

TESIS

**PERBANDINGAN PENGGUNAAN PVD
PRELOADING DAN TANPA PVD PRELOADING
PADA TIMBUNAN DAERAH RAWA
(Studi Kasus Jalan Tol Serbaraja)**

Disusun dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Persyaratan
Guna Mencapai Gelar Magister Teknik (MT)



Oleh :
TRI CAHYO ADI SAPUTRO
NIM : 20202300147

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG
2025**

LEMBAR PERSETUJUAN TESIS

PERBANDINGAN PENGGUNAAN PVD PRELOADING DAN TANPA PVD PRELOADING PADA TIMBUNAN DAERAH

RAWA

(Studi Kasus Jalan Tol Serbaraja)

Disusun oleh :

TRI CAHYO ADI SAPUTRO

NIM: 20202300147

Telah disetujui oleh:

Tanggal,.....

Tanggal,.....

Pembimbing 1

Pembimbing 2



Prof. Ir. H. Pratikso, MST., Ph.D

NIK. 210288012



Dr. Ir. Rinda Krlinasari, MT.

NIK. 210200031

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

PERBANDINGAN PENGGUNAAN PVD PRELOADING DAN TANPA PVD PRELOADING PADA TIMBUNAN DAERAH RAWA (Studi Kasus Jalan Tol Serbaraja)

Disusun oleh:

TRI CAHYO ADI SAPUTRO
NIM: 20202300147


Dipertahankan di Depan Tim Penguji Tanggal:
(24 Oktober 2025)

Tim Penguji


1. Ketua


Dr. Ir. Rinda Karlinasari, MT
NIK. 210200031

2. Anggota


Prof. Dr. Ir. Antonius, MT., IPU
NIK. 210202033

3. Anggota


Ir. Moh Fauqun Ni'am, MT., Ph.D
NIK. 210296020


Tesis ini diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)
Semarang, 07 November 2025

Mengetahui

Ketua Program Studi




Prof. Dr. Ir. Antonius, MT
NIK. 210202033

Mengesahkan
Dekan Fakultas Teknik




Dr. Abdul Rochim, ST., MT.
NIK. 210200031

MOTTO

كُنْتُمْ خَيْرَ أُمَّةٍ أُخْرِجَتْ لِلنَّاسِ تَأْمُرُونَ بِالْمَعْرُوفِ وَتَنْهَوْنَ عَنِ الْمُنْكَرِ وَتُؤْمِنُونَ بِاللَّهِ وَلَوْ ءَامَنَ أَهْلُ
الْكِتَابِ لَكَانَ خَيْرًا لَهُمْ مِّنْهُمْ الْمُؤْمِنُونَ وَأَكْثَرُهُمُ الْفَاسِقُونَ

Artinya: Kamu adalah umat yang terbaik yang dilahirkan untuk manusia, menyuruh kepada yang ma'ruf, dan mencegah dari yang munkar, dan beriman kepada Allah. Sekiranya Ahli Kitab beriman, tentulah itu lebih baik bagi mereka, di antara mereka ada yang beriman, dan kebanyakan mereka adalah orang-orang yang fasik. (Qs. Ali Imron:110)

