas (PI)	Keterangan
0	Nonplastis
1 – 5	Plastisitas sangat rendah
5 – 10	Plastisitas rendah
10 – 20	Plastisitas sedang
20 – 40	Plastisitas tinggi
Lebih dari 40	Plastisitas sangat tinggi

Sumber : Teknologi Perbaikan Tanah, 2020

b. Kurva Plastisitas

Batas – batas konsistensi tanah lempung : batas cair dan batas plastis dapat ditentukan dengan cara yang sangat sederhana di laboratorium. Di mana batas plasis dan batas cair tersebut memberikan informasi terkait perilaku tanah kohesif. Hubungan antara indeks plastisitas (IP) dengan batas cair (LL) untuk beberapa jenis tanah digambarkan didalam kurva plastisitas (gambar 2.2). pada kurva tersebut ada 2 buah garis yaitu garis A dan garis U. garis A memisahkan tanah lempung anorganik dengan lanau inorganik dimana lempung inorganik atau organic terletak dibawah garis A. tinggi rendahnya plastisitas dipisahkan oleh garis LL = 50. Tanah disebelah kiri garis A: berplastisitas rendah, sedangkan disebelah kanan garis A berplastisitas tinggi. Tanah yang terletak di atas garis U adalah tanah nonkohesif.



gambar 2. 2. kurva plastisitas
(sumber : Braja M. Das 2010)

c. Permeabilitas

Permeabilitas adalah kemampuan suatu cairan untuk mengalir melalui media porous atau media yang permeabel. Tanah adalah salah satu media porous, oleh sebab itu, setiap media permeabel memiliki koefisien permeabilitas (K) yang tergantung pada : jenis tanah, gradasi tanah, angka pori, dan kepadatan tanah. Berikut adalah gambaran umum tentang beberapa jenis tanah terkait dengan permeabilitasnya.

Lempung homogen adalah tanah yang memiliki permeabilitas rendah yang sering digunakan sebagai bahan bendungan untuk menahan aliran air tanah, untuk dinding pembuangan sampah akhir (*landfills*) agar air tidak tersebar kearea sekitarnya. Pasir bersih dan kerikil sebagai media porous dengan permeabilitas rendah sering di gunakan sebagai drainase atau filter. Tabel 2.5. menunjukkan beberapa koefisien permeabilitas untuk beberapa jenis tanah.

tabel 2. 6. koefisien permeabilitas untuk beberapa jenis tanah

Jenis tanah	K (cm/detik)	Keterangan
Kerikil bersih	$> 1,00$	Permeabilitas tinggi
Pasir bersih	$1,00 - 10^{-3}$	Permeabilitas sedang
Pasir halus, lanau, lempung	$10^{-3} - 10^{-5}$	Permeabilitas rendah
Lempung kaku	$10^{-5} - 10^{-7}$	Permeabilitas sangat rendah
Lempung homogen	$> 10^{-7}$	Kedap air

Sumber : Perbaikan Tanah, 2020

2.2. Jenis – Jenis Tanah

Terminologi yang sering dipakai sampai saat ini seperti : kerikil, pasir, lanau, dan lempung lebih pada untuk mengidentifikasi tekstur khusus di dalam tanah. Tekstur menampilkan penampilan tanah sehingga kerikil dan pasir di golongankan sebagai tanahberbutir kasar (*coarse grained soils*).

2.2.1. Tanah Ekspansif

Tanah ekspansif yang biasanya memiliki kadar lempung tinggi adalah tanah yang memiliki potensi kembang susut tinggi, yang berarti tanah ini akan mengembang jika kadar air tanah naik dan akan menurun jika kadar air turun, dan memiliki kandungan mineral *montmorillonite* cukup tinggi. Mineral ini memiliki luas permukaan luas sehingga mampu menahan air dalam jumlah besar. Mineral lain seperti *illite* juga bersifat ekspansif, namun potensi kembang susutnya lebih rendah sehingga tidak menimbulkan persoalan yang berarti (Nelson dan Miller, 2002). Dan *kaolinite*, tidak bersifat ekspansif. Dua faktor yang mempengaruhi sifat sifat tanah ekspansif, yaitu komposisi tanah dan pengaruh lingkungan.

2.2.2. Tanah Organik

Tanah organik adalah tanah yang sangat lunak yang terbentuk dari mikroorganisme (hewan dan tumbuhan) melalui suatu proses dekomposisi. Pada kondisi tertentu, tanah organik memiliki komposisi mikroorganisme yang berasal dari tanaman yang cukup tinggi dan pada kondisi lain terjadi sebaliknya. Untuk tujuan praktis, bahan – bahan organik dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu : yang diatas permukaan tanah dan dibawah permukaan tanah. Bahan – bahan organik yang diatas permukaan tanah terdiri dari sisa – sisa tumbuhan dan hewan, sedangkan bahan – bahan organik yang dibawah permukaan tanah terdiri dari mikroflora yang sebagian terdekomposisi dari sisa – sisa tumbuhan, dan hewan, serta bahan – bahan humus lainnya.

2.2.3. Tanah Residu

Tanah residu terbentuk secara langsung oleh proses pelapukan fisika maupun kimia dari batuan asalnya. Sementara tanah sedimen terbentuk oleh proses pengendapan dari hasil pelapukan kimia atau fisika ke daratan yang rendah seperti danau, atau laut. Di dalam praktik yang dipertimbangkan pada proses pembentukan tanah endapan adalah tingkat homogenitas dan prediktabilitas yang keduanya tidak ada pada tanah endapan. Faktor – faktor tersebut adalah :

- a. proses pemotongan permukaan tanah yang terjadi pada saat terjadi erosi, transportasi, dan redeposisi cenderung menghasilkan deposit yang *homogeny*.
- b. Faktor sejarah pembebanan (*stress history*) adalah faktor yang sangat terkenal dalam menentukan karakteristik tana sedimen.

Dua hal tersebut tidak ada pada kamus tanah residu. Namun, baik tanah endapan maupun tanah residu tergantung pada dua faktor. Pertama, partikel tanah tersebut seperti : ukuran, bentuk, komposisi mineral, dan yang kedua adalah bagaimana berada pada permukaan tanah. Untuk mudahnya, kedua faktor tersebut adalah komposisi dan struktur tanah. Pada tanah lempung endapan, kelompok lempung *kaolinite* memiliki potensi dan tekanan pengembang kecil, kompresibilitas rendah, indeks plasitisitas rendah, aktivitas sangat tinggi. Sedangkan pada tanah residu, komposisi kandungan mineral tetap merupakan faktor yang cukup penting, namun lebih penting pada riwayat pengembangan.

2.2. Tanah Lunak

Tanah biasanya dibagi menjadi dua golongan yaitu tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus (tanah lunak). Tanah berbutir kasar terdiri atas kerikil dan atau pasir, biasanya disebut bahan granular atau tidak berkohesi. Tanah lunak terdiri atas lanau (*silt*) dan lempung (*clay*) (Mekanika Tanah, Laurence, 2012).

penggunaan istilah “tanah lunak” berkaitan dengan tanah- tanah yang jika tidak dikenali dan diselidiki secara seksama dapat menyebabkan masalah ketidakstabilan dan penurunan jangka panjang yang tidak dapat ditolerir; tanah tersebut mempunyai kuat geser yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi.

Tanah lunak mengandung mineral-mineral lempung dan mengandung kadar air yang tinggi. Umumnya lapisan tanah yang disebut lapisan yang lunak adalah lempung (*clay*) atau lanau (*silt*) dan sering disebut tidak berkohes. Dan mempunyai harga pengujian penetrasi standar (*standard*

penetration test) N yang lebih kecil dari 4 atau tanah organis seperti gambut yang mempunyai kadar air alamiah yang sangat tinggi. Demikian pula lapisan tanah berpasir yang dalam keadaan lepas mempunyai harga N kurang dari 10, Tanah lunak merupakan tanah kohesif yang terdiri dari sebagian besar butir-butir yang sangat kecil seperti lempung atau lanau.

a. Kerikil dan pasir

Kelompok ini terdiri atas pecahan batu – batuan dengan bentuk dan ukuran yang beraneka ragam. Butiran kerikil biasanya terdiri atas pecahan – pecahan batu, tetapi kadang – kadang juga terdiri mineral – mineral tunggal. Pada beberapa keadaan, pasir hanya terdiri atas butiran – butiran yang seukuran, sehingga disebut pasir seragam. Ada kalanya terdapat bahan yang besarnya terdiri atas ukuran batu – batuan hingga pasir dan disebut tanah bergradasi baik.

Untuk ukuran batas - batas gradasi tanah dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2. 7. batas – batas ukuran gradasi tanah

Kerikil	Tanah berbutir kasar (mm)			Tanah berbutir halus	
	Kasar	Pasir	Halus	Lanau	lempung
60	2	0,6	0,06		0,002

Sumber : Laurence D. Wesley (2012)

b. Lempung (*clays*)

Lempung terdiri atas butiran yang sangat kecil dan memiliki sifat kohesi dan plastisitas. Sifat – sifat ini tidak ditemukan pada pasir dan kerikil. Sifat kohesi berarti butiran - butirannya saling menempel, sedangkan plastisitas adalah sifat yang memungkinkan tanah dapat berubah bentuk tanpa mengubah

volume dan tidak menyebabkan retak atau pecah.

c. Lanau (*slit*)

Lanau adalah bahan yang merupakan peralihan antara lempung dan pasir. Lanau bersifat kurang plastis dibanding lempung (*clay*) (lanau asli sebenarnya tidak memiliki sifat plastis). Lanau (*slit*) memiliki permeabilitas yang lebih tinggi. Lanau juga menunjukkan sifat – sifat khusus, yaitu *quick behavior* dan dilatasi yang tidak ditemukan pada lempung. *quick behavior* menunjukkan kecenderungan lanau untuk menjadi cair ketika digetarkan, dan dilatasi merupakan kecenderungan untuk mengalami penambahan volume ketika berubah bentuk.

2.2.1. Sifat – Sifat Tanah Lunak

Sifat-sifat tanah lunak adalah memiliki gaya geser yang kecil, kemampuan besar, koefisien permeabilitas yang kecil dan mempunyai daya dukung rendah. Bilamana pembebanan konstruksi melampaui daya dukung kritis, maka akan terjadi kerusakan tanah pondasi. Meskipun intensitas beban itu kurang dari daya dukung kritis, dalam jangka waktu yang lama besarnya penurunan akan meningkat yang akhirnya akan mengakibatkan berbagai kesulitan. Sifat-sifat seperti ini menjadikan tanah lunak sebagai tanah yang kurang menguntungkan untuk dijadikan sebagai lapisan tanah dasar.

Tanah lunak memiliki kadar air yang tinggi. Kadar air tanah lempung bervariasi tergantung pada kenaikan dari tingkat plastisitas lempung dan struktur tanah lempung. Semakin rendah kadar air maka daya dukung tanah semakin besar. Dengan demikian, salah satu cara untuk menstabilisasi tanah

lunak adalah mengeluarkan air pori dari dalam tanah tersebut.

Berdasarkan uji lapangan, tanah lunak secara fisik dapat diremas dengan mudah oleh jari-jari tangan. nilai hasil pengujian di lapangan dan di laboratorium, akan menunjukkan bahwa tanah tersebut lunak apabila: koefisien rembesan (k) sangat rendah ≤ 0.0000001 cm/dtk, batas cair (LL) $\geq 50\%$, angka pori (e) antara 2,5 – 3,2, kadar air dalam keadaan jenuh antara 90% – 120%.

Sifat yang paling penting pada tanah lunak adalah kekuatan dan konsistensinya. Tabel 2.2. merupakan istilah yang digunakan hal tersebut, bersamaan dengan sifat pertunjuknya (Braja M. Das). Panduan istilah untuk menunjukan kekuatannya bersamaan dengan sifat petunjuknya dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2. 8. panduan untuk kuat geser tak terdrainase dari tanah berkohesi

Kuat geser tak terdrainase (kPa)	Istilah	Ciri – ciri
< 12	Sangat lunak	Mudah keluar diantara jari ketika diremas
12 – 15	Lunak	Sulit keluar diantara jari – jari ketika diremas
20 – 50	Agak kaku	Dapat ditekan oleh ibu jari dengan sedikit usaha
50 – 100	Kaku	Dapat ditekan masuk dengan tekaan ibu jari
100 – 200	Sangat kaku	Dapat ditekan masuk dengan kuku ibu jari
200 – 500	Keras	Sulit ditekan masuk dengan kuku

Sumber : mekanika tanah oleh L. D. Wesley (2017)

2.2.2. Tipe Tanah Lunak

Beberapa organisasi telah mengembangkan batasan-batasan ukuran golongan jenis tanah. Pada saat sekarang, sistem Unified Soil Classification System (USCS) telah diterima diseluruh dunia. Batasan – batasan ukuran golongan jenis tanah menurut beberapa organisasi tercantum dalam tabel 2.4.

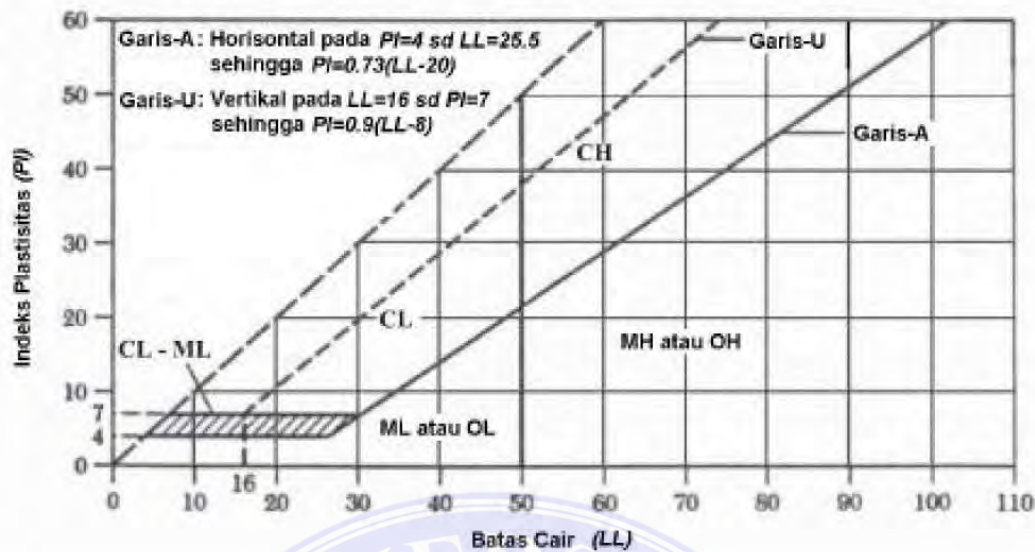
Tabel 2. 9. batasan – batasan ukuran golongan tanah

Nama golongan	Ukuran butiran			
	Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung
Massachusetts Institute Of Technology (MIT)	>2	2 -0,06	0,06 – 0,002	< 0,002
U.S. Departement Of Agriculture (USDA)	>2	2 -0,05	0,05 – 0,002	< 0,002
American Association Of State Highway And Transportation Officials (AASHTO)	76,2 – 2	2 – 0,075	0,075 – 0,002	< 0,002
Unified Soil Classification System (USCS)	76,2 – 4,75	4,75–0,075	Halus (yaitu lanau dan lempung) < 0,0075	

(sumber : Braja M. Das, 2010).

a. Tanah Anorganik Berbutir Halus

Klasifikasi tanah inorganik dan tanah organik yang berbutir halus mengikuti sistem yang digunakan dalam sistem USCS untuk tanah berbutir halus, dimana tanah berbutir halus dibagi dalam sub kelompok sebagai lanau (M) dan lempung (C). Lanau adalah tanah berbutir halus yang memiliki nilai Batas Cair dan Indeks Plastisitas yang jika digambarkan ke dalam diagram . akan terletak di bawah garis-A, sementara untuk lempung akan berada di atas garis tersebut. Diagram ini dipelihatkan pada gambar 2.2.



Gambar 2. 3. diagram batas –batas Atterberg untuk tanah organik dan inorganik (sumber : L. D. Wesley, 2017)

Tanah jenis ini mengandung mineral lempung dan mengandung kadar air yang tinggi, yang menyebabkan kuat geser yang rendah. Dalam rekayasa geoteknik istilah ‘lunak’ dan ‘sangat lunak’ khusus didefinisikan untuk lempung dengan kuat geser seperti ditunjukkan pada Tabel 2.3.

b. Tanah Organik

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

c. Tanah Gambut

Gambut (PF) adalah jenis tanah yang memiliki kadar organik lebih dari 75%. Berdasarkan kandungan seratnya, gambut dikelompokkan kembali menjadi dua kelompok, dapat dilihat pada tabel 2.5.:

Tabel 2. 10. Klasifikasi tanah gambut berdasarkan kadar serat

Serat	Kelompok Gambut
< 20%	Amorf
> 20%	Berserat (Fibros)

(Sumber : geograph 88. Blogspot. Com)

2.3. Permasalahan Yang Timbul Pada Tanah Lunak

Dalam perencanaan konstruksi bangunan sipil sering dijumpai permasalahan pada jenis tanah lunak, antara lain daya dukung tanah yang rendah dan penurunan (*settlement*) yang besar jika diberi beban. Hal ini disebabkan karena tanah lunak umumnya memiliki kuat geser dan permeabilitas yang rendah serta kompresibilitas yang besar.

Pada perencanaan pembangunan jalan, salah satu hal yang harus diperhatikan adalah elevasi desain perkerasannya. Untuk mencapai elevasi desain perkerasan, maka lapisan tanah dasar pada lokasi proyek harus ditimbun atau digali. Pada daerah yang terindikasi sebagai tanah lunak, tanah asli harus ditimbun untuk mencapai elevasi desain. Tinggi timbunan tersebut masih harus ditambah lagi dengan timbunan untuk mengakomodasi beban perkerasan dan beban lalu lintas. Lokasi eksisting pembangunan Jalan tol Tebing Tinggi - Inderapura merupakan tanah lunak yang sangat kompresibel, maka ada hal-hal yang harus diperhatikan dalam pembangunannya, seperti:

a. Daya Dukung Tanah Yang Rendah

Daya dukung tanah adalah kemampuan tanah untuk menahan beban pondasi tanpa mengalami keruntuhan akibat geser yang juga ditentukan oleh kekuatan geser tanah. Daya dukung tanah merupakan unsur utama dalam pembangunan konstruksi jalan. Dalam perencanaan konstruksi jalan, daya dukung tanah mempunyai peranan yang sangat penting.

Tanah sebagai tempat berdirinya suatu konstruksi harus mampu menerima dan menahan beban-beban yang bekerja di atasnya. Oleh karena itu, sebelum dilaksanakan pekerjaan pembangunan harus diketahui terlebih dahulu daya dukung tanah dasar. Semakin rendah kadar air maka daya dukung semakin besar.

Daya dukung tanah yang rendah akan mengganggu stabilitas dari timbunan. Hal ini menyebabkan tinggi timbunan yang dapat dilakukan akan sangat terbatas, sehingga untuk timbunan yang tinggi perlu dilakukan secara bertahap (*stage construction*) atau diberikan perkuatan, antara lain dengan menggunakan *berm* (Fanny Rumintha, 2017).

b. Penurunan Yang Besar

Penurunan pada tanah dasar akan terjadi apabila tanah dasar tersebut menerima beban di atasnya. Penurunan tanah dapat menyebabkan muka jalan turun menjadi lebih rendah daripada elevasi rencana (tinggi bebas tertentu di atas muka air banjir tertinggi dari lahan sekitar jalan).

Penurunan konsolidasi dari tanah lunak adalah cukup besar dan akan memakan waktu yang lama. Apabila proses konsolidasi ini tidak dipercepat, maka pembangunan struktur di atasnya harus menunggu waktu yang cukup lama untuk dapat dimulai. tanah lunak, dimana kegagalan geoteknik dapat terjadi pada timbunan maupun galian. Masalah kelongsoran terjadi karena kurang baiknya perhatian dan kontrol, baik pada saat perencanaan, pelaksanaan dan masa pemakaian. Dimana akibat daya dukung tanah yang rendah dari tanah lunak di bawah timbunan dapat mengakibatkan terjadinya *sliding* (kelongsoran) pada tanah timbunannya. Sedangkan penurunan (*settlement*) terjadi akibat proses deformasi

pada lapisan tanah akibat beban yang bekerja di atasnya. Jika keadaan tanah dasar yang demikian bila tidak ditangani dengan baik akan mempengaruhi kondisi badan jalan di atasnya dan akan mempercepat kerusakan jalan tersebut. Untuk timbunan badan jalan diperlukan analisis stabilitas dan penurunan sehingga tinggi timbunan yang dikehendaki untuk badan jalan tidak akan mengalami penurunan lagi setelah konstruksi selesai dan kestabilan dari lereng timbunan dapat terpenuhi.

Tanah dasar yang mengalami perubahan bentuk, baik akibat beban lalu lintas maupun cuaca, akan mengakibatkan perkerasan mengalami kerusakan seperti bergelombang, alur dan terjadi penurunan. Teori konsolidasi Terzaghi banyak digunakan dalam memperkirakan penurunan jangka panjang pada timbunan yang dibangun di atas tanah lunak. Apabila besarnya penurunan konsolidasi melebihi kriteria yang ditetapkan, maka kemungkinan stabilisasi dangkal dibutuhkan untuk mengurangi penurunan tersebut.

Permasalahan lain yang timbul pada konstruksi di atas tanah lunak adalah geseran (*shearing*). Mekanisme hilangnya keseimbangan dapat terjadi pada tanah dengan daya dukung rendah, diakibatkan dari beban berat tanah itu sendiri. Permasalahan lain biasanya berupa tolakan ke atas (*uplift*) yang banyak terjadi pada lapisan lempung (*clay*) dan lanau (*silt*) akibat perbedaan tekanan air dan juga sering terjadinya penurunan permukaan (*settlement*). Hal ini pada umumnya disebabkan oleh beratnya beban yang harus ditanggung oleh tanah lunak. Bila tanpa perbaikan tanah, penurunan tanah berlangsung sangat lambat sehingga lambat laun akan terjadi differential settlement (beda penurunan) yang nyata. Karena beda penurunan ini, perkerasan jalan lebih cepat rusak daripada

umur rencananya (Hary C. H., 2020).

2.4. Perbaikan Tanah

Perbaikan tanah (*ground improvement*) adalah suatu cara untuk memperbaiki sifat – sifat teknis tanah, seperti kuat geser, kekakuan dan permeabilitasnya. Umumnya, perbaikan tanah dilakukan pada tanah yang sifat – sifat mekaniknya tidak memenuhi syarat untuk mendirikan bangunan.

Pada umumnya lapisan tanah lunak terdiri dari lempung (*clay*) atau lanau (*silt*). Masalah yang dihadapi ketika merencanakan suatu konstruksi pada kondisi tanah tersebut adalah daya dukung (*bearing capacity*) dan penurunan (*settlement*). Banyak metode yang dapat digunakan untuk memperbaiki sifat tanah ini, seperti teknik perbaikan tanah secara mekanis (fisis), dengan bahan kimia, dengan bahan perkuatan dan secara hidrolis. Pemilihan metode perbaikan tanah umumnya dilakukan berdasarkan formasi geologi dari lapisan tanah, karakteristik tanah, biaya dan ketersediaan material serta pengalaman. Metode pembebanan awal (*preloading*) pada tanah lunak dengan drainase vertikal (*vertical drain*) merupakan salah satu metode yang paling populer digunakan untuk meningkatkan kekuatan geser tanah. Pada tugas akhir ini, metode perbaikan tanah yang digunakan adalah *prefabricated vertical drain* (PVD) pada proyek pembangunna jalan tol Tebing Tinggi – Inderapura. Penggunaan drainase vertikal dapat mempercepat konsolidasi dengan cara memberi fasilitas kepada air pori untuk mengalir melalui lintasan-lintasan yang berarah radial pada drainase vertikal tersebut.

Tanah sebagai bahan konstruksi maupun sebagai pondasi selalu dapat diperbaiki kinerjanya, dengan tujuan sebagai berikut (Sembenelli, P., dan Ueshita. K., 1981) :

- a. Mengikatkan kekuatan tanah baik kuat geser maupun kuat tekan tanah.
- b. Mengurangi disipasi tegangan, mengikatkan modulus tegangan regangan (modulus elastis, modulus geser, dan *bulk modulus*).
- c. Mengurangi kompresibilitas tanah dimana pengurangan volume dapat disebabkan oleh pengurangan volume udara maupun kandungan udara oleh beban.
- d. Mengontrol penyusutan dan pengembangan atau mengikatkan stabilitas volume tanah.
- e. Mengontrol permeabilitas, mengurangi tekanan air pori, atau mengikatkan drainase.
- f. Mempertahankan perubahan fisika maupun kimia akibat kondisi – kondisi lingkungan seperti pembekuan, pembasahan, maupun pengeringan.
- g. Mengurangi potensi terjadinya *liquefaction*.
- h. Mengurangi variabilitas natural untuk bahan – bahan tanah maupun tanah sebagai pondasi.

2.4.1. Mengikatkan Kuat Geser Dan Tekan

Kuat geser dan kuat tekan tanah berbutir kasar atau bahan granular lainnya selalu tidak dapat dipisahkan satu sama lain. Semakin tinggi kuat tekan, maka kuat geser tanah tersebut akan meningkat. Oleh sebab itu, tanah berbutir kasar tegangan gesernya akan menjadi nol pada permukaan bebas. Sedangkan

untuk tanah berbutir halus seperti lempung dan lanau, kuat gesernya tidak banyak dipengaruhi oleh kuat tekanya. Kuat geser tanah ini hanya bergantung pada kohesinya. Semakin tanah lempung, semakin besar kuat gesernya. Secara umum, kuat geser tanah merupakan fungsi dari kuat gesek dalam (μ) dan kohesi (c) tanah tersebut. Jika suatu tanah kohesinya nol, maka kuat gesernya hanya bergantung pada sudut gesek dalam (μ), sebaliknya untuk tanah yang kuat geseknya nol, kuat gesernya hanya bergantung pada kohesinya. Dengan demikian, peningkatan kuat geser tanah dapat dilakukan dengan cara mengikatkan μ saja, meningkatkan nilai c saja, atau meningkatkan μ dan c .

2.4.2. Peningkatan Modulus Elastis, Modulus Geser, Dan *Bulk Modulus*

Peningkatan kuat tekan dan kuat geser tanah berakibat pada peningkatan parameter – parameter modulus tanah, yaitu modulus elastis, modulus geser dan modulus perubahan volume (*bulk modulus*). Pada pengujian *uniaxial* tekan, sebagai contoh pengujian tekan bebas, semakin kaku contoh tanah deformasi (perpendekan) sampel tanah akan menurun pada tegangan tekan yang sama. Demikian halnya pada pengujian geser sederhana (*simple shear*) perubahan sudut kecil pada tanah kaku pada tegangan geser yang sama. Pada pengujian hidrostatis perubahan volume mengecil pada tanah kaku untuk tegangan hidrostatis yang sama.

2.4.3. Mengurangi Kompresibilitas

Tanah yang dipadatkan secara mekanis akan mengalami perubahan volume, oleh karena berkurangnya volume udara didalam rongga antar butir

tersebut, maka berakibat pada tanah yang semakin kompak dan kompresibilitas tanah tersebut mengalami penurunan.

2.4.4. Meningkatkan Stabilitas Volume

Meningkatkan stabilitas volume berarti mengurangi kembang susut tanah. Tanah yang memiliki kembang susut tinggi biasanya tanah yang mengandung mineral *montmorillotine* yang tinggi. Mineral ini sangat aktif dengan permukaan luas dan mampu menampung air dalam jumlah besar. Struktur butir *montmorillotin* terdiri atas satu lapisan alumina diantara dua lapis silica. struktur ini sama dengan struktur butir *illite*, namun ikatannya sangat lemah.

Untuk mengidentifikasi mineral – mineral tanah lempung perlu dilakukan pengujian difraksi sinar x (XRD). Diamping itu, untuk diagnosi awal mengenai ekspansivitas tanah lempung dapat dilihat dari indeks plasititasnya. Menurut Chen, tanah lempung yang memiliki $IP > 35\%$ dapat diindikasikan sebagai tanah lempungekspansif. Menurutnya juga, jika fraksi halus pada suatu sampel tanah $> 65\%$ tanah tersebut juga dapat diindikasikan sebagai tanah ekspansif.

2.4.5. Mereduksi Bahaya *Liquefaction*

Terminologi *liquefaction* adalah kejadian yang sangat penting, menarik, dan kompleks pada pembicaraan gempa dan geoteknik. *Liquefaction* ini mulai dibahas oleh para ahli geoteknik sejak tahun 1964, dimana terjadi gempa di Alaska dengan besaran gempa 9,2 dan diikuti oleh gempa di Nigita, Jepang tiga bulan kemudian dengan magnitudo 7,5. Kedua gempa tersebut menunjukkan kerusakan infrastruktur yang luar biasa, seperti tenggelamnya bangunan gedung,

keruntuhan jembatan, kelongsoran dinding, atau terapungnya bangunan – bangunan bawah tanah.

Secara visual, peristiwa *liquefaction* tampak dipermukaan adanya pendidihan tanah pasir (*sand boil*), atau munculnya lumpur pasir dipermukaan tanah, atau ditunjukkan adanya rembesan air melalui rekahan tanah . dalam bentuk yang lebih dramatis sering ditunjukkan oleh tenggelamnya struktur bangunan dari permukaan tanah serta turunnya tanah yang cukup besar. Bangunan yang tenggelam tersebut akan miring, amblas, atau bergerak kesamping yang pada akhirnya bangunn runtuh bersamaan hilangnya kuat gser tanah seperti yan telah dibahas sebelumnya. Investigasi dan eksplorasi tanah di kedua lokasi tesebut menunjukkan bahwa tanah berupa pasir seragam dengan diameter antara 0,20 – 0,40 mm. nilai N– SPT kurang dari 15 (See and Idris, 1971). Oleh sebab itu, perbaikan gradasi tanah pasir dan peningkatan nilai N – SPT perlu dilakuka untuk mengurangi terjadinya *liguifaction*

2.5. Tanah Yang Memerlukan Perbaikan

Pertimbangan yang matang diperlukan dalam memutuskan tipe – tipe perbaikan tanah yang cocok untuk suatu area proyek tertentu. Evaluasi awal perlu dilakukan terkait dengan persyaratan proyek yang harus dipenuhi, termasuk karakteristik kondisi tanah dan kedalaman muka air tanah ditempat. Untuk proyek baru, dibutuhkan penyelidikan tanah rinci untuk memperoleh informasi yang diperlukan guna memutuskan perlu tidaknya dilakukan perbaikan tanah.

Penyelidikan tanah umumnya dilakukan bertahap, tahap awal untuk memberikan data tanah secara kasar dan kemudian dilakukan tahap

selanjutnyayang lebih detail. Macam – macam kondisi tanah yang perlu dilakukan perbaikan, antara lain:

- a. Tanah – tanah sulit, seperti lempung lunak, ekspansif, tanah yang udah runtuh, lempung sensitif atau lempung dispersif, tanah mengandung bahan organik.
- b. Tanah berpotensi terjadi likuefaksi
- c. Tanah yang berupa lereng berpotensi terganggu stabilitasnya (longsor)
- d. Tanah berkapasitas dukung rendah atau tingkat kemudahan mampatnya tinggi
- e. Tanah berpotensi terjadi erosi, *piping*, dan tekanan air keatas yang tinggi (*uplift*).

Dalam hal suatu proyek dibangun pada tanah – tanah yang bermasalah tersebut, beberapa alternatif penyelesaiannya antara lain:

- a. Pembongkaran dan penggantian
- b. Prapembebanan (*preloading*)
- c. Drainase vertikal (*vertical drain*)
- d. Pemadatan ditempat (*in-situ densifaktion*)
- e. Injeksi (*grouting*)
- f. Stabilitas dengan menggunakan bahan pencampur
- g. Penulangan atau perkuatan (*reinforcement*)

2.6. Pemilihan Tipe Perbaikan Tanah

Faktor – faktor yang memengaruhi metode perbaikan tanah antara lain sebagai berikut:

1. jenis tanah, faktor ini yang paling penting karena akan mengontrol metode yang akan dipilih.

2. Area: kedalaman dan lokasi penenganan yang dibutuhkan. Banyak metode mempunyai keterbatasan kedalaman tanah yang dapat diperbaiki.
3. Sifat tanah yang diinginkan: metode yang berbeda akan menghasilkan sifat tanah setelah diperbaiki berbeda
4. Material tersedia: bergantung pada lokasi proyek dan material yang dibutuhkan untuk setiap metode perbaikan tanah yang dipakai.
5. Tenaga ahli berpengalaman yang tersedia: tenaga ahli sering mempunyai pengetahuan pada metode tertentu dan cenderung memilih metode yang lebih disukai.
6. Kondisi lingkungan: metode perbaikan tanah yang dipilih harus mempertimbangkan dampaknya terhadap lingkungan.
7. Ekonomi: metode perbaikan tanah yang dipilih akhirnya akan mempertimbangkan segi ekonomisnya.

2.7. Drainase Vertikal

pada timbunan badan jalan atau sembarang timbunan untuk bangunan lainnya yang dibangun diatas tanah lunak, problem utamanya adalah bagaimana cara mengatasi penurunan konsolidasi yang berlebihan. Hal ini, karena penurunan konsolidasi berlebihan akan membuat badan timbunan melengkung. Sehingga berakibat rusaknya bangunan yang berada diatas seiring berjalanya waktu. Salah satu cara mengatasi hal ini, penurunan perlu dipercepat sedemikian hingga bila struktur diatas tanah telah selesai dibangun, sisa penurunan konsolidasi sudah kecil atau tidak signifikan lagi. Dengan cara ini, selama masa layan gangguan kerusakan perkerasan jalan akibat penurunan konsolidasi tanah dapat dikurangi atau dihilangkan.

Untuk mempercepat waktu penurunan konsolidasi dapat digunakan drainase geosintetik atau bahan lain yang ditanam didalam tanah menembus tanah lunak. Kolom – kolom drainase vertikal ini memberikan lintasan aliran air pori yang lebih pendek kearah horijontal. Jarak drainase arah horijontal yang lebih pendek menambah kecepatan proses konsolidasi beberapa kali lebih cepat bila dibandingkan didalam tanah tidak dipasang drainase vertikal tersebut. Selain itu, karena pada umumnya permeabilitas tanah kearah horijontal beberapa kali lebih besar juga mempercepat laju proses konsolidasi. Pengaruh lain, dari proses konsolidasi yang dipercepat ini adalah kuat geser tanah juga bertambah dari kondisi tanah awalnya.

Drainase vertikal yang berbentuk drainase pasir, pada awalnya disarankan oleh Moron pada tahun 1925 untuk stabilitas atau perkuatan tanah. Sejak tahun 1926, di Amerika drainase vertikal banyak digunakan untuk percepatan penurunan konsolidasi, terutama untuk pembangunan timbunan jalan. Pada saat itu, drainase vertikal masih berbentuk kolom – kolom pasir yang disebut drainase pasir (*sand drain*). Kjellman pada tahun 1930 mengusulkan drainase vertikal pracetak yang berbentuk pita pipih memanjang yang disebut *prefabricated vertical drain* (PVD). Bahan utama dari PVD ini adalah geosintetik. Keuntungan dari pemakaian PVD dibandingkan dengan drainase pasir adalah dapat memperkecil gangguan tanah yang mengurangi kinerja drainase. Sejak saat itu beberapa peneliti mengusulkan bahan – bahan drainase vertikal yang lain, seperti Wager (1971) menyarankan penggunaan *wick drain* dengan menggunakan inti dari *cardboard* . setelah itu, beberapa bentuk drainase vertikal pracetak mulai dibuat.

Drainase vertikal yang dibuat dari bahan sintetik lebih menguntungkan dibandingkan dengan drainase pasir vertikal, karena sifatnya yang lebih fleksibel dan mempunyai kemampuan filtrasi yang baik.

Ukuran PVD hanya sekitar 100 – 300 mm dengan tebal tipikal hanya sekitar 3 – 6 mm saja. Oleh karena berdimensi sangat kecil, maka dalam pemasangan dibutuhkan alat mandrel untuk melindungi PVD dari kemungkinan sobek atau putus ketika dipenetrasikan ke dalam tanah. Zona tanah yang terganggu akibat proses penetrasi PVD bergantung pada ukuran dan bentuk tampang melintang mandrel, tapi umumnya derajat gangguannya lebih kecil dibandingkan dengan gangguan pada pemasangan drainase vertikal.