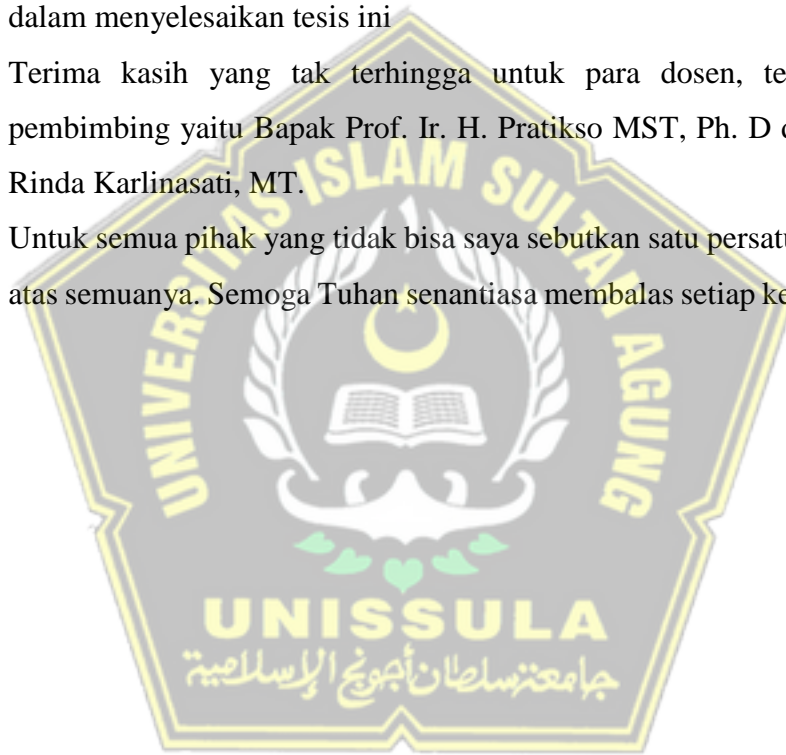
يَا أَيُّهَا الَّذِينَ ءَامَنُوا إِذَا قِيلَ لَكُمْ تَفَسَّحُوا فِي الْمَجَالِسِ فَافْسَحُوا يَفْسَحِ اللَّهُ لَكُمْ وَإِذَا قِيلَ انشُرُوا فَانشُرُوا يَرْفَعِ
اللَّهُ الَّذِينَ ءَامَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ ۚ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ

Artinya: Hai orang-orang beriman apabila dikatakan kepadamu: "Berlapang-lapanglah dalam majlis", maka lapangkanlah niscaya Allah akan memberi kelapangan untukmu. Dan apabila dikatakan: "Berdirilah kamu", maka berdirilah, niscaya Allah akan meninggikan orang-orang yang beriman di antaramu dan orang-orang yang diberi ilmu pengetahuan beberapa derajat. Dan Allah Maha Mengetahui apa yang kamu kerjakan. (Qs. Al Mujadalah:11)

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan segala kerendahan hati, ingin kupersembahkan sebuah karya kecil yang telah berhasil kuselesaikan ini kepada:

1. Ayahanda Supriyanto dan Ibunda Sutriah yang selalu tidak henti – hentinya mendoakan untuk keberhasilanku
2. Istriku tercinta Oktaviani Endiana yang selalu memberikan support serta perhatian yang luar biasa
3. Putriku Tavisha Rumi yang selalu menjadi inspirasi dan penyemangatku dalam menyelesaikan tesis ini
4. Terima kasih yang tak terhingga untuk para dosen, terutama dosen pembimbing yaitu Bapak Prof. Ir. H. Pratikso MST, Ph. D dan Ibu Dr. Ir. Rinda Karlinasati, MT.
5. Untuk semua pihak yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu, terima kasih atas semuanya. Semoga Tuhan senantiasa membalas setiap kebaikan kalian.