2.8. Cara Kerja Drainase Vertikal

Perbaikan tanah lunak dengan menggunakan drainase vertikal cocok digunakan pada tanah mudah mampat, jenuh air, seperti lempung dan tanah – tanah berbutir halus lainnya. Ciri – ciri tanah mudah mampat ini adalah mempunyai angka pori dan kadar air tinggi. Nilai – nilai angka pori tanah (e) lempung lunak tersebut bisa sangat besar dan dapat mencapai 3.

Karena angka pori yang besar (rongga pori besar), maka apabila dibebani dengan beban yang berat akan menyebabkan pemampatan atau penurunan konsolidasi tanah yang besar pula. Pada awal pembebanan atau waktu jangka pendek, seluruh beban akan dilawan oleh tekanan air pori di dalam rongga pori tanah, sehingga tekanan air pori bertambah sesuai dengan besarnya beban tersebut. Dengan berjalannya waktu, air di dalam rongga pori lempung secara perlahan – lahan mengalir menuju ke lapisan lolos air terdekat. Aliran air meninggalkan

rongga pori lempung ini diikuti oleh mampatnya tanah, penurunan yang terjadi disebut dengan penurunan konsolidasi. Karena permeabilitas tanah lempung yang sangat rendah penurunan ini berlangsung lama, terutama bila lapisan lempung lunaknya sangat tebal.

Untuk mempercepat proses pemampatan tanah atau penurunan konsolidasi dibutuhkan jarak aliran air yang lebih pendek, yaitu dengan cara pemasangan kolom - kolom drainase vertikal. Dengan drainase vertikal tersebut, lintasan drainase air pori menjadi lebih pendek pada saat terjadinya konsolidasi.

Umumnya, perbaikan tanah dengan drainase vertikal diaplikasikan pada kondisi – kondisi sebagai berikut :

1. Lapisan tanah yang berkomprebilitas sedang sampai tinggi yang mendukung beban relative besar. Tanah dengan sifat – sifat seperti itu, umumnya berupa tanah berbutir halus kohesif (lempung atau lanau), lapisan lebih sedikit organik atau anorganik.
2. Lapisan tanah yang lambat sifat drainase alaminya, akibat rendahnya permeabilitas tanah dan tebal lapisan lempung yang sangat tebal, sehingga jarak drainase alami atau lintasan airnya panjang.

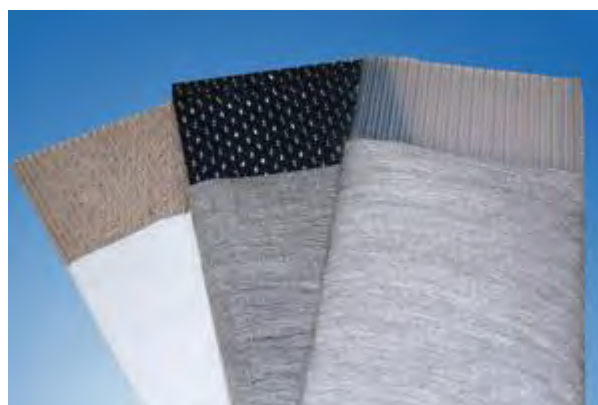
Drainase vertikal tidak cocok untuk tanah – tanah lolos air atau tanah *granular* (pasir, kerikil). Drainase vertikal juga tidak cocok diaplikasikan pada tanah yang mengalami konsolidasi sekunder yang tinggi, seperti lempung yang berplastisitas tinggi dan gambut (peat). Keuntungan yang lain dari aplikasi drainase vertikal pada proyek jalan raya adalah sejalan dengan bertambahnya proses konsolidasi, kepadatan dan kuat geser tanah juga bertambah lebih cepat.

2.8.1. Prefabricated Vertical Drain (PVD)

Prefabricated vertical drains (PVD) adalah lembaran plastik untuk drainase vertical yang panjang dan berkantung yang merupakan kombinasi bahan inti (core) *polypropylene* berkekuatan mekanik tinggi dan dibungkus oleh bahan geotekstil atau pita yang vertical yang berbahan sintetis yang ditanamkan menggunakan crawler crane (alat pemasang PVD) kedalam tanah lunak yang kemudian pita berfungsi menyerap air dan udara kedalam tanah sampai keluar kepermukaan tanah.



Gambar 2. 4 . PVD setelah dikeluarkan dari kemasan
(sumber : lapangan, 2020)



Gambar 2.4. *prefabricated vertical drain*
(sumber : ptgsi. Com)

Vertical drain berfungsi untuk mempercepat waktu pemampatan konsolidasi primer pada lapisan tanah lempung compressible. Hal ini dikarenakan pemampatan konsolidasi yang terjadi pada tanah lempung berlangsung sangat lambat. Dengan adanya vertical drain maka air pori tanah tidak hanya mengalir keluar ke arah vertikal saja, tetapi juga ke arah horizontal. . Metode ini digunakan saat penimbunan bertahap dan untuk mengurangi waktu yang diperlukan untuk mencapai derajat konsolidasi rencana.

Vertical drain dapat berupa kolom pasir (sand drain) atau pre-fabricated vertical drain (PVD). PVD terbuat dari bahan geosintetik yang diproduksi di pabrik. Bahan ini dapat mengalirkan air dengan baik, namun masa efektif kerja bahan ini hanya 6 bulan. PVD lebih umum dipakai di lapangan dibandingkan dengan kolom pasir karena kolom pasir pemasangannya jauh lebih rumit dan juga lebih mahal. Kedalaman *vertical drain* adalah sepanjang lapisan tanah yang mengalami konsolidasi. *Vertical drain* dipasang sepanjang lapisan tanah *compressible* ($N-SPT < 10$) atau sedalam lapisan tanah yang masih mengalami pengaruh akibat distribusi tegangan dari beban di atasnya.

Dalam SNI 8460 : 2017 tentang persyaratan perancangan geoteknik, menetapkan prinsip – prinsip perancangan perbaikan tanah lunak berpemeabilitas rendah, berkompreabilitas tinggi dengan menggunakan prefabricated vertical drain (PVD) yang dikombinasikan dengan prapembebanan (*preloading*) berupa tanah timbunan.

PVD dapat digunakan pada pembangunan/pekerjaan didarat atau dilaut untuk tujuan sebagai berikut :

- Mengurangi besaran penurunan setelah pembangunan
- Mempercepat proses konsolidasi dengan mengurangi panjang lintasan disipasi air pori berlebih
- Meningkatkan stabilitas (dengan mengikatkan tegangan efektif pada tanah)
- Mengurangi/imitigasi efek likuifaksi

Setiap tujuan diatas akan memperbaiki kondisi tanah secara keseluruhan, beberapa contoh aplikasinya adalah sebagai berikut :

- Timbunan jalan dan jalan kereta api
- Pembangunan dan perkuatan tanggul – tanggul
- Konstruksi lepas pantai dan dekat pantai
- Reklamasi
- Pelabuhan dan lapangan terbang

2.8.2 Penyelidikan Tanah Untuk Pekerjaan PVD

Jumlah dan jenis penyelidikan tanah yang dikerjakan harus memadai untuk menentukan jenis dan karakteristik tanah setempat. Semua proses penyelidikan tanah harus memenuhi kriteria SNI untuk penyelidikan tanah.

Untuk pekerjaan PVD, laporan penyelidikan tanah harus memenuhi informasi berikut :

- a. Komposisi, sebaran arah lateral, ketebalan dan konsistensi lapisan permukaan, keberadaan dan kondisi akar – akar pohon, kondisi tanah timbunan, ada

tidaknya bongkahan batu, lapisan tanah tersementasi, atau batuan dan lain – lain yang dapat menghambat masuknya mandrel untuk pemasangan PVD.

- b. Letak muka air tanah, variasinya dan kemungkinan keberadaan tekanan artesis.
- c. Ketebalan tanah lunak dan parameter – parameter tanah.

2.8.3. Persyaratan Material PVD

Spesifikasi material PVD yang akan digunakan harus mencatumkan hal – hal sebagai berikut :

- a. Kuat tarik dalam kN.
- b. Perpanjangan (*elengation*) pada gaya tarik maksimum, dalam %.
- c. Kuat tarik filter dalam kN/m.
- d. Kuat tarik dari sambungan, dalam kN/m (bila ada sambungan).
- e. Indeks kecepatan filter (V_{h50}), dalam mm/detik.
- f. Ukuran buka karakteristik filter (O_{90}), dalam μm .
- g. Kapasitas alir (*discharge capacity*), dalam m^3/tahun .
- h. Daya tahan (keawetan, *durability*) dalam tahun.



Gambar 2. 5. Tahapan pemasangan PVD kedalam tanah
(sumber : pgsi.com)

Tahapan pemasangan PVD dengan mesin hidrolik adalah sebagai berikut :

1. *shoe drain* dipasang pada ujung PVD yang keluar dari ujung mandrel, lalu PVD tersebut ditarik dan dilipat dan dimasukkan kedalam mandrel.
2. Kemudian mesin dijalankan dan mandrel akan terdorong kedalam tanah berdama dengan PVD dan *shoe drain*. *Shoe drain* akan menutup lubang pada ujung mandrel sehingga mandrel tidak akan dimasukin oleh tanah.
3. Penusukan dihentikan saat PVD mencapai kedalaman yang diinginkan. Saat itu mandrel ditarik keatas. Akibat adanya *shoe drain* yang berfungsi sebagai jangkar, maka PVD tidak akan tercabut lagi.
4. Mesin akan mengangkat mandrel sehingga PVD terekspos, lalu PVD segera dipotong.
5. Mesin bergerak menuju titik pemasagan baru, dan langkah pekerjaan dimulai dari awal.

Dengan menggunakan PVD, maka proses konsolidasi dapat berjalan lebih cepat.

Ada 2 faktor yang mempengaruhi proses konsolidasi berjalan lebih cepat, yaitu:

1. Jarak PVD

Jarak antar PVD ini 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.

2.8.3. Transformasi Tampang PVD

Ukuran dari PVD yang digunakan pada proyek pembangunan jalan tol Tebing Tinggi – Inderapura adalah 100 mm x 3 mm dengan bentuk penampang persegi panjang. Pada saat 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 π (Hansbo, 1960). Asumsi tersebut didasarkan pada rumusan di bawah ini:

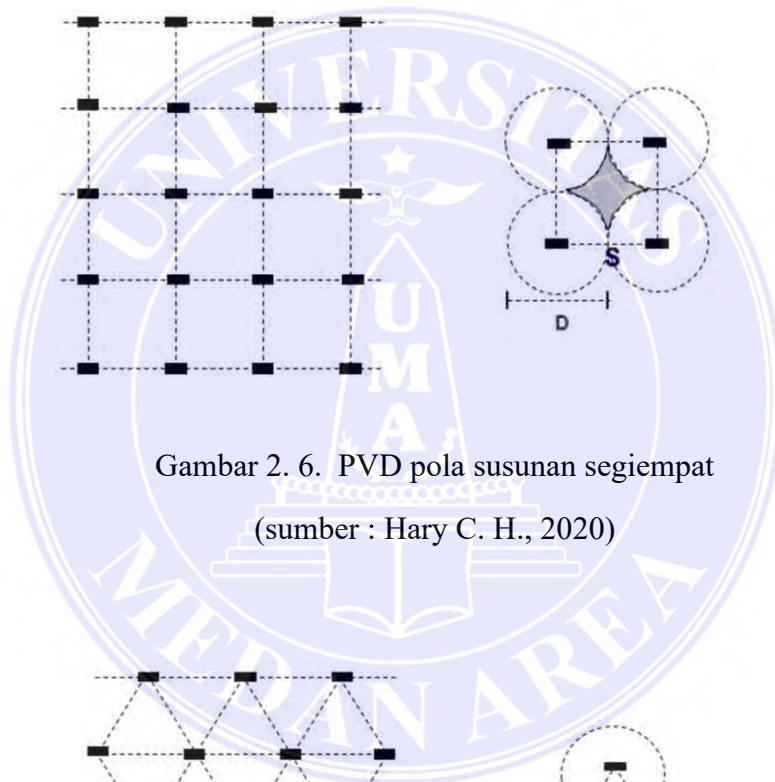
Keliling lingkaran = keliling persegi panjang

$$Nd_w = 2(e + 1) \dots\dots\dots(2.12)$$

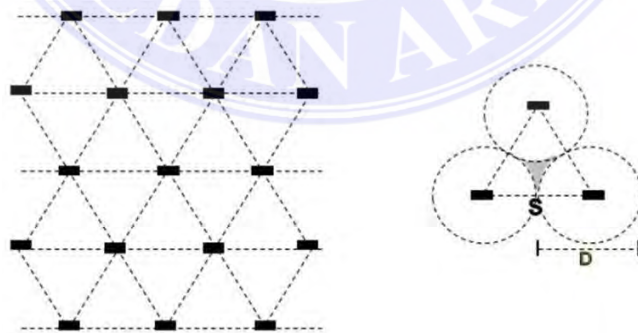
$$dw = 2(a + b) / \pi \dots\dots\dots(2.13)$$

a. Pola pemasangan PVD

Untuk penentuan titik pemasangan PVD, biasanya digunakan pola-pola tertentu untuk memudahkan pelaksanaannya. Pada umumnya, PVD dipasang dengan pola segiempat dan segitiga. Pola pemasangan PVD dapat dilihat pada gambar 2.6 dan 2.7. untuk mengetahui daerah pengaruh kerja PVD, maka dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini:



Gambar 2. 6. PVD pola susunan segiempat
(sumber : Hary C. H., 2020)



Gambar 2. 7. PVD pola susunan segitiga
(Sumber : Hary C. H., 2020)

➤ Untuk pola segiempat

$$R = 0,546 \cdot s \text{ atau } D = 1,13 \cdot S \dots\dots\dots (2.14)$$

➤ Untuk pola segitiga

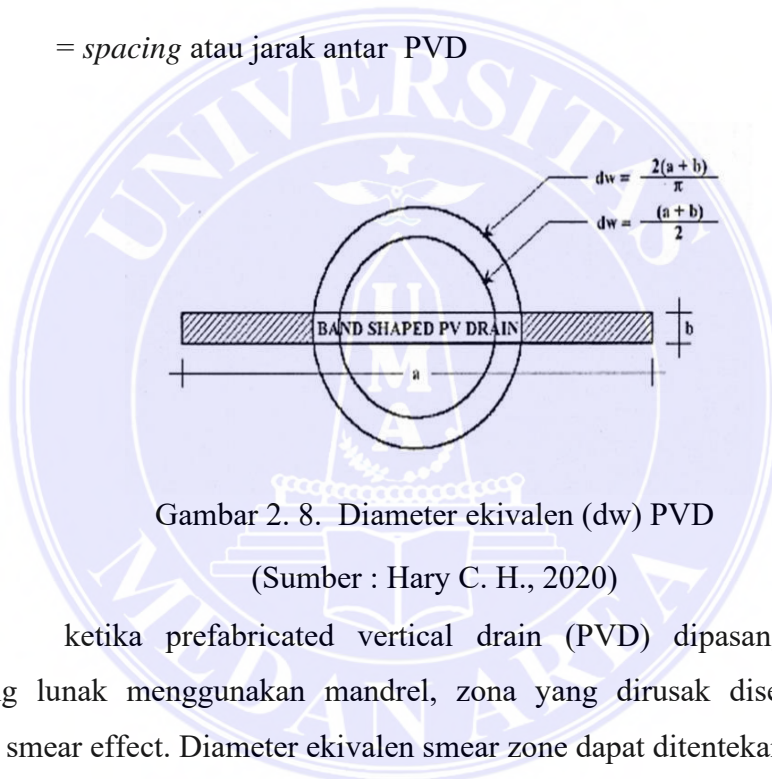
$$R = 0,525 \cdot S \text{ atau } D = 1,05 \cdot S \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana :

R = jari – jari (m)

D = diameter jangkauan kerja PVD (m)

S = spacing atau jarak antar PVD



Gambar 2. 8. Diameter ekivalen (dw) PVD
(Sumber : Hary C. H., 2020)

ketika prefabricated vertical drain (PVD) dipasang pada tanah lempung lunak menggunakan mandrel, zona yang rusak disekitar mandrel disebut smear effect. Diameter ekivalen smear zone dapat ditentukan dari diameter ekivalen PVD. dengan koefisien pengali yang ditentukan dari persamaan berikut :

$$ds = (1,5 \text{ sampai } 3) Dw$$

Pada umumnya nilai $n > 20$ sehingga dapat dianggap bahwa $1/n = 0$

dan $\left(\frac{n^2}{n^2-1}\right) \approx 1$, sehingga :

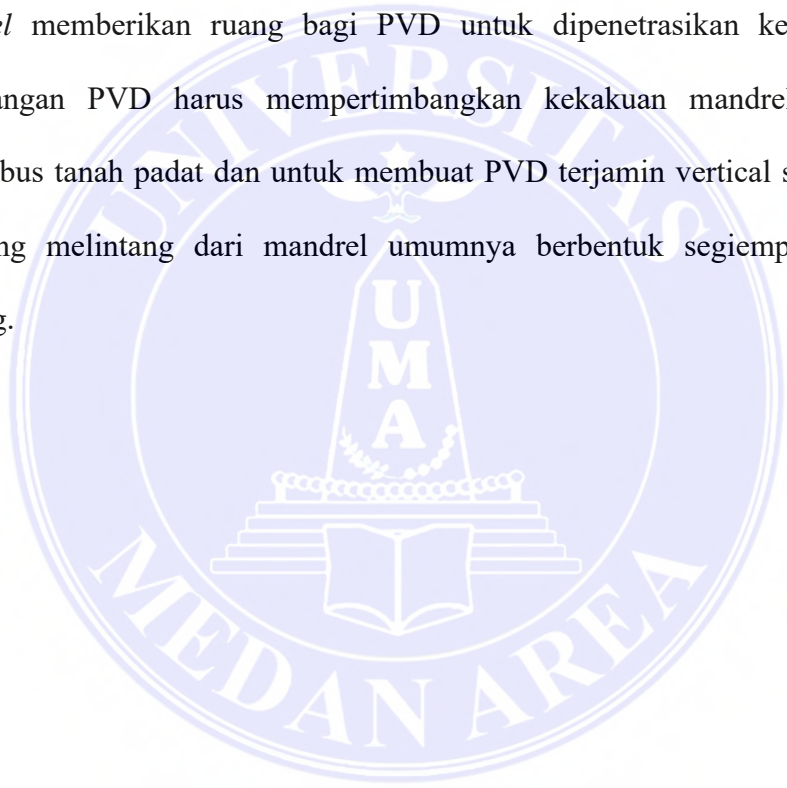
$$F(n) = \left(\frac{n^2}{n^2-1}\right) \ln(n) - \left(\frac{3n^2-1}{4n^2}\right) \dots\dots\dots(2.16)$$

$$\text{Dimana : } n = D/dw \dots\dots\dots(2.17a)$$

$$dw = 2(a + b) / \pi \dots\dots\dots(2.17b)$$

b. Pemasangan PVD

Alat bantu pemasangan PVD disebut *mandrel*, posisi saat pemasangan PVD terhadap *mandrel*, ditunjukkan pada gambar 2.8. *mandrel* melindungi PVD dari renggutan yang dapat merusak PVD pada saat pemasangan. Bagian dalam *mandrel* memberikan ruang bagi PVD untuk dipenetrasikan kedalam tanah. Pemasangan PVD harus mempertimbangkan kekakuan *mandrel* agar dapat menembus tanah padat dan untuk membuat PVD terjamin vertical saat dipasang. Tampang melintang dari *mandrel* umumnya berbentuk segiempat atau jajargenjang.





Gambar 2. 9. Posisi pemasangan PVD terhadap mandrel
(sumber : Lapangan, 2020)

Perpindahan tanah menghasilkan perubahan susunan tanah yang dapat merugikan konsolidasi arah radial. Luas tampang dari banyak mandrel kira – kira 65 cm^2 , atau berkisar antara 32 sampai 129 cm^2 (FHWA, 1986). Mandrel yang tipis lebih baik, tapi mereduksi luas tampang mandrel harus mempertimbangkan kekakuan mandrel untuk dapat menembus tanah padat dan membuat *drainase vertical* tetap vertikal saat dipasang.

Prefabricated drainase vertical (PVD) harus dipasang pada susunan, jarak, dan kedalaman, seperti dalam gambar rencana (FHWA, 1986).

c. Penetrasi *Mandrel*

Dengan alat bantu *crane*, *mandrel* dipenetrasikan kedalam tanah lunak, dengan menggunakan gaya statik dan dinamik. Gaya statik berupa berat *mandrel* dan pemberat yang dipasang diatas *ring*. Kecepatan penetrasi *mandrel* kedalam tanah harus dikontrol untuk menghindari momen atau defleksi yang besar. Penetrasi tanpa henti dengan kecepatan rata – rata yang umumnya berkisar antara 15 sampai 60 cm/detik (Hary C. H., 2020)

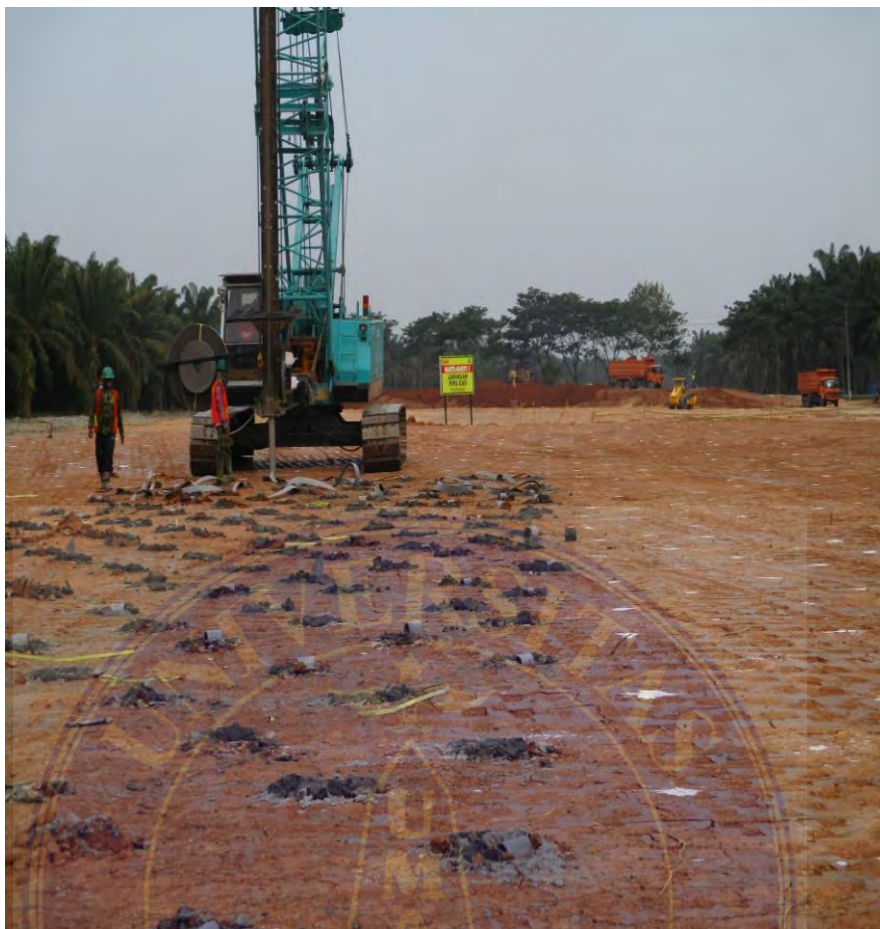
Metode pembebanan yang konstan lebih diutamakan. Pembebanan dengan menggunakan alat vibrator, pemukul jatuh (*drop hammer*), dan pancaran (*jetting*) tidak disarankan, kecuali terpaksa dan hanya sebatas pada daerah kedalaman tertentu yang tidak dapat ditembus oleh metode statis. Dalam metode getaran, getaran diaplikasikan dengan menggunakan alat getar yang sering digunakan dalam pemancangan tiang. Gaya penetrasi yang dibutuhkan umumnya diestimasi dari pengalaman kontraktor pada pemasangan dengan kedalaman penetrasi dan tanah yang sama. Penggunaan gaya tekan dengan alat harus dipertimbangkan secara hati – hati karena dapat mereduksi permeabilitas tanah.

Tanah yang rentan rusak dapat berupa tanah yang sensitif dan tanah yang diselingi dengan lensa – lensa tanah. Pada daerah proyek yang luas kadang – kadang dilakukan percobaan pada berbagai macam alat untuk mengetahui pengaruh gangguan tersebut.

Tipikal urutan pemasangan *drainase vertical* adalah sebagai berikut :

1. Mesin bor yang dilengkapi dengan *mandrel* ditempatkan diatas titik penempatan *drainase vertical*. Ujung gulungan pita PVD dimasukkan kedalam *mandrel*.
2. Angkur dipasang pada ujung pita PVD.
3. *Mandrel* dipenetrasikan kedalam tanah dengan gaya sekitar 50 – 200 kN sampai kedalaman yang dikehendaki.
4. Segera setelah kedalaman *drainase vertical tercapai*, *mandrel* ditarik untuk mencegah tanah lunak tertekan masuk kedalam *mandrel*. Saat ditarik, angkur akan tetap tinggal didalam tanah karena terkunci didalam tanah lempung.
5. Setelah dasar *mandrel* berada dipermukaan, pita *drainase vertical* dipotong dengan memberi panjang ekstra sebesar tebal lapisan drainase (*drainage blanket*).
6. Angkur dipasang pada ujung pita *drainase vertical* yang lain untuk pemasangan selanjutnya.

Dalam melakukan pemasangan *drainase vertical*, kadang – kadang dilakukan pengeboran awal untuk menembus lapisan tanah keras, batu atau material lain yang mengganggu. Pengeboran awal bisa dilakukan melalui semprotan, pengeboran, atau yang lain. Jika stabilitas dari tanah landasan meragukan, berat alat pemasang *drainase vertical* harus dibatasi untuk mengantisipasi kemungkinan terjadinya banyak masalah dalam pelaksanaan. Gambar 2.10. memperlihatkan photo pelaksanaan pemasangan *drainase vertical*.



Gambar 2. 10. photo pelaksanaan pemasangan drainase vertikal, 2020
(sumber : Lapangan)

d. Penyambungan PVD

Pada pemasangan PVD, umumnya akan dilakukan penyambungan pada ujung akhir gulungan untuk menghindari banyak material terbuang. Penyambungan ini dilakukan sebelum PVD dipasang pada mandrel untuk menghindari terhentinya pemasangan pemasangan kedalam tanah. Dalam penyambungan, baik kekuatan maupun karakteristik hidrolis, PVD harus tetap dijaga. Bagian inti dan selimut harus tetap disambung dengan *overlapping* minimum sejauh 15 cm (Hary C.H., 2020).

e. Posisi vertikal

Keberhasilan perbaikan tanah dengan drainase vertikal pracetak PVD bergantung pada posisi pemasangan yang harus betul – betul vertikal. Pemasangan PVD yang tidak vertikal dapat menyebabkan ketidakseragaman dan kecepatan penurunan akibat ketidakaturan jarak drainase vertikal dengan kedalamannya. Umumnya, disyaratkan PVD harus dipasang dengan menggunakan mandrel yang lurus dengan penyimpangan maksimum hanya 6 cm terhadap arah vertikal untuk setiap panjang 300 cm (FHWA, 1986).

f. Angkur

Agar PVD tetap pada tempatnya ketika mandrel ditarik, maka pada ujung bawah PVD harus dipasang angkur. Angkur ini dapat berupa pipa atau batang/pelat dengan bentuk tertentu. Ukuran, bentuk dan kekakuan dari angkur apabila dibandingkan dengan mandrel akan memengaruhi gangguan tanah disekitar mandrel. Ukuran angkur harus sedikit lebih besar dari pada mandrel. Tetapi cukup kecil agar tidak merusak tanah.

g. Lebar Pemasangan PVD

Agar penurunan timbunan relative seragam dibagian tengahnya, drainase vertikal harus dipasang menyebar sampai sedikit diluar area timbunan, Fellenius 2006. Menyarankan drainase vertikal dipasang sejauh $1/3$ sampai $1/2H$ (H = tinggi timbunan). Zona pemasangan drainase vertikal terlalu sempit, menyebabkan waktu penurunan konsolidasi menjadi lebih panjang dan terjadi penurunan tak seragam yang signifikan.

h. Pengaruh Lensa – Lensa Tanah Lolos Air

Lensa – lensa tanah lolos air yang tersebar pada zona pemasangan PVD akan membuat penurunan konsolidasi lebih cepat dari yang diprediksi. Dilapangan, lensa – lensa tanah lolos air (lanau, pasir, pasir berlanau) sering berada pada zona drainase vertikal. Sebelum drainase vertikal dipasang, lapisan –

lapisan ini mungkin tidak menyediakan drainase sehingga tidak memengaruhi proses konsolidasi. Namun, ketika drainase vertikal telah terpasang, lensa – lensa lolos air ini akan berfungsi sebagai lapisan drainase, yaitu air pori yang berada didalam zona lensa tanah lolos air akan terdrainase menuju drainase vertikal yang melewatinya.

Tidak setiap lapisan tanah dapat dipasang drainase vertikal berbentuk pita seperti PVD. Contohnya jika tanah lunak terletak diatas lapisan tanah atau lensa-lensa tanah yang cukup padat atau keras dengan tebal tertentu. Pada kondisi demikian, pemasangan drainase vertikal PVD menjadi sulit, sehingga memerlukan pengeboran awal, penyemrotan atau sebuah pemukul getar. Pemasangan drainase vertikal yang menembus tanah keras tersebut dapat menyebabkan PVD putus atau robek.

i. Pemilihan Kuat Tarik Dan Kapasitas Drainase

Hal lain juga yang perlu diperhatikan adalah kuat Tarik dari inti PVD. Di lapangan, pita drainase dipasang melalui gulungan yang berada dipermukaan tanah, ditarik keatas oleh *ring* melewati roda – roda, dan kemudian dipenetrasikan kedalam tanah melalui bantuan *mandrel*. Bila tidak berhati – hati, pita drainase yang tipis dapat sobek dalam proses pemasangan tersebut. Akibat dari hal ini, inti pita drainase yang berfungsi sebagai pengalir air tidak bekerja karena kerusakan ini tidak dapat diperiksa. Oleh karena itu, pemilihan kuat tarik PVD sangat penting diperhitungkan.

Selain itu, drainase vertikal PVD harus cukup kuat menahan tekanan tanah lateral di sekelilingnya. Pita PVD harus tidak menjadi tertutup lintasan drainasenya akibat tekanan tanah lateral tersebut. Semakin panjang PVD, tekanan tanah efektif semakin besar, karena itu kapasitas pengaliran dari pita PVD harus tetap terjaga dengan tekanan lateral yang besar tersebut.

j. Smear Zone

Pada pemasangan PVD diasumsikan bahwa sifat-sifat tanah sekelilingnya tidak berubah. Tapi pada kenyataannya, pemasangan PVD sedikit mengganggu

(*disturb*) tanah, tergantung pada sensitivitas tanahnya (Rowe, 1968). PVD dimasukkan ke dalam tanah dengan menggunakan *mandrel* dan di ujungnya diberikan sepatu. Akibat pemasangan ini, maka lapisan tanah yang ditusuk *mandrel* akan terganggu. Gangguan yang terjadi tersebut disebut efek *smear*. Efek *smear* adalah berkurangnya nilai koefisien permeabilitas tanah arah radial (k_r) akibat proses peremasan (*remoulding*) selama pemasangan PVD (terutama jika digunakan paksi). Gangguan tersebut tergantung pada ukuran dan bentuk *mandrel*, *soil macrofabric* dan prosedur penginstalannya. Solusi yang mungkin dilakukan adalah dengan memperkecil luas penampang *mandrel*, akan tetapi kekakuan *mandrel* tetap dipertahankan (Hary C.H., 2020, Perbaikan Tanah).

untuk suatu perencanaan diameter *smear zone* dapat diestimasi (2-3) kali diameter *mandrel*. Gambar 2.7. menunjukkan daerah *smear zone*.

$$d_s = (2 - 3) d_m \dots \dots \dots (2.18)$$

$$d_m = \sqrt{\frac{4 \times A_m}{\pi}} \dots \dots \dots (2.19)$$

dimana :

d_s = diameter *smear zone*

d_m = diameter *mandrel*

A_m = luas ukuran *mandrel*

2.8.4. Verifikasi Pemodelan PVD

Koefisien permeabilitas tanah (k) merupakan salah satu parameter yang penting pada analisis konsolidasi yang bisa diperoleh dari pengujian laboratorium

seperti: *falling-head test*, *constant-head test*. Umumnya tanah lempung mempunyai koefisien permeabilitas yang relatif kecil dibanding dengan tanah pasir, sehingga proses konsolidasi pada tanah lempung relatif lebih lama dibanding tanah pasir.

Untuk mempercepat proses konsolidasi, dibuat suatu konstruksi *vertical drain*, yang ditanamkan ke lapisan tanah secara vertikal. Pola penanaman *vertical drain* yang terpasang di lapangan setempat-setempat dengan jarak tertentu, sementara di dalam program elemen hingga fasilitas pengimplementasian *vertical drain* bersifat menerus (*plane strain*). Untuk dapat mengimplementasikan *vertical drain* yang terpasang di lapangan ke dalam program, maka haruslah terlebih dahulu diverifikasi ke dalam bentuk *plane strain* yang akan menghasilkan koefisien permeabilitas tanah (k) yang baru, selanjutnya dengan koefisien permeabilitas tanah yang baru tersebut proses pengsimulasian pada program elemen hingga dapat dilakukan.

proses pengekuivalenan tersebut dapat dilakukan dengan beberapa cara (D.Russell, C.C Hird, dan I.C Pyrah), yaitu:

1. Jarak antar *vertical drain* pada kondisi *plane strain* dapat diubah (perubahan geometri), dengan permeabilitas yang dibuat tetap pada kondisi *axisymmetry* dan *plane strain* ($k_{ax} = k_{pl}$).
2. Permeabilitas pada kondisi *plane strain* dapat diubah, dengan geometri yang dibuat sama.
3. Mengkombinasikan perubahan geometri dan permeabilitas.

mengekuivalenkan koefisien permeabilitas tanah dari kondisi *axisymmetry* menjadi *plane strain* dengan cara menyamakan debit air yang masuk

pada kondisi *axisymmetry* dengan kondisi *plane strain* (D. Russell,et.al, 1995).

Pengekuivalenan koefisien permeabilitas (k) dilakukan dengan rumusan sebagai berikut:



$$\frac{2B^2}{3} \times K_{ax} = R^2 \times k_{pl} \left[\ln\left(\frac{n}{s}\right) + \left(\frac{k_{ax}}{k_s}\right) \ln(s) - \left(\frac{3}{4}\right) \right] \dots\dots\dots(2.20)$$

Dimana :

k_{ax} = permeabilitas tanah arah horizontal kondisi *axisymmetry*

k_{pl} = permeabilitas tanah arah horizontal kondisi *plane strain*

k_s = permeabilitas tanah pada daerah *smear zone*

B = $\frac{1}{2}$ dari jarak *vertical drain* untuk kondisi *plane strain*

R = jari – jari ekuivalen kondisi *axisymmetry*

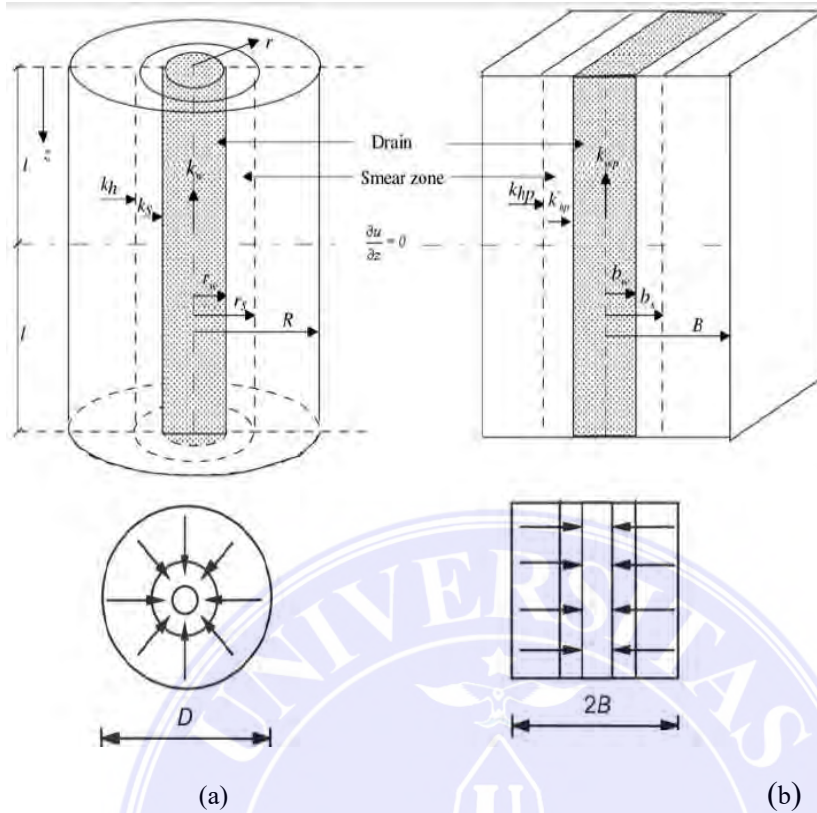
$S = \frac{r_s}{r_w} \dots\dots\dots(2.21)$

$n = \frac{r_e}{r_w} \dots\dots\dots(2.22)$

$r_s = b_s$ = jari – jari *smear zone*

$r_w = b_w$ = jari – jari *vertical drain*





Gambar 2.11. Verifikasi bentuk penampang PVD dalam pemodelan (a) Axisymmetry (b) Plane strain

(Sumber : Hary C. H., 2020, Perbaikan Tanah)

2.9. Alat Alat Pemantau Gerakan Tanah

Dalam pemantauan gerakan penurunan konsolidasi dari waktu ke waktu dibutuhkan alat – alat pemantauan, seperti piezometer (pengukur tekanan air pori) dan pelat penurunan. FHWA (1986) menyarankan peletakan alat – alat pemantau gerakan tanah dalam suatu pekerjaan timbunan dengan menggunakan PVD. Besarnya penurunan konsolidasi total (ultimit) dapat di prediksi dari hasil pengamatan tekanan air pori dari piezometer.