ABSTRAK

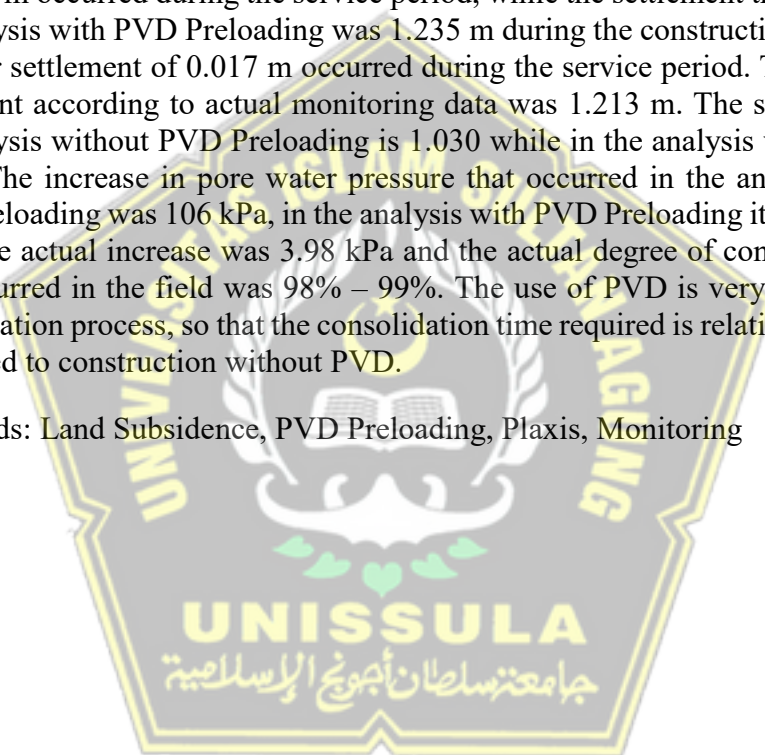
Penelitian ini didasarkan pada penimbunan di lokasi rawa yang terindikasi adanya tanah lunak dalam dan dilakukan perbaikan tanah dengan PVD. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besar penurunan, mencari jarak ideal pemasangan PVD, dan untuk mengetahui besarnya derajat konsolidasi aktual. Metode untuk analisa penurunan tanah yaitu dengan cara mengolah data tanah dari hasil investigasi geoteknik dan kemudian di analisis menggunakan metode konsolidasi 1D dan Plaxis. Hasil investigasi geoteknik didapatkan kedalaman tanah lunak sampai dengan 20 m. Prediksi penurunan yang terjadi menggunakan konsolidasi 1D yaitu 1,852 m dan jarak ideal pemasangan PVD yaitu 1,25 m. Besar penurunan pada analisis tanpa PVD Preloading sebesar 1,100 m pada masa konstruksi dan terjadi penambahan penurunan 1,173 m saat masa layan, sedangkan penurunan yang terjadi pada analisis dengan PVD Preloading sebesar 1,235 m pada masa konstruksi, dan terjadi penurunan kembali sebesar 0,017 m pada masa layan. Besar penurunan pada data monitoring aktual sebesar 1,213 m. Faktor keamanan pada analisis tanpa PVD Preloading sebesar 1,030 sedangkan pada analisis dengan PVD sebesar 1,406. Kenaikan tekanan air pori yang terjadi pada analisi tanpa PVD Preloading sebesar 106 kPa, pada analisi dengan PVD Preloading sebesar 5,09 kPa, sedangkan aktual yang terjadi sebesar 3,98 kPa dan derajat konsolidasi (U) terjadi aktual di lapangan sebesar 98% – 99%. Pemakaian PVD sangat membantu dalam proses konsolidasi, sehingga waktu konsolidasi yang dibutuhkan relatif cepat jika dibandingkan dengan konstruksi tanpa PVD.

Kata Kunci : Penurunan Tanah, PVD Preloading, Plaxis, Monitoring

ABSTRAC

This research is based on the location of the embankment in the lake which indicates the presence of deep soft soil and soil improvement was carried out using PVD. This study aims to determine the magnitude of settlement, find the ideal distance for installing PVD, and to determine the actual degree of consolidation. The method for land subsidence analysis is by processing land data from the results of geotechnical investigations and then analyzing it using the 1D consolidation and Plaxis methods. The geotechnical investigation revealed a soft soil depth of up to 20 m. The predicted settlement using 1D consolidation was 1.852 m, and the ideal PVD installation distance was 1.25 m. The settlement in the analysis without PVD Preloading was 1.100 m during the construction period and an additional settlement of 1.173 m occurred during the service period, while the settlement that occurred in the analysis with PVD Preloading was 1.235 m during the construction period, and a further settlement of 0.017 m occurred during the service period. The amount of settlement according to actual monitoring data was 1.213 m. The safety factor in the analysis without PVD Preloading is 1.030 while in the analysis with PVD it is 1.406. The increase in pore water pressure that occurred in the analysis without PVD Preloading was 106 kPa, in the analysis with PVD Preloading it was 5.09 kPa, while the actual increase was 3.98 kPa and the actual degree of consolidation (U) that occurred in the field was 98% – 99%. The use of PVD is very helpful in the consolidation process, so that the consolidation time required is relatively fast when compared to construction without PVD.