Fungsi masing – masing alat pemantau gerakan tanah adalah sebagai berikut :

- 1) Pelat penurunan (*settlement plate*) digunakan untuk mengukur gerakan penurunan dari waktu ke waktu akibat beban timbunan. Umumnya, pelat

penurunan di buat dari bahan tertentu dan dipasang timbunan,yaitu antara tanah asli dan dasar timbunan. Ukuran pelat berkisar antara 0,9 sampai 1,2 m², dan dapat dibuat dari *plywood* atau baja yang dihubungkan dengan batang baja yang dipasang secara vertikal dengan diameter 19. Elevasi puncak batang baja diukur secara periodik guna mengukur penurunan yang terjadi.

- 2) Plezometer digunakan untuk mengukur perkembangan tekaanan air pori pada tanah pada saat dan setelah pelaksanaan penimbunan. Dari data perkembangan tekanan air pori selama dan setelah pelaksanaan, dapat diperoleh estimasi persen penurunan konsolidasi. Pada setiap tahap pekerjaan urugan timbunan diselesaikan, data tekanan air pori dari piezometer dapat digunakan untuk mengukur kecepatan konsolidasi yang sekaligus dapat digunakan untuk mengestimasi kenaikan kuat geser tanahnya.
- 3) Inklinometer digunakan untuk mengukur gerakan tanah kearah alat ukur (disebut torpedo) dimasukkan dalam pipa lubang bor yang dibuat dikiri dan kanan, didekat kaki lereng timbunan. Untuk mempermudah interpretasi data, ujung bawah pipa lubang inklinometer harus diletakkan pada tanah keras atau batuan. Dalam tanah yang sangat lunak, gerakan lateral (*lateral squeezing*) sering terjadi dengan tanpa diikuti oleh keruntuhan geser tanah.

Pemasangan alat – alat pantau umumnya berjarak sekitar 75 – 150 m dan disepanjang timbunan pada lokasi – lokasi yang dianggap kritis.

2.10. Penurunan (*settlement*)

Penambahan beban di atas suatu permukaan tanah dapat menyebabkan lapisan tanah di bawahnya mengalami pemampatan. Pemampatan tersebut

disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori, dan sebab-sebab lain. Beberapa atau semua faktor tersebut mempunyai hubungan dengan keadaan tanah yang bersangkutan. Secara umum, penurunan (*settlement*) pada tanah yang disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi ke dalam dua 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. Penurunan konsolidasi dibagi menjadi dua, yaitu penurunan konsolidasi primer dan penurunan konsolidasi sekunder.
2. Penurunan segera (*immediate settlement*), yang merupakan akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah, dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air. Perhitungan penurunan segera umumnya didasarkan pada penurunan yang diturunkan dari teori elastisitas.

Bilamana suatu lapisan tanah jenuh air diberi penambahan beban, angka tekanan air pori akan naik secara mendadak. Pada tanah berpasir yang tembus air (*permeable*), air dapat mengalir dengan cepat sehingga pengaliran air pori keluar sebagai akibat dari kenaikan tekanan air pori dapat selesai dengan cepat. Keluarnya air dari dalam pori selalu disertai dengan berkurangnya volume tanah; berkurangnya volume tanah tersebut dapat menyebabkan penurunan lapisan tanah itu. Karena air pori di dalam tanah berpasir dapat mengalir ke luar dengan cepat, maka penurunan segera dan penurunan konsolidasi terjadi secara bersamaan.

Bilamana suatu lapisan tanah lempung jenuh air yang mampumampat (*compressible*) diberi penambahan tegangan, maka penurunan (*settlement*) 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 (yaitu konsolidasi) akan terjadi sesudah penurunan segera. Penurunan konsolidasi tersebut biasanya jauh lebih besar dan lebih lambat dibandingkan dengan penurunan segera.

Besarnya penurunan konsolidasi primer untuk lempung yang terkonsolidasi secara normal (*normally consolidated*) dapat dihitung dengan persamaan:

$$S = \frac{c_c H}{1 + e_0} \log \left(\frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \right) \dots \dots \dots (2.23)$$

Sedangkan untuk lempung yang terlalu terkonsolidasi (*overconsolidated*) besarnya penurunan dihitung dengan persamaan :

- Bila $(p_0 + \Delta p) \leq p_c$ maka :

$$S = \frac{c_s . H}{1 + e_0} . \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \dots \dots \dots (2.24)$$

- Bila $(p_0 + \Delta p) \geq p_c$ maka

$$S = \frac{c_s . H}{1 + e_0} . \log \left(\frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \right) + \frac{c_c . H}{1 + e_0} . \log \left(\frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \right) \dots \dots \dots (2.25)$$

Dimana :

H = tebal lapisan tanah lunak yang memampat (m)

e₀ = angka pori awal (*Initial Void Ratio*)

C_c = indeks pemampatan

(*Compression Index*) C_s = indeks

pemuaian (*Swelling Index*)

Δp = besarnya tegangan di muka tanah (*surchage*)

P_o = tegangan overburden efektif awal (t/m^2)

p_c = tegangan prakonsolidasi efektif (t/m^2)

Ketika tekanan air pori sama dengan nol, penurunan masih terjadi sebagai akibat dari penyesuaian plastis butiran tanah. Tahap konsolidasi ini dinamakan konsolidasi sekunder. Selama konsolidasi sekunder berlangsung, kurva hubungan antara deformasi dan log waktu (t) merupakan garis lurus.

Penurunan yang diakibatkan oleh konsolidasi sekunder sangat penting untuk semua jenis tanah organik dan tanah anorganik yang *compressible*. Untuk lempung anorganik yang terlalu terkonsolidasi, indeks pemampatan sekunder adalah sangat kecil sehingga dapat diabaikan.

Perbandingan pemampatan sekunder terhadap pemampatan primer untuk suatu lapisan tanah dengan ketebalan tertentu adalah tergantung pada perbandingan antara penambahan tegangan (Δp) dengan tegangan efektif awal (p_o). apabila $\frac{\Delta p}{p_o}$ kecil, perbandingan pemampatan sekunder dan primer adalah besar.

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

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

$$C_c = 0,009 (LL - 10) \dots\dots\dots (2.26)$$

- Untuk lempung yang terbentuk kembali (*remolded*)

$$C_c = 0,007 (LL - 10) \dots\dots\dots (2.27)$$

Apabila tidak tersedia data konsolidasi hasil percobaan di laboratorium, Persamaan (2.13) sering digunakan untuk menghitung konsolidasi primer yang terjadi di lapangan.

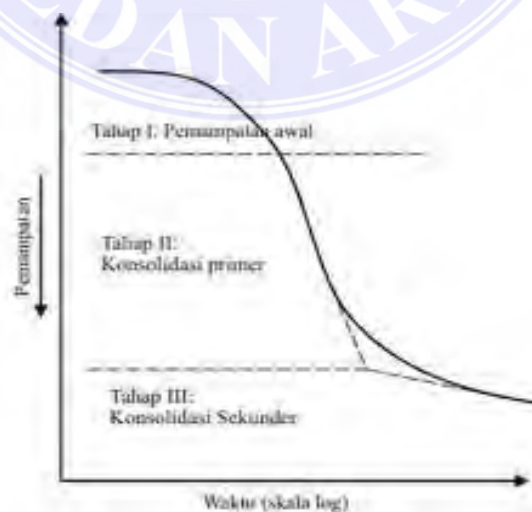
2.11. Konsolidasi

Konsolidasi adalah suatu proses pengecilan volume secara perlahan-lahan pada tanah jenuh sempurna dengan permeabilitas rendah akibat pengaliran sebagian air pori. Proses tersebut berlangsung terus sampai kelebihan tegangan air pori yang disebabkan oleh kenaikan tegangan total telah benar-benar hilang. Jangka waktu terjadinya konsolidasi tergantung pada bagaimana cepatnya tekanan air pori yang berlebih akibat beban bekerja dapat dihilangkan. Karena itu koefisien permeabilitas merupakan faktor penting di samping penentuan berapa jauh jarak air pori yang harus dikeluarkan dari pori-pori yang ukurannya bertambah kecil untuk dapat meniadakan tekanan yang berlebihan (Hary C. H., 2020, Perbaikan Tanah).

Peristiwa konsolidasi umumnya terjadi pada kondisi 3 dimensi, yaitu untuk aliran air dan deformasi (dan regangan) tanah yang terjadi dalam 3 dimensi. Pemakaian kondisi ini umumnya sangat kompleks dan cukup sulit untuk digunakan dalam praktek. Sehingga untuk kondisi praktis umumnya digunakan konsolidasi satu dimensi, dimana kondisi regangan lateral diambil sebesar nol.

2.12. Teori Konsolidasi Satu Dimensi

Salah satu teori yang umum digunakan untuk memprediksi penurunan dan waktu yang dibutuhkan adalah teori konsolidasi satu dimensi yang diperkenalkan oleh Terzaghi, dimana deformasi dan arah aliran hanya terjadi pada satu arah yaitu pada arah vertikal. Prosedur untuk melakukan uji konsolidasi 1-D tersebut tersebut dilakukan di dalam konsolidometer (disebut juga *oedometer*). Skema konsolidometer ditunjukkan dalam Gambar 2.8. Contoh tanah diletakkan di dalam cincin logam dengan dua buah batu berpori diletakkan di atas dan di bawah contoh tanah tersebut, ukuran contoh tanah yang digunakan biasanya adalah diameter 2,5 inchi (63,5 mm) dan tebal 1 inchi (25,4 mm). Pembebanan pada contoh tanah dilakukan dengan cara meletakkan beban pada ujung sebuah balok datar, dan pemampatan (*compression*) contoh tanah diukur dengan menggunakan skala ukur dengan skala micrometer. Contoh tanah selalu direndam air selama percobaan. Tiap-tiap beban biasanya diberikan selama 24 jam. Setelah itu, beban dinaikkan sampai dengan dua kali lipat dari sebelumnya, dan pengukuran pemampatan diteruskan. Pada saat percobaan selesai, berat kering dari contoh tanah ditentukan.



Grafik 2.13. grafik waktu pemampatan selama konsolidasi untuk penambahan

beban yang diberikan

(Sumber : L. D. Wesley, 2017, Mekanika Tanah)

Pada umumnya, bentuk grafik yang menunjukkan hubungan antara pemampatan dan waktu adalah seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.1. dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa ada tiga tahapan yang berbeda yang dapat dijalankan sebagai berikut:

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

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.

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.

Dengan pengetahuan yang didapat dari analisis hasil uji konsolidasi, perhitungan penurunan yang disebabkan oleh konsolidasi primer di lapangan dapat dihitung dengan menganggap bahwa konsolidasi tersebut adalah satu dimensi. Penurunan total akibat konsolidasi primer yang disebabkan oleh adanya penambahan tegangan di atas permukaan tanah dapat dihitung dengan menggunakan Persaman (2.25), (2.26) (2.27).

Terzaghi memperkenalkan teori yang pertama kali mengenai kecepatan konsolidasi satu dimensi untuk tanah lempung yang jenuh air, dengan anggapan-anggapan berikut ini:

1. Tanah (sistem lempung-air) adalah homogeny.

2. Tanah benar-benar jenuh.
3. Kemampumampatan air diabaikan.
4. Kemampumampatan butiran tanah diabaikan.
5. Aliran air hanya satu arah saja (yaitu pada arah pemampatan).
6. Hukum Darcy berlaku

Secara matematis, dasar persamaan diferensial dari teori konsolidasi oleh

Terzaghi adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots (2.28)$$

Dimana :

u = tekanan air pori (kN/m²)

t = waktu peninjauan (detik)

z = kedalaman peninjauan (m)

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

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

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

- Jika $U_v \leq 60\%$, maka:

$$U_v = \frac{\sqrt{\frac{4 T v}{\pi}}}{\left(1 + \left(\frac{4 T v}{\pi}\right)^{2,8}\right)^{0,179}} \dots\dots\dots (2.29)$$

- Jika $U_v > 60\%$

$$U_v = 1 -$$

$$\frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \text{Exp}^{-[\pi^2 (2m+1)^2/4]} T_v \dots\dots\dots(2.30)$$

Dimana : m = bilangan bulat

$$T_v = \text{factor waktu} = \frac{C_v t}{H^2} \dots\dots\dots(2.31)$$

C_v = koefisien konsolidasi arah vertical (cm²/detik)

t = waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi

H = panjang maksimum lintasan drainases (cm)

Variasi derajat konsolidasi rata-rata terhadap faktor waktu yang tak berdimensi, T_v , diberikan dalam Tabel 2.5. yang berlaku untuk keadaan dimana u_0 (tegangan air pori awal) adalah sama untuk seluruh kedalaman lapisan yang mengalami konsolidasi. Harga faktor waktu dan derajat konsolidasi rata-rata yang bersesuaian dengan keadaan yang diberikan dapat dilihat dalam Tabel 2.5.

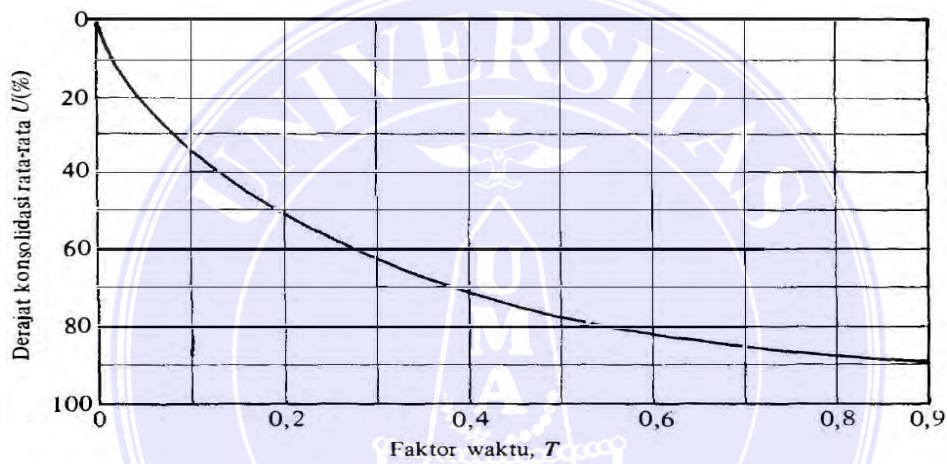
Tabel 2. 11. variasi faktor waktu terhadap derajat konsolidasi

Derajat konsolidasi (U%)	Faktor waktu (T_v)
0	0
10	0.008
20	0.031
30	0.071
40	0.126
50	0.197

60	0.287
70	0.403
80	0.567
90	0.848
100	∞

Sumber : Braja M. Das, 2010

Dengan menggunakan variasi faktor waktu, kita dapat dengan mudah mencari hubungan derajat konsolidasi (U) dan faktor waktu (T_v), seperti yang terlihat pada grafik 2.1.



Grafik 2.14. Variasi derajat konsolidasi rata – rata terhadap factor waktu, T_v (U_v tetap untuk seluruh tebal lapisan)

(Sumber : Braja M. Das, 2010)

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

$$t = \frac{T_v \cdot H_{dr}^2}{C_v} \dots\dots\dots(2.32)$$

Dimana :

C_v = koefisien konsolidasi vertikal (cm²/detik)

T_v = faktor waktu tergantung dari derajat konsolidasi

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

H = panjang aliran yang harus ditempuh air pori selama proses konsolidasi(cm)

2.11.1. Teori Konsolidasi Drainase Vertikal

Teori untuk konsolidasi vertikal drain pertama kali diperkenalkan oleh Barron. Pada dasarnya teori ini adalah lanjutan dari teori konsolidasi satu dimensi. Pada saat melakukan analisa konsolidasi dan keberadaan vertikal drain, Barron membagi kondisi menjadi 2 keadaan, yaitu:

1. Konsolidasi regangan bebas (*free strain*)
2. Kondisi regangan sebanding (*equal strain*)

Dalam regangan bebas (*free strains*), Barron mengasumsikan tidak terjadi *arching* pada tanah yang berakibat pada tidak akan terjadi perbedaan penurunan pada waktu terjadi peristiwa konsolidasi. Metode ini pada awalnya didasari pada asumsi tidak terdapat perbedaan kepadatan tanah akibat penginstalan, sehingga instalasi drainase vertikal dianggap tidak akan mempengaruhi sifat-sifat tanah. Pada perkembangan selanjutnya Barron kemudian mempertimbangkan efek gangguan akibat instalasi yang disebut dengan zona *smear* dimana permeabilitas tanah pada area ini, k_s akan lebih kecil dari permeabilitas horizontal tanah, k_h .