Keywords: Land Subsidence, PVD Preloading, Plaxis, Monitoring



SURAT PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Tri Cahyo Adi Saputro

NIM : 20202300147

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis yang berjudul

**PERBANDINGAN PENGGUNAAN PVD PRELOADING DAN TANPA
PVD PRELOADING PADA TIMBUNAN DAERAH RAWA (Studi Kasus
Jalan Tol Serbaraja)**

Adalah benar hasil karya saya dan dengan penuh kesadaran bahwa saya tidak melakukan tindakan plagiasi atau mengambilalih seluruh atau sebagian besar karya tulis orang lain tanpa menyebutkan sumbernya. Jika saya terbukti melakukan tindakan plagiasi, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan aturan yang berlaku.



Semarang, Oktober 2025

Tri Cahyo Adi Saputro

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah penulis ucapkan atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penyusun dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul ” PERBANDINGAN PENGGUNAAN PVD PRELOADING DAN TANPA PVD PRELOADING PADA TIMBUNAN DAERAH RAWA (Studi Kasus Jalan Tol Serbaraja)” dengan baik.

Penyusun menyadari bahwa dalam proses penyusunan Tesis ini banyak mengalami kendala, namun berkat bantuan, bimbingan, kerjasama dari berbagai pihak dan berkat Allah SWT, kendala – kendala yang dihadapi dapat diatasi, oleh karena itu penyusun menyampaikan terima kasih dan penghargaan kepada:

1. Bapak Dr. Abdul Rochim, ST., MT. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang;
2. Prof. Dr. Ir. Antonius, MT, selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung Semarang;
3. Dosen Pembimbing yang telah sabar dan tulus ikhlas meluangkan waktu dan saran – saran yang sangat berharga dalam penyusunan tesis ini;
4. Bapak dan Ibu Dosen Magister Teknik Sipil yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan sehingga penyusun dapat menyelesaikan studi dan menyelesaikan penyusunan tesis;
5. Kedua Orang Tua dan Sekeluarga kami yang selalu memberikan motivasi, dukungan dan doa untuk kuliah dan menyusun tesis ini;
6. Semua pihak yang telah membantu sehingga penyusun dapat menyelesaikan tesis ini dengan baik.

Penyusun menyadari bahwa dalam penyusunan Tesis ini masih jauh dari sempurna, untuk itu penyusun mengharapkan saran dan kritik yang membangun guna kesempurnaan tesis ini.

Semarang, Oktober 2025

Tri Cahyo Adi Saputro

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN TESIS.....	i
LEMBAR PENGESAHAN TESIS.....	ii
MOTTO	iii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRAC.....	vi
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB I.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Manfaat Penelitian	3
BAB II	5
2.1. Soil / Tanah	5
2.2. Penyelidikan Tanah.....	5
2.3. Parameter Tanah	6
2.4. Tanah Lunak	11
2.5. Perbaikan Tanah Lunak	23
2.6. Percepatan Waktu Konsolidasi	27
2.7. Analisa Stabilitas Timbunan dengan Software	30
2.8. Kajian Hasil Penelitian Terdahulu	31
BAB III.....	36
1.1. Tahapan Penelitian.....	36
1.2. Lokasi Penelitian.....	36
1.3. Metode Pengumpulan Data.....	37
1.4. Analisis Data.....	39
1.5. Interpretasi Hasil Settlement Plate	47