Dalam kondisi regangan sebanding (*equal strain*) mulai

dipertimbangkan adanya gesekan antara *mandrel* dan tanah sehingga terjadi *arching*, dimana dalam analisa area *arching* tersebut Barron mendistribusikan penurunan *arching* menjadi penurunan rata-rata sehingga pada kedalaman tertentu penurunannya dianggap sama.

Dalam kondisi *equal strain*, persamaan diferensial dari teori konsolidasi oleh Barron adalah sebagai berikut :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = Ch \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \dots \dots \dots (2.33)$$

Dimana :

- u = tekanan air pori eksese rata –rata pada titik dan waktu tertentu
- r = jari – jari drainase vertikal
- t = waktu setelah terjadi peningkatan tegangan vertikal total secara tiba-tiba
- Ch = koefisien konsolidasi horizontal (cm²/detik)

Menurut Muller dan Larsson pada jurnal *Aspects on the modelling of smearzones around ertical drain* untuk material tanah jenis lempung homogen maka nilai konsolidasi horizontal (Ch) :

$$Ch = 1,2 \times Cv \dots \dots \dots (2.34)$$

Dengan menggunakan metode Barron (\948), maka untuk menentukan derajat konsolidasi arah radial, U_h digunakan persamaan sebagai berikut :

$$U_h = 1 - e^{-(8Th/F(n))} \dots \dots \dots (2.35)$$

Dimana :

$$Th = \text{factor waktu radial} = \left(\frac{C_h t}{D_e^2} \right) \dots \dots \dots (2.36)$$

Untuk menentukan derajat konsolidasi arah vertical (U_v) gunakan persamaan :

$$U_v = \left(2\sqrt{\frac{T_v}{\pi}}\right) \times 100\% \dots\dots\dots(2.37)$$

Derajat konsolidasi tanah (U) adalah perbandingan penurunan tanah pada waktu tertentu dengan penurunan total. Persamaan derajat konsolidasi pada tanah yang distabilisasi dengan menggunakan sistem PVD menurut Carillo (1942) adalah sebagai berikut:

$$U = 1 - (1 - U_v)(1 - U_h)\% \dots\dots\dots(2.38)$$

Dimana :

U = derajat konsolidasi rata – rata

U_v = derajat konsolidasi vertikal

U_h = derajat konsolidasi horizontal.

2.12 Timbunan Bertahap

Pelaksanaan konstruksi timbunan secara bertahap dilakukan dengan cara menimbun tanah secara bertahap dalam jangka waktu tertentu. Metode ini bertujuan untuk mencegah kegagalan pada tanah dasar dengan cara memampatkan tanah dasar hingga tanah timbunan berikutnya diberikan, sehingga stabilitas tanah dasar dapat ditingkatkan.

Pada saat timbunan yang tinggi dibangun diatas tanah lunak, maka sering pembangunan dilakukan secara bertahap guna menunggu kenaikan kuat geser tanah pondasi dibawah timbunannya. Pada saat pelaksanaan penimbunan, tanah lunak dibawah dasar timbunan akan bergerak secara lateral kearah luar timbunan (disebut perasan lateral atau *lateral squeezing*). Kondisi dapat menimbulkan

ketidakstabilan lereng timbunan dibagian tepi. Dalam hal ditemui masalah ini, penimbunan dilakukan secara bertahap dengan tujuan agar memberikan waktu tanah lunak berkonsolidasi dan memadat sehingga kuat gesernya bertambah. Lama waktu menunggu dipengaruhi oleh kenaikan kuat geser tanah yang harus dicapai agar pembangunan timbunan tidak mengalami kegagalan. Dengan digunakan PVD, lama waktu menunggu kenaikan kuat geser tanah menjadi sangat berkurang, sehingga mempercepat pelaksanaan pekerjaan timbunan.

Bila pembangunan harus dilakukan secara bertahap, selama berlangsungnya pekerjaan timbunan, dibutuhkan pemantauan dan evaluasi kenaikan kuat geser tanah. Untuk hal ini dibutuhkan alat – alat pemantau seperti piezometer, pelat penurunan, dan inclinometer.

2.12.1. Cara Menentukan Tinggi Timbunan Dengan PVD

Tinggi timbunan total (H_t) yang harus dibangun dilapangan adalah jumlah dari tinggi timbunan rencana (H_d) (yang umumnya diukur dari tanah asli) ditambah dengan tinggi timbunan yang tenggelam ketanah pondasi akibat penurunan segera (S_i) dan penurunan konsolidasi (S_c).

Tinggi timbunan final setelah selesainya pembangunan adalah H_d , dengan persamaan sebagai berikut:

$$H_d = H_{sg} + t_p \dots\dots\dots 2.39$$

Dengan,

H_{sg} = tinggi timbunan dari dasar perkerasan atau permukaan tanah dasar
(*subgrade*) Sampai tanah asli

t_p = tebal total lapisan perkerasan diatas tanah dasar (*subgrade*).

Dalam metode perbaikan tanah dengan cara percepatan konsolidasi dengan menggunakan PVD, system perkerasan umumnya dibangun setelah penurunan konsolidasi selesai atau mendekati selesai. Untuk itu, dalam hitungan perancangan PVD, beban perkerasan (q_p), dan beban lalu lintas (q) digantikan beban timbunan ekstra (*surchage*) atau timbunan sementara dengan beban ketanah pondasi dibuat sama. Jika beban perkerasan total adalah q_p , maka tinggi timbunan yang menggantikan beban perkerasan tersebut adalah:

$$H_s = \frac{q_p + q}{\gamma_{ts}} \dots\dots\dots 2.40$$

Dengan,

H_s = tinggi timbunan sementara (m)

γ_{ts} = berat volume tanah timbunan sementara (*surchage*) (kN/m^2)

q_p = beban perkerasan (kN/m^2)

q = beban lalu lintas (kN/m^2)

timbunan sementara hanya berfungsi sebagai pengganti beban perkerasan dan beban lalu lintas dan nantinya akan dibongkar. Setelah timbunan sementara dibongkar, kemudian dibangun lapis perkerasanya. Penambahan beban lapis perkerasan tidak menambah penurunan karena beban ini hanya menggantikan beban ekstra saja.

Beban ekstra yang berupa timbunan sementara umumnya tidak perlu syarat pemadatan yang ketat. Karena itu, umumnya besar volume timbunan sementara (γ_{ts}) lebih berat dari volume permanen (γ_t).

Untuk memperhitungkan adanya penurunan timbunan akibat penurunan segera (S) dan penurunan konsolidasi (S_c) akibat beban timbunan permanen dan sementara, beban perkerasan dan beban lalu lintas, maka kebutuhan tinggi timbunan total adalah:

$$H_t = H_s + H_{sg} + S_{tot} \dots\dots\dots 2.41$$

H_t = tinggi timbunan total yang dibutuhkan (m)

H_{sg} = tinggi timbunan dari dasar perkerasan sampai tanah asli (m)

S_{tot} = penurunan total akibat penurunan segera dan konsolidasi (m)

Dalam menghitung penurunan total (S_{tot}), beban akibatb timbunan sementara atau beban ekstra (*surcharge*) (q_s) adalah beban perkerasan (q_p) ditambah beban hidup atau beban lalu lintas (q):

$$q_s = q_p + q \dots\dots\dots 2.42$$

Nilai beban hidup (q) berkisar antara 10 sampai 20 kpa. AASHTO (2007) merekomendasikan beban hidup setara dengan beban terbagi rata timbunan dengan tinggi 0,6 m. dalam menghitung penurunan konsolidasi, beban lalu lintas (g) bisa diambil penuh atau sekian persen dari beban lalu lintas penuhnya. Persentase tersebut bergantung pada kepadatan lalu lintas.

2.12.2. Distribusi Tegangan Akibat Beban Timbunan

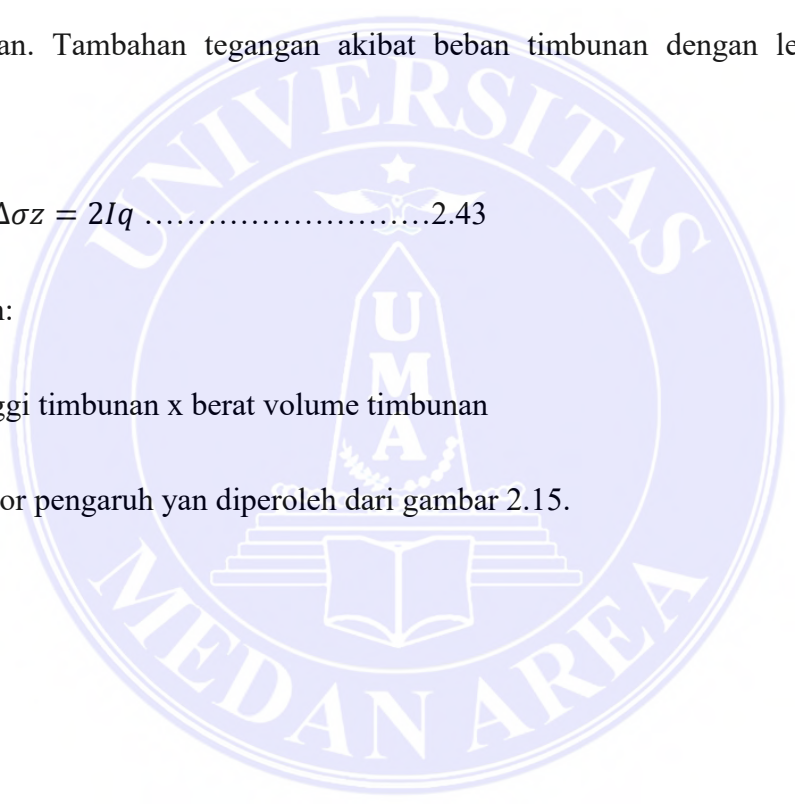
Dalam menentukan besarnya penurunan konsolidasi, dibutuhkan nilai tambahan tekanan akibat beban timbunan di lapisan tanah mudah mampat yang ditinjau. Untuk menentukan tambahan tegangan disembarang titik dibawah timbunan, maka dapat digunakan grafik dari Osterberg (1957) dalam gambar 1.15. dalam gambar ini, a = panjang arah horijontal dari kaki lereng sampai tepi permukaan timbunan, dan b = panjang arah horijontal setengah dari lebar timbunan. Tambahan tegangan akibat beban timbunan dengan lebar atas 2b, adalah:

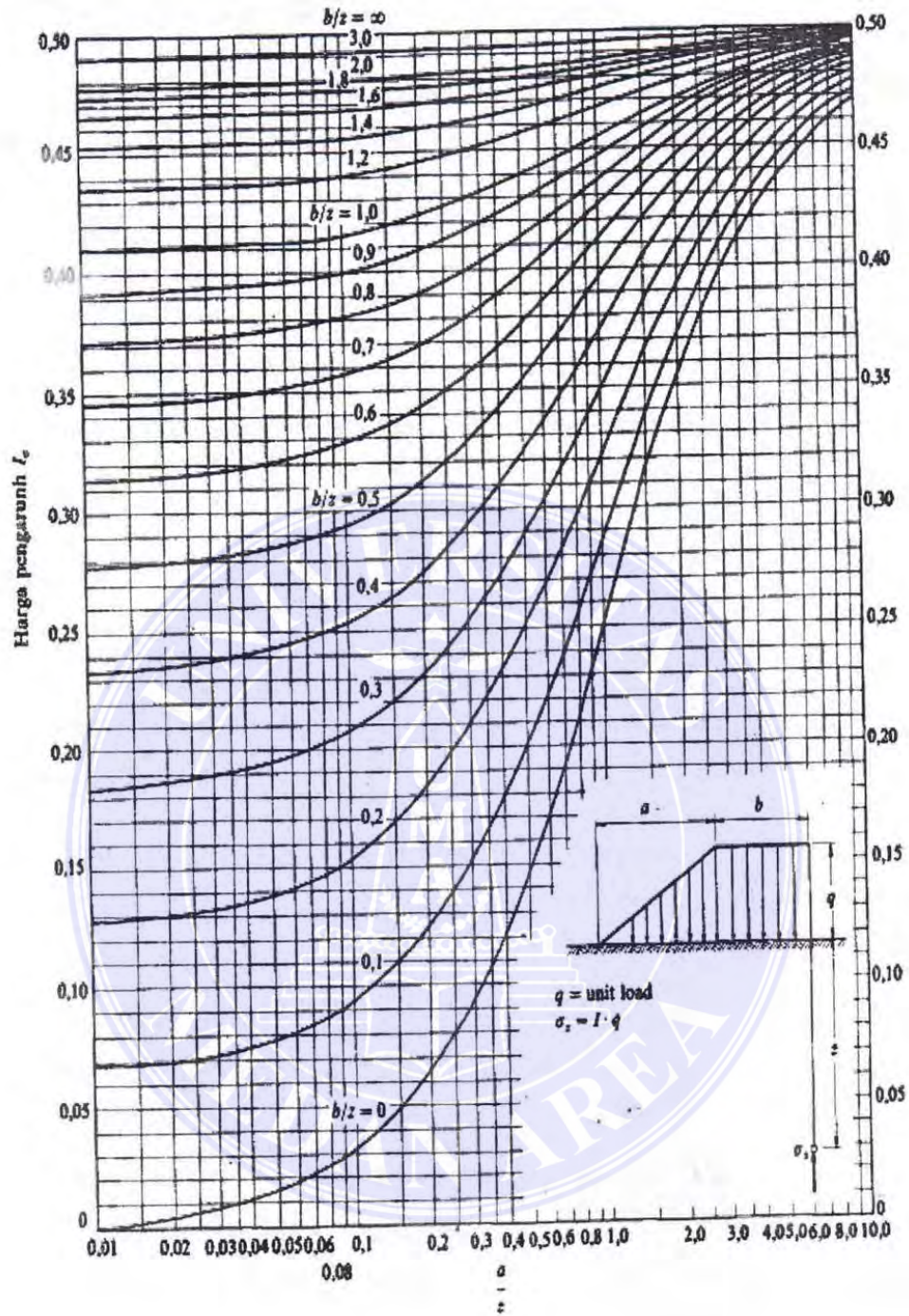
$$\Delta p = \Delta \sigma_z = 2Iq \dots\dots\dots 2.43$$

Dengan:

q = tinggi timbunan x berat volume timbunan

I = faktor pengaruh yan diperoleh dari gambar 2.15.





Gambar 2. 12. faktor pengaruh (I_0) akibat beban timbunan (Osterberg. 1957).
(sumber: perbaikan tanah, 2020)

2.12.3. Penurunan Timbunan

Penurunan total dinyatakan dengan persamaan:

$$S_t = S_i + S_c + S_s \dots\dots\dots 2.44$$

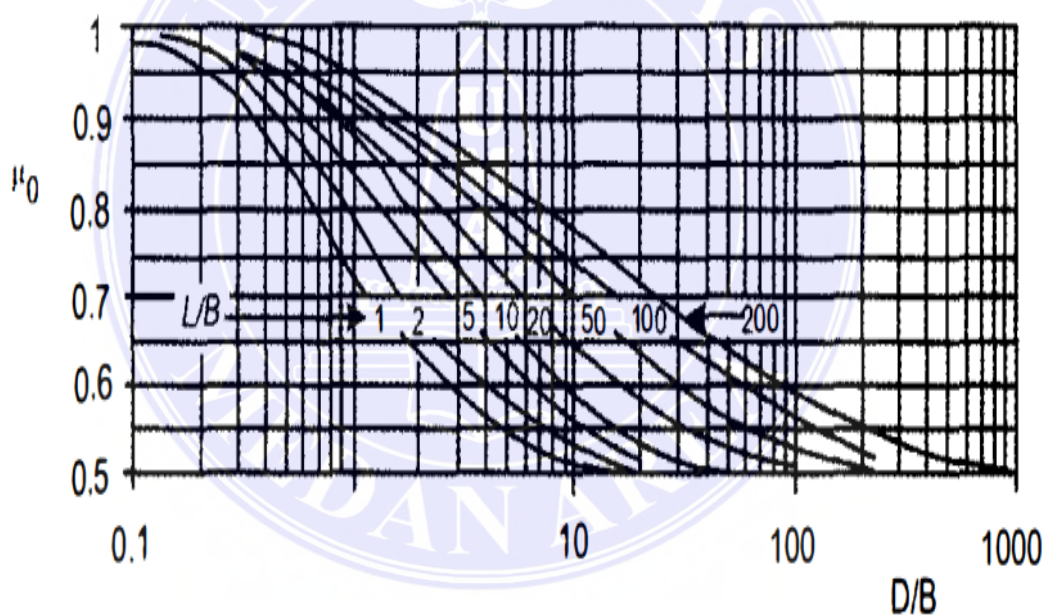
S_t = penurunan total (m)

S_i = penurunann segera (m)

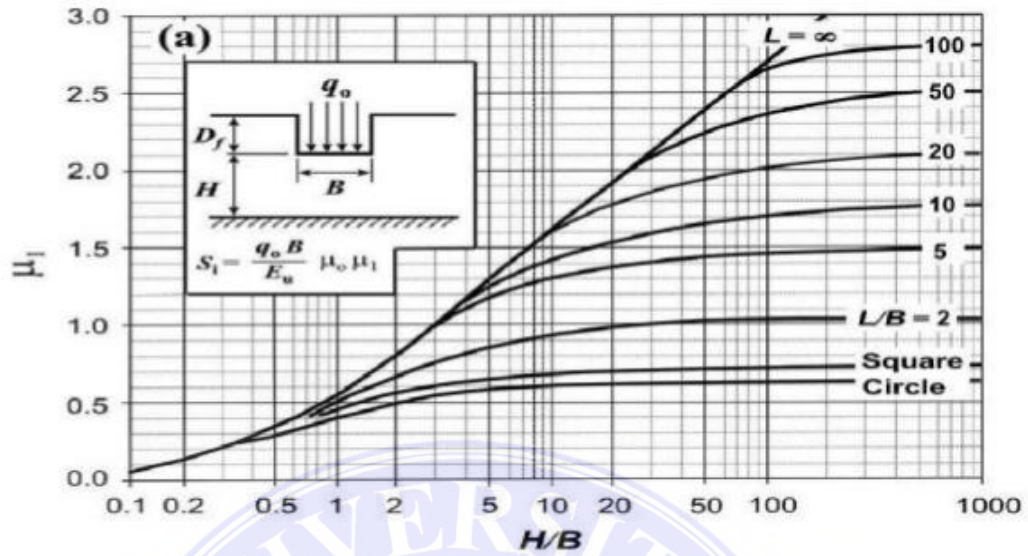
S_c = penurunan konsolidasi primer (m)

S_s = penurunan konsolidasi sekunder (m)

Untuk tanah anorganik, umumnya peneurunan konsolidasi sekunder diabaikan atau $S_s = 0$. Penurunan segera (S_i) lempung jenuh (rasso passion $\mu = 0,5$), diestimasi secara pendekatan dengan menggunakan persamaan yang disarankan oleh Janbu et al. (1956). (Gambar 2.16).



(a)



(b)
 (Gambar: 2.16. (a) dan (b) faktor koreksi μ_0 dan μ_1 (Janbu *et al.*, 1959)
 (sumber : perbaikan tanah, 2020)

$$S_i = \mu_1 \mu_0 \frac{q_n B}{E} \text{ (untuk rasio passion } \mu = 0,5) \dots\dots\dots 2.45$$

Dengan :

S_1 = penurunan segera rata – rata (m)

μ_0 = faktor koreksi untuk kedalam pondasi D_f

μ_1 = faktor koreksi tanah untuk lapisan tanah tebal terbatas H

B = lebar beban terbagi rata untuk luasan empat persegi panjang atau diameter lingkaran pada diameter lingkaraan (m)

q_n = tambahan tegangan neto (Kn/m^2)

E = modulus elastis (kN/m^2)

2.13. Peningkatan Daya Dukung Tanah

Daya dukung tanah dasar dapat meningkat jika beban timbunan diletakkan secara bertahap sampai mencapai tinggi timbunan kritis (H_{cr}). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Ardana dan Mochtar (1999), diketahui bahwa terdapat vertikal efektif (σ_p'). Peningkatan daya dukung tanah akibat pemampatan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

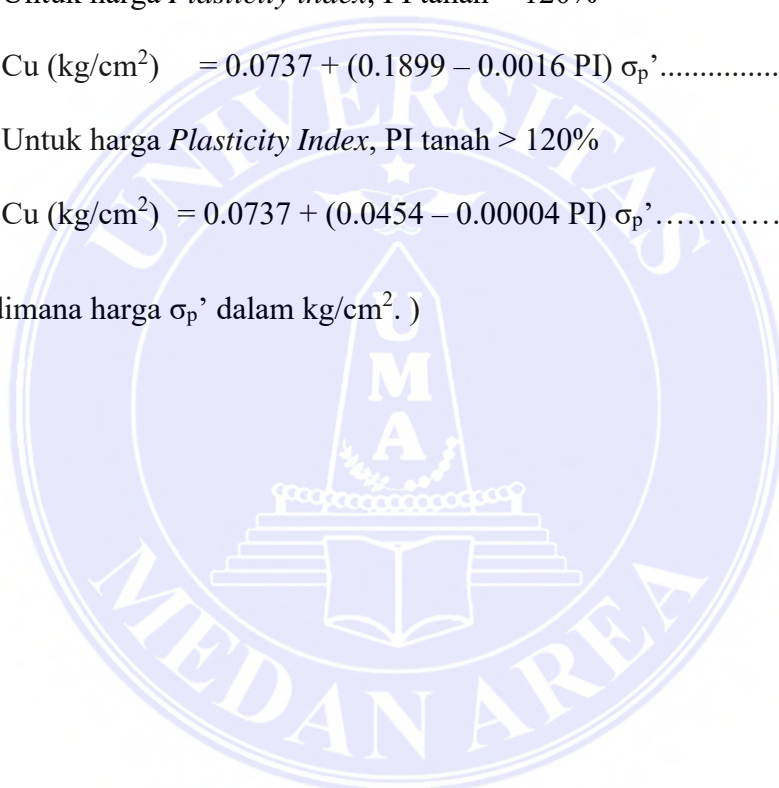
- Untuk harga *Plasticity index*, PI tanah < 120%

$$C_u \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 0.0737 + (0.1899 - 0.0016 \text{ PI}) \sigma_p' \dots\dots\dots(2.46)$$

- Untuk harga *Plasticity Index*, PI tanah > 120%

$$C_u \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 0.0737 + (0.0454 - 0.00004 \text{ PI}) \sigma_p' \dots\dots\dots(2.47)$$

(dimana harga σ_p' dalam kg/cm².)



BAB III

METODE PENELITIAN

1.1. Deskripsi Penelitian

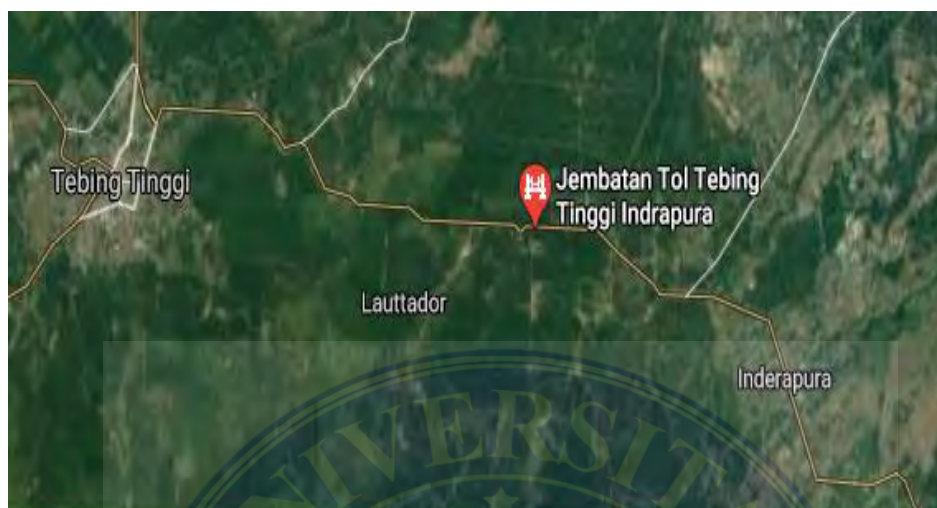
Proyek jalan tol Tebing Tinggi – Indrapura merupakan proyek pembangunan jalan tol yang meliputi struktur, tanah, jalan, jembatan, fly over, dan lainnya yang terletak kabupaten batubara. Berdasarkan hasil penyelidikan tanah pada STA 103 + 400 didapatkan hasil bahwa jenis tanah pada lokasi tersebut adalah tanah lunak dan mengandung banyak air (tanah jenuh) sehingga perlu dilakukan dipakai tanah untuk mempercepat konsolidasi pada tanah. Pada pembangunan jalan tol Tebing Tinggi – Indrapura ini, perbaikan tanah yang dilakukan adalah metode prefabricated vertical drain (PVD) untuk mempercepat konsolidasi tanah.

Dalam penelitian ini dipergunakan pendekatan penelitian kualitatif yaitu suatu metode mengumpulkan data yang sesuai dengan keadaan yang sebenarnya di lapangan, serta mengajikan dan menganalisis sehingga dapat memberikan gambaran cukup yang jelas terhadap objek yang diteliti.

1.2. Lokasi Dan Peta Penelitian

objek studi kasus pada penulisan skripsi ini adalah pembangunan jalan tol Tebing Tinggi – Indrapura pada zona 3 STA 301 + 400 yang berada di daerah Tebing Tinggi, Sumatera Utara. Dimana berdasarkan hasil penyelidikan tanah di lapangan yang berupa hasil uji alat sondir dan boring, pada lokasi tersebut termasuk jenis tanah lempung lunak dan diperlukan perbaikan tanah terlebih

dahulu sebelum dilakukan pembangunan jalan tol. Lokasi pembangunan proyek jalan tol Tebing Tinggi – Indrapura dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3. 1. peta lokasi pembangunan jalan tol Tebing Tinggi – Indrapura
(sumber : google maps).

1.3.Tahap Persiapan

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

Adapun tahap-tahap persiapan ini meliputi :

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

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

1.4.Tahapan Penelitian

Dalam penulisan Tugas Akhir ini, penulis melakukan beberapa tahap dan pelaksanaan sehingga tercapai maksud dan tujuan dari penelitian Seperti yang diuraikan pada Bab I, tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini adalah untuk menghitung besarnya penurunan yang terjadi pada tanah dengan menggunakan metode prevabricated vertical drain (PVD), yang didasarkan pada data pengujian di lapangan, dan pengolahan data. Dalam mencapai tujuan tersebut, maka dilakukan tahap-tahap sebagai berikut :

a. Tahap Pertama

Mengumpulkan berbagai jenis literatur dalam bentuk buku maupun tulisan ilmiah yang berhubungan dengan Tugas Akhir ini.

b. Tahap kedua

Pada tahap ini di lakukan pengumpulan data-data dari hasil penyelidikan tanah yaitu berupa hasil boring pada tanah dan data spesifikasi bahan yang digunakan. Adapun data tersebut diperoleh dari PT. HK (Huria Konstruksi).

c. Tahap Ketiga

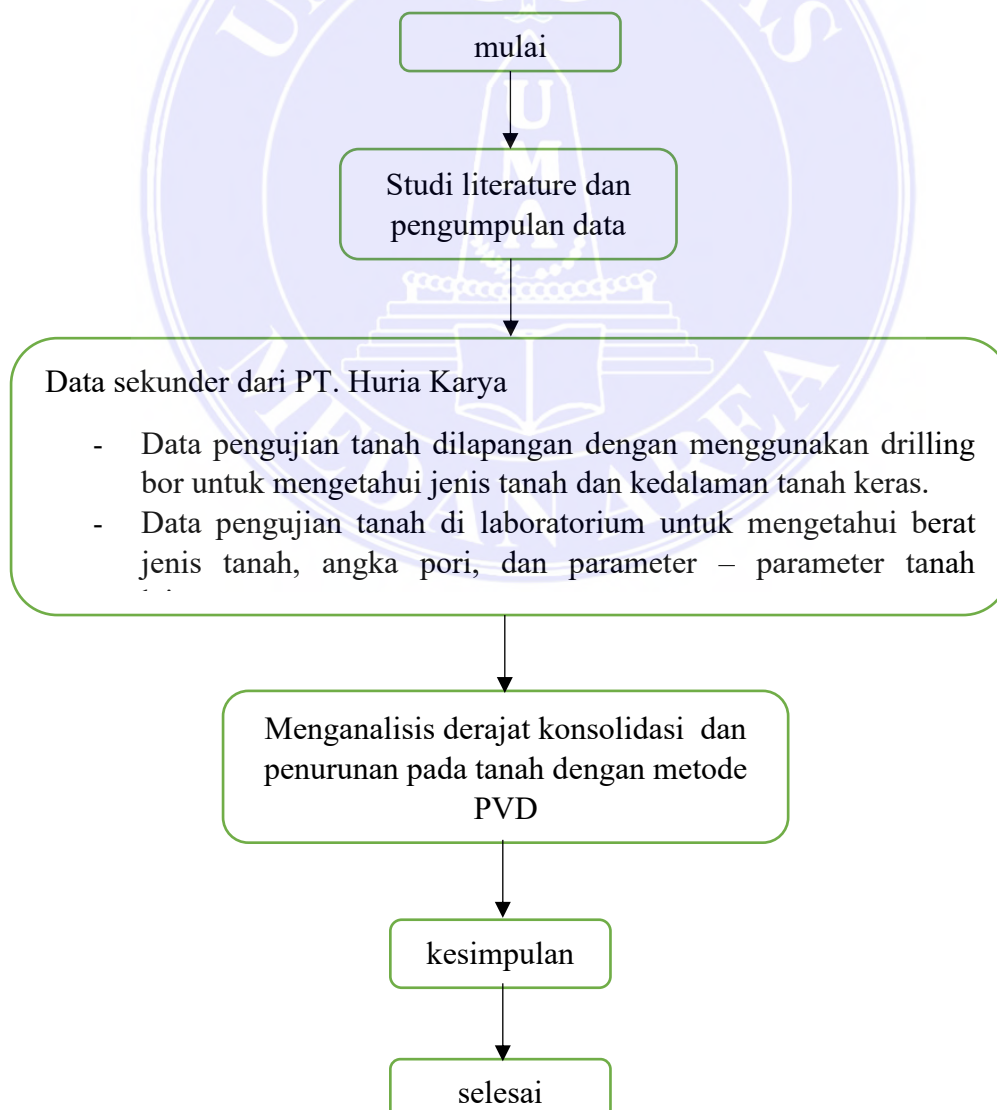
Melakukan analisis sesuai dengan data-data yang diperoleh dari PT. Huria Konstruksi (HK) dan data yang didapat dari hasil wawancara dilapangan

berdasarkan dengan sumber referensi (jurnal dan buku yang berhubungan dengan tanah) yang berhubungan dengan penulisan tugas akhir ini.

d. Tahap Keempat

Menentukan hasil penurunan tanah yan terjadi dengan menggunakan pendekatan yang didapat dari refrensi jurnal.

1.5. Kerangka Berpikir Penelitian



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa pada bab IV, dapat diambil kesimpulan bahwa :

Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi 90% dengan menggunakan perbaikan tanah dengan metode *prefabricated vertical drain* (PVD), dengan pola segitiga dan jarak pemasangan $S = 1,5$ m membutuhkan waktu selama 12 minggu. Dengan besarPenerunan yang terjadi adalah 1,17 m.

5.2. Saran

Metode perbaikan tanah dengan menggunakan *prefabricated vertical drain* (PVD) sangat efisien di gunakan pada tanah yang berlempung lunak karena dapat mempercepat proses konsolidasi pada tanah dan pelaksanaanya juga sangat sederhana.

DAFTAR PUSTAKA

- Aspar, Wimpie, A. N., dan Eka N. Fitriani, “Pengaruh Jarak dan Pola Prefabricated Vertical Drain (PVD) Pada Perbaikan Tanah Lempung Lunak”. Makalah Ilmiah Pengkajian Industri, vol. 10, no. 1, 2016, pp. 41-50.
- Badan Standarisasi Nasional. SNI 8460:2017, Persyaratan Perancangan Geoteknik. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2017.
- Cai, A. S. Balasubramaniam H., Zhu, D., Surarak, C., dan Oh, E. Y. N. “Settlements of Embankments In Soft Soils”. Geotechnical Engineering Journal of SEAGS & AGSSEA, vol. 41, no. 2, 2010, pp. 1-19. Vertical Drains. 25 Agustus 2019: cofra.com/solutions/consolidation/vertical-drains.html.
- Das, B.M. 2018. Mekanika Tanah (Prinsip – Prinsip Rekayasa Geoteknis), Edisi Keempat Jilid I, Surabaya : Erlangga.

Fanny Rumintha, 2017. Analisa Penurunan Dan Waktu Konsolidasi Tanah Lunak Dengan Menggunakan Metode *Preloading* Dan *Prefabricated Vertical Drain*.

Hary Christady Hardiyatmo, 2020. Perbaikan Tanah, Cetakan Pertama, Gadjah Mada University press, Yogyakarta..

Juliana, N., 2012. Tesis Magister “*Analisis Efek Prefabricated Vertical Drain pada Timbunan Tanah Lunak di Bandara Udara Kualanamu*”. Universitas Sumatera Utara.

L. D. Wesley, 2017. Mekanika Tanah, Yogyakarta : Andi.

Laurence D. Wesley, 2010. Mekanika Tanah (Untuk Tanah Endapan Dan Residu), Yogyakarta : Andi.

Mochtar, Noor Endah. 2012. Modul Ajar Metode Perbaikan Tanah. Surabaya: ITS Press.

Mendrofa, Junieli.2015“Analisis Perbaikan Lapisan Soft Soil dengan Sistem Prefaricated Vertical Drain pada Jalan Tol Medan-Kualanamu dengan Metode Elemen Hingga”. Tesis Magister Universitas Sumatera Utara.

Siregar, Juanda Andika.2017 “Analisis Perbaikan Tanah Lunak Akibat Pengaruh Penggunaan PVD dan Geotekstil dengan Menggunakan Metode Analitik dan Metode Elemen Hingga (Studi Kasus Pryek Jalan Bebas Hambatan Medan-Kualanamu KM 35+622,42)”. Skripsi Universitas Sumatera Utara.

Wahyudi, Herman. 2012. Daya Dukung Pondasi Dangkal. Surabaya: ITS Press.

LAMPIRAN

UNIVERSITAS MEDAN AREA

.....
© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang
.....