BAB IV	50
4.1. Gambaran Umum Kabupaten Tangerang	50
4.1.1. Kondisi Topografi	50
4.1.2. Kondisi Geologi	51
4.2. Geometri Badan Jalan Eksisting	52
4.3. Penyelidikan Tanah	52
4.3.1. Pengujian Sondir (CPT)	52
4.3.2. Pengujian Borlog	53
4.3.3. Pengujian CPTu	54
4.3.4. Pengujian Laboratorium	55
4.4. Data PVD (Prefabricated Vertical Drain)	57
4.5. Data Geotextile Woven	58
4.6. Perhitungan Tinggi Initial ($H_{initial}$)	59
4.6.1. Perhitungan Besar Pemampatan	60
4.7. Perhitungan Waktu Pemampatan Tanpa Percepatan	65
4.8. Perencanaan PVD untuk Mempercepat Pemampatan	65
4.8.1. Perhitungan Derajat Konsolidasi Vertikal (U_v)	65
4.8.2. Perhitungan Derajat Konsolidasi Horizontal (U_h)	66
4.8.3. Perhitungan Derajat Konsolidasi Rata-rata (\bar{U})	67
4.9. Perhitungan konsolidasi menggunakan program Plaxis	68
4.10. Interpretasi Settlement Plate dengan Metode Asaoka	80
4.11. Perbandingan Monitoring Aktual Lapangan dengan Hasil Analisis Plaxis	85
BAB V	91
5.1. Kesimpulan	91
5.2. Saran	92
DAFTAR PUSTAKA	93
LAMPIRAN	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Grafik Perbandingan Tekanan konus dengan Ratio Geser	7
Gambar 2.2. Konsolidasi 1 Dimensi (Das, 1998).....	15
Gambar 2.3. Grafik Hubungan antara penurunan dengan waktu	16
Gambar 2.4. Grafik hubungan angka pori dan tegangan dalam skala log (Jie Han, 2015)	17
Gambar 2.5. Grafik Influence Factor	18
Gambar 2.6. Sketsa timbunan preloading.....	24
Gambar 2.7. Perbandingan waktu dan penurunan preloading tanpa dan dengan surcharge	24
Gambar 2.8. Diagram Tegangan Untuk Pentahapan Penimbunan	27
Gambar 2.9. Pembebanan Bertahap	27
Gambar 2.10. Pemasangan Vertical Drain pada kedalaman lapisan compressible	28
Gambar 2.11. Pola Pemasangan Bujur Sangkar, $D = 1,13 S$	29
Gambar 2.12. Pola Pemasangan Segitiga, $D = 1,05 S$	29
Gambar 2.13. Equivalen diameter (d_w) untuk PVD	29
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian.....	36
Gambar 3.2. Lokasi Penelitian	37
Gambar 3.3. Detail Lokasi Penelitian.....	37
Gambar 3.4. Simulasi Pemasangan PVD dan PHD	40
Gambar 3.5. Material PVD.....	40
Gambar 3.6. Material PHD.....	40
Gambar 3.7. Ilustrasi Pemodelan dengan Axisymmetry (PLAXIS V8 Reference Manual, 2002)	42
Gambar 3.8. Pemodelan dengan Plastic (Brinkgreve et al., 2014).....	45
Gambar 3.9. Hubungan antara Volumetric Strain pada Tanah Lunak (Brinkgreve et al., 2014).....	45
Gambar 3.10. Perkiraan akhir penurunan berdasarkan Metode Asaoka (1978)..	48

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Klasifikasi Tanah menurut Sondir.....	6
Tabel 2.2. Hubungn Kepadatan Tanah, Berat Jenis Tanah Kering, NSPT, tekanan konus (q_c) dan sudut geser dalam (ϕ) (Mayerhof, 1965).....	7
Tabel 2.3. Hubungan NSPT terhadap berat jenis tanah jenuh.....	8
Tabel 2.4. Hubungan Nilai Berat Volume.....	8
Tabel 2.5. Nilai Permeability (Wesley, 1977).....	9
Tabel 2.6. Hubungan antara Modulus Elastisitas dan angka rasio poisson (Meyerhof, 1956)	9
Tabel 2.7. Hubungan Sudut Geser Tanah terhadap Jenis Tanah.....	10
Tabel 2.8. Hubungan Antara Sudut Geser, Plastisity & Jenis Tanah (Bjerrum, 1960)	10
Tabel 2.9. Hubungan NSPT, Kohesi dan Sudut Geser Tanah.....	11
Tabel 2.10. Jenis Tanah menurut Kandungan Organik.....	11
Tabel 2.11. Definisi Kuat Geser Lempung Lunak (Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah, 2002)	12
Tabel 2.12. Perkiraan rasio Poisson (Bowles, 1977).....	18
Tabel 2.13. Hubungan untuk Indeks Pemampatan, C_c	21
Tabel 2.14. Pemampatan dan Pengembangan Tanah Asli	21
Tabel 2.15. Variasi Faktor Waktu Terhadap Derajat Konsolidasi	23
Tabel 2.16. Tabel Penelitian Terdahulu	31
Tabel 3.1. Menentukan Parameter Tanah.....	43

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pembangunan di Indonesia semakin berkembang seiring bertambahnya populasi manusia dan kemajuan teknologi. Konstruksi bangunan juga semakin berkembang seiring berjalannya waktu. Pada suatu pembangunan pasti ada suatu perencanaan sebelum bangunan didirikan (Istikomah & Rudiyanto, 2017).