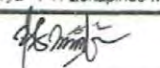

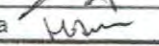
1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Document Accepted 15/12/21

Access From (repository.uma.ac.id)15/12/21

PVD Produk CETEAU DRAIN, TYPE CT-D1008

Ex. Geosistem

PEKERJAAN PEMBANGUNAN (DESIGN & BUILD) JALAN TOL TEBING TINGGI - KISARAN (TAHAP I) RUAS TEBING TINGGI - INDRAPURA (STA. 86+250 S/D STA 106+650) PT. HUTAMA MARGA WASKITA						
PEMBANGUNAN JALAN TOL TEBING TINGGI - INDRAPURA		Kontraktor Konsultan	: PT. Hutama Karya (Persero) Div. Infrastruktur : PT. BINA KARYA (PERSERO) - PT. INDRAPURA (PERSERO) - PT. ESKAPINDO MATRA - JO			
RANGKUMAN HASIL PENGUJIAN PVD (PREPABRICATED VERTICAL DRAIN) GEOSISTEM						
No.	DESKRIPSI	SATUAN	STANDARD PENGUJIAN	SPESIFIKASI/ GAMBAR	HASIL TEST	REMARK
I	Filter					
1	Ukuran Pori (AOS)	µm	ASTM D4751	≤ 75	63 ≤ AOS ≤ 75	B4T
2	Kuat Cengkraman/ Grab	N	ASTM D4632	≥ 310	378,67	B4T
3	Kuat Sobek	N	ASTM D4533	Min. 111	146,50	B4T
4	Bursting Strength	kPa	ASTM D3786	Min. 896	1000 - 1200	B4T
5	Kuat Tusuk	N	ASTM D4683	Min. 220	233,81	B4T
6	Permeabilitas	m/s	ASTM D4491		7,730 x 10 ⁻⁴	B4T
II	PVD Komposit					
1	Lebar	mm	ASTM D5199	100	100 - 100,01	B4T
2	Tebal	mm	ASTM D5199	3	4,14 - 4,19	B4T
3	Kuat Tarik (Uji lebar penuh)	kN	ASTM D4595	≥ 2,1	2,28	B4T
4	Elongasi pada gaya tarik maksimum	%	ASTM D4595	≥ 15%	44,67	B4T
5	Kuat Tarik (Pada Regangan ≤ 10%)	kN	ASTM D4595		1,88	B4T
6	Kapasitas aliran saat lurus (250 kPa)	m ³ /s	ASTM D4716	≥ 85 x 10 ⁻⁶	142,19 x 10 ⁻⁶	B4T
7	Kapasitas aliran saat lurus (300 kPa)	m ³ /s	ASTM D4716	-	132,70 x 10 ⁻⁶	B4T
8	Kapasitas aliran saat tertekuk (P=200 kPa, i=0.1, 0,25% buckled)	m ³ /s	ASTM D4716	≥ 40 x 10 ⁻⁶	72,50 x 10 ⁻⁶	AIT THAILAND
<p>Note :</p> <ul style="list-style-type: none"> Hasil pengujian ini merupakan hasil pengujian awal PVD yang digunakan, selanjutnya untuk pengendalian mutu, pengujian harus mengikuti spesifikasi Teknis Jalan Bebas Hambatan dan Jalan Tol, Divisi 4 - Pekerjaan Tanah yang ada pada pasal 9.13 (5), pada Dokumen Kontrak No. 006 / Kontrak - HMW / XII / 2017, Tanggal 29 Desember 2017. Koordinasikan dengan pihak Quality Control untuk pengujian selanjutnya. Berdasarkan hasil tes di atas, PVD ini masih bisa digunakan karena masih sesuai dengan batas minimum spesifikasi / gambar. 						
Diketahui oleh,		Diperiksa dan Disetujui Oleh,		Dibuat dan Diajukan oleh,		
PT. Hutama Marga Waskita		PT. Bina Karya - PT. Indra Karya - PT. Eskapindo Matra Jo.		PT. Hutama Karya (Persero) Div. Infrastruktur		
Tanggal	Sign	Tanggal	Sign	Tanggal	Sign	
						
	Nama		Nama		Nama	
			BARTHOLOMEUS		RUSLI	

PT. HUTAMA MARGA WASKITA PT. MARATAMA CIPTA MANDIRI		DRILLING LOG						Coordinate x : 532859,0 m y : 365908,4 m							
Bore No. : BH - 40 / 3		Project : Pekerjaan Pembangunan (Design and Build)				Bore Master : Beslyn Tampubolon									
Beginning : 03 Juni 2018		Jalan Tol				Description By : Beslyn Tampubolon									
Ending : 04 Juni 2018		Tebing Tinggi - Kisanan (Tahap 1) Ruas Tebing				Drilling Rig : Toho D. 2									
GWL : -2,10 m		Location : STA. 103 + 462				Engine : Dompeng									
Elevation : - m						Checked by : Ir.Janner Napitupulu									
Scala (m)	Depth (m)	Thickness (m)	Ground Water Level (m)	Symbol	Description	Core Recovery in (%)	Method of sample UDS SPT	Thickness (m)	Depth (m)	Elevation	Standart Penetration Test (SPT)				N. Value Graph
											Blows Penetration Each 15 cm			N	
											N1	N2	N3	N2+N3 30 cm	
0	0,00	0,00			Description : Clayes Silty Sand										
1	1,00	1,00			Colour : Light Gray										
2					Consistency : Loose										
2					Plasticity : Low to Medium Plastic										
2					Moisture Content : Medium		SPT	0,45	2,45	-2,45	1	0	0	0	
3					Description : Coarse Sand some Clay										
4					Colour : Grayes Brown		UDS	0,50	4,00	-4,00					
4					Consistency : Very Loose		SPT	0,45	4,45	-4,45	1	0	1	1	
5					Plasticity : Very Low Plastic										
5					Moisture Content : High										
6							SPT	0,45	6,00	-6,00	1	0	1	1	
7															
8							SPT	0,45	6,45	-6,45	1	0	1	1	
8							SPT	0,45	8,00	-8,00	1	0	0	0	
8															
9															
10					Description : Clay mixed Fossil										
10					Organic Mouldy Wood		SPT	0,45	10,00	-10,00	1	0	0	0	
11					Colour : Blackish Brown										
11					Consistency : Very Soft										
11					Plasticity : Very Low Plastic		UDS	0,50	11,50	-11,50					
11					Moisture Content : High		SPT	0,45	12,00	-12,00	1	0	1	1	
12															
12							SPT	0,45	12,45	-12,45	1	0	1	1	
13															
14							SPT	0,45	14,00	-14,00	1	0	1	1	
14															
15															
16	15,80	9,30					SPT	0,45	14,45	-14,45	1	0	1	1	
16							SPT	0,45	16,00	-16,00	3	3	4	7	
16															
17															
18					Description : Coarse Sand										
18					Colour : Grayes Brown		SPT	0,45	18,00	-18,00	7	8	13	21	
19					Consistency : Loose to Dense										
19					Plasticity : Non Plastic										
19					Moisture Content : High										
20							SPT	0,45	20,00	-20,00	11	18	25	43	
20															
21															
22	22,00	6,20					SPT	0,45	20,45	-20,45	16	27	34	≥60	
22															
23															
23															
24					Description : Silty Sand mixed Tuff		SPT	0,45	22,00	-22,00	23	36	30/4	≥60	
24					Colour : Whitish Gray										
24					Consistency : Very Dense										
24					Plasticity : Low Plastic										
24					Moisture Content : High		SPT	0,45	24,00	-24,00	23	36	30/4	≥60	
25															
26							SPT	0,45	26,00	-26,00	19	38	30/3	≥60	
26															
27															
28							SPT	0,45	26,45	-26,45	19	38	30/3	≥60	
28															
29															
29															
30	28,50	6,50					SPT	0,45	28,00	-28,00	37	56	10/11	≥60	
30															

Legend : Clay, Silt, Sand, Undisturbed Sample (UDS), Disturbed Sample (DS), S P T, Ground Water Level, Gravel, Tuff Rock, Peat Soil, Fossil/Organic, Boulder/Sedimentary Rock

ok

PT. HUTAMA MARGA WASKITA PT. MARATAMA CIPTA MANDIRI		DRILLING LOG						Coordinate x : 533072 m y : 365489 m							
Bore No. : BH - 41 B		Project : Pekerjaan Pembangunan (Design and Build) Jalan Tol		Bore Master : Beslyn Tampubolon		Depth of Drill : 26,50 m									
Beginning : 08 Desember 2018		Tebing Tinggi - Kisaran (Tahap 1) Ruas Tebing		Description By : Beslyn Tampubolon		Drilling Rig : Toho D. 2									
Ending : 10 Desember 2018		Tinggi - Inderapura (Sta. 86+250 s.d 106+650)		Drilling Rig : Toho D. 2		Engine : Dompeng									
GWL : -3,10 m		Location : STA. 103 + 950		Checked by : Ir.Janner Napitupulu											
Elevation : - m															
Scala (m)	Depth (m)	Thickness (m)	Ground Water Level (m)	Symbol	Description	Core Recovery in (%)	Metho de of sample UDS SPT	Thicknes (m)	Depth (m)	Elevation	Standart Penetration Test (SPT)			N. Value Graph	
											Blows Penetration Each 15 cm	N	N		
											N1	N2	N3		
0	0,00	0,00													
1				====	Description : Silty Clay Colour : Whitish Gray										
2				====	Consistency : Medium Stiff to Very Stiff Plasticity : Medium to High Plastic Moisture Content : Medium to High		SPT	0,45	2,00 2,45	-2,00 -2,45		7	14	16	30
3	3,50	3,50													
4				o:o:o:o	Description : Coarse Sand Colour : Whitish Gray		UDS	0,50	4,00	-4,00					
5				o:o:o:o	Consistency : Loose to Medium Dense Plasticity : Non Plastic Moisture Content : High		SPT	0,45	4,45	-4,45		2	4	6	10
6	6,00	2,50			Description : Sandy Clay Colour : Brown		SPT	0,45	6,00 6,45	-6,00 -6,45		1	1	1	2
7	7,50	1,50			Consistency : Very Soft Plasticity : Very Low Plastic Moisture Content : Very High		UDS	0,50	7,50 8,00	-7,50 -8,00					
8				o:o:o:o			SPT	0,45	8,45	-8,45		3	6	5	11
9				o:o:o:o											
10				o:o:o:o			SPT	0,45	10,00 10,45	-10,00 -10,45		4	5	6	11
11				o:o:o:o											
12				o:o:o:o			SPT	0,45	12,00 12,45	-12,00 -12,45		7	9	21	30
13				o:o:o:o	Description : Medium Sand mixed Tuff Colour : Dark Gray		UDS	0,50	13,50 14,00	-13,50 -14,00					
14				o:o:o:o	Consistency : Medium Dense to Dense Plasticity : Non Plastic Moisture Content : High		SPT	0,45	14,45	-14,45		9	11	23	34
15				o:o:o:o											
16				o:o:o:o			SPT	0,45	16,00 16,45	-16,00 -16,45		11	14	22	36
17				o:o:o:o											
18				o:o:o:o			SPT	0,45	18,00 18,45	-18,00 -18,45		10	16	18	34
19				o:o:o:o											
20	20,00	12,50		vw :o: v2:v2			SPT	0,45	20,00 20,45	-20,00 -20,45		18	27	34	≥60
21				vw :o: v2:v2											
22				vw :o: v2:v2	Description : Silty Fine Sand mixed Tuff Colour : Whitish Dark Gray		SPT	0,45	22,00 22,45	-22,00 -22,45		25	28	35	≥60
23				vw :o: v2:v2	Consistency : Very Dense Plasticity : Low Plastic Moisture Content : High										
24				vw :o: v2:v2			SPT	0,45	24,00 24,45	-24,00 -24,45		24	29	36	≥60
25				vw :o: v2:v2											
26	26,50	6,50		vw :o: v2:v2			SPT	0,45	26,00 26,45	-26,00 -26,45		28	41	20/9	≥60
27															
28															
29															
30															

Legend : == Clay	⊗ Undisturbed Sample (UDS)	👉 Ground Water Level	▬ Peat Soil
vv vV Silt	□ Disturbed Sample (DS)	o:oo Gravel	● Fossil/Organic
o:oo Sand	⊘ SPT	oooo Tuff Rock	⊗ Boulder/Sedimentary Rock

ok

CONSOLIDATION SETTLEMENT and RATE OF CONSOLIDATION												
with VERTICAL DRAIN to 20.00m depth												
Vertical drain spacing	:	150 cm										
Loading												
This calculation is to predict consolidation settlement caused by back filling soil/sand load of 4.5 m height and $\gamma = 1.24 \text{ ton/m}^3$												
Height	:	4,00 m										
γ	:	1,37 ton/m^3										
Weight	:	5,48 ton/m^2										
At center of structure :												
Elev.	Sample depth from original ground surface	Represented Depth Interval of		Effective Unit weight of Soil	Effective Overburden Pressure at base	effective Overburden Pressure at Mid Layer	Preloading Pressure	Total $P_1 = P_o + \Delta P$	Preconsolidated Pressure	C_c	e_o	Settlement due to Preload
(m)	(m)	(m)		(t/m^3)	(t/m^2)	P_o (t/m^2)	ΔP (t/m^2)	(t/m^2)	P_c (t/m^2)			(m)
	1,50	0,00	- 2,00	0,390	0,780	0,390	5,480	5,870	-	1,660	1,880	1,3575
	3,00	2,00	- 6,50	0,460	2,850	1,815	5,480	7,295	-	0,900	1,020	1,2113
	8,00	6,50	- 18,00	0,630	10,095	6,863	5,480	12,343	-	0,555	0,670	0,9743
										Total Settlement		3,5430
Total Consolidation Settlement due to soil/sand fill is about :						3,5430 m						
Calculation of average C_v :												
Preload magnitude : 5,48 ton/m^2												
Depth (m)	C_c	Represented Depth Interval (m)		P_1 (t/m^2)	C_v (cm^2/det)	H_j (m)	H - ekiv (cm)	$C_v \times H_i$				
1,50	1,660	0,00	- 2,00	5,870	0,00888	2,00	47,46	0,01776				
3,00	0,900	2,00	- 6,50	7,295	0,00087	4,50	341,14	0,003915				
8,00	0,555	6,50	- 18,00	12,343	0,00050	11,50	1150,00	0,00575				
Total thickness of equivalent layers (cm) =								1538,60	0,027425			
Corresponding coefficient of consolidation (cm ² /det) =								0,00050				
Average C_v : Total of ($C_v \times H_i$) / Total of (H) (cm ² /det) =								0,00152				
Degree of Consolidation :												
Horizontal degree of consolidation :												
Vertical drain spacing, s	=	150 cm		(dari soal)								
Vertical drain eq. diameter	=	10 cm		(dari internet)								
Kjellman's formula for time settlement :												
t	=	$(D^2 / 8 C_h) * [\ln (D/d) - 3/4] * \ln (1 / (1-U_h))$										
Where :												
t	=	consolidation time (seconds) = variabel										
D	=	diameter of soil cylinder being drained (cm) = 1,05 x s = 157,50 cm										
d	=	equivalent diameter of vertical drain (cm) = 10,00 cm										
s	=	vertical drain spacing (cm) = 150,00 cm										
C_v	=	Vertical Coefficient of Consolidation = 0,00050 cm^2/det										
C_h	=	Horizontal Coefficient of Consolidation = $10 \times C_v$ = 0,00500 cm^2/det										
(C_h ranges between 3 ~ 15 x C_v)												
(Nilai C_h ditentukan berdasarkan jenis tanah : lempung / clay)												
(Menurut Jamiolkowski et al. (1983)) $C_h = (kh/kv) \times C_v$												
(Menurut tabel Rixner et al (1983)) nilai kh / kv <i>varved soft clay</i> berkisar antara 3 - 15) maka diambil = 10												
n	=	D / d = 15,75										
U_h	=	Average degree of horizontal consolidation = <i>calculated</i>										
*	=	$8 t C_h / (D^2 * (\ln (D/d) - 0.75))$										
U_h	=	$1 - 1 / (\exp(*))$										
U_v	=	$\sqrt{4 / \pi} \times (C_v / H - ekiv^2) t$										
t (months)	t (detik)	C_h (cm ² /det)	*	U_h (%)	U_v (%)	U_{-ef} (%)	Settlement due to preload (m)					
20,00	51.840.000	0,00500	30,32	100,00	11,81	100,00	3,5430					
19,00	49.248.000	0,00500	28,81	100,00	11,51	100,00	3,5430					
18,00	46.656.000	0,00500	27,29	100,00	11,20	100,00	3,5430					
17,00	44.064.000	0,00500	25,77	100,00	10,89	100,00	3,5430					
16,00	41.472.000	0,00500	24,26	100,00	10,56	100,00	3,5430					
15,00	38.880.000	0,00500	22,74	100,00	10,23	100,00	3,5430					
14,00	36.288.000	0,00500	21,23	100,00	9,88	100,00	3,5430					
13,00	33.696.000	0,00500	19,71	100,00	9,52	100,00	3,5430					
12,00	31.104.000	0,00500	18,19	100,00	9,15	100,00	3,5430					
11,00	28.512.000	0,00500	16,68	100,00	8,76	100,00	3,5430					
10,00	25.920.000	0,00500	15,16	100,00	8,35	100,00	3,5430					
9,00	23.328.000	0,00500	13,64	100,00	7,92	100,00	3,5430					
8,00	20.736.000	0,00500	12,13	100,00	7,47	100,00	3,5430					
7,00	18.144.000	0,00500	10,61	100,00	6,99	100,00	3,5430					
6,00	15.552.000	0,00500	9,10	99,99	6,47	99,99	3,5427					
5,00	12.960.000	0,00500	7,58	99,95	5,90	99,95	3,5413					
4,00	10.368.000	0,00500	6,06	99,77	5,28	99,78	3,5352					
3,00	7.776.000	0,00500	4,55	98,94	4,57	98,99	3,5073					
2,00	5.184.000	0,00500	3,03	95,18	3,73	95,36	3,3786					
1,00	2.592.000	0,00500	1,52	78,04	2,64	78,62	2,7856					
0,00	0	0,00500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0000					
Jadi waktu yang dibutuhkan untuk 100% terkonsolidasi adalah :						7,00 bulan 0,58 tahun						

Hasil Test Laboratorium

Bore No.		BH – 40		
		6,00 – 6,50	15,00– 15,80	19,50 – 20,00
Depth (m)		6,00 – 6,50	15,00– 15,80	19,50 – 20,00
Moisture content	W (%)	48,7	42,65	32,9
Natural Densiti		1,578	-	-
ρ_s		1,061	-	-
(gr/cc)				
Dry Density		2,693	2,643	2,692
ρ_d		1,5371	-	-
(gr/cc)				
Specific Grafity	Gs	0,6059	-	-
Void Ratio	e	85,32	-	-
Porosity	n			
Degree of Saturation	Sr (%)			
Atterbeng Limit Test				
Liquit Limit	LL (%)	50,21	NP	NP
Plastic Limit	PL (%)	31,68	NP	NP
Plastic Index	PI (%)	18,54	NP	NP
Soil Classification				
AASHTO		A-7-5	A-3	A-3
USCS		CH	SP	SP
Sieve Analisis Test				
No. 4	Passing Percent	100	100	98,23
No. 10	Passing Percent	97,27	59,35	87,48
No. 20	Passing Percent	95,87	55,69	68,54
No. 40	Passing Percent	93,42	43,98	47,29
No. 60	Passing Percent	80,72	40,79	39,4
No. 100	Passing Percent	77,11	30,56	29,45
No. 200	Passing Percent	67,89	10,55	12,82
Unconfided Compression Test				
Qu	(kg/m ²)	0,4	-	-
Strain	(%)	3	-	-
Direct Sear Test				
Internal Friction	Φ (Degree)	70°13`49,51`	-	-
Cohesion	c (kg/cm ²)	0,205	-	-
Consolidation Test				
Insitu Void Ration	e _o	1,54	-	-
Compression Index	Cc	0,5088	-	-
Permeability	K(cm/sec)	7,68E-07	-	-

Proses Pemasangan *Prefabricated Vertical Drain* Kedalam Tanah (PVD) Pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Tebing Tinggi – Inderapura



Pemasangan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) Pada Mandrel Untuk Dimasukkan Kedalam Tanah



Pemeriksaan *Prefabricated Vertical Drain* (Pvd) Setelah Dipasang



Proses Penimbunan Pada Tanah Setelah *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) Selesai Dipasang