Proyek Tol Serbaraja atau Serpong – Balaraja adalah Proyek Strategis Nasional (PSN) di Provinsi Banten yang dapat meningkatkan ketersambungan wilayah menuju Jakarta, Merak serta Lampung dikarenakan terkoneksi dengan akses Tol Tangerang – Merak (Fahrita & Istiatun, 2022).

Trase jalan tol terletak di kabupaten tangerang dengan kondisi geologi yaitu hasil endapan batuan Tersier serta endapan dari aktivitas gunung api kwarter baik dari segi primer ataupun sekunder dari jenis batuan sedimen piroklastik dan epiklastik serta klastik sebagai endapan alluvial (Qa). Dari kondisi tersebut daerah penelitian menghasilkan sumber daya geologi berupa pasir dan potensi sumber daya air permukaan dan air tanah sebagai Cekungan Air dengan beberapa lapisan akifer (Ranwal RPJPD Kab Tangerang 2025-2045).

Dari kondisi geologi tersebut banyak warga yang memanfaatkan lokasi-lokasi di kabupaten tangerang sebagai tambang pasir, sehingga banyak dari lokasi – lokasi tersebut yang dibiarkan terbuka dan akhirnya menjadi kolam-kolam atau rawa yang digenangi oleh air selama puluhan tahun. Oleh penduduk sekitar rawa-rawa atau danau tersebut sering dijuluki sebagai bekas tambang pasir.

Jalur atau trase jalan tol Serpong – Balaraja melewati rawa-rawa atau danau yang dahulunya dijadikan sebagai tambang pasir dimana kedalaman tambang pasir tersebut berkisar 10 sampai dengan 20 m. Hal ini dapat terlihat dari beberapa data tanah yang diambil pada saat perencanaan pembangunan Tol Serbaraja.

Pada saat pembangunan Tol Serbaraja diambil pula data tanah berupa bor log, CPT maupun CPTu dengan kondisi danau yang sudah ditimbun tanpa diketahui pemadatan yang dilakukan sudah sesuai dengan peraturan atau belum. Dari hasil data tanah tersebut terlihat pada kedalaman 0 sampai dengan 20 m termasuk dalam kategori tanah lunak yang masih mengalami proses konsolidasi.

Melihat hal tersebut tentunya terdapat indikasi penimbunan tanpa pemadatan yang akan mengakibatkan kondisi kepadatan timbunan tidak bisa maksimal. Tidak hanya dari pemadatan yang kurang maksimal, kondisi air pada saat penimbunan tentunya mempengaruhi tingkat kejenuhan dari timbunan.

Dari penjabaran diatas, penulis merencanakan penelitian di salah satu lokasi rencana jalan tol Serpong Balaraja yang melwati rawa – rawa atau danau yang terindikasi penimbunan yang kurang sempurna sehingga jika lokasi tersebut tetap ditimbun tanpa adanya perbaikan tanah, maka konstruksi jalan tol Serpong Balaraja akan mengalami kerusakan konstruksi baik pada timbunan maupun pada pavement yang diterapkan pada konstruksi tersebut. Judul yang akan diangkat dalam penelitian adalah Perbandingan Perbaikan Tanah dasar dengan PVD Preloading dan tanpa PVD Preloading pada Timbunan diatas Rawa.

1.2. Rumusan Masalah

Rencana penelitian mengangkat kasus tentang penurunan pada lokasi penimbunan badan jalan diatas rawa yang terindikasi tidak ada pemadatan pada saat penimbunan rawa tersebut sehingga ditemukan adanya tanah lunak yang masih mengalami konsolidasi. Penimbunan jalan diatas tanah lunak dalam dan masih mengalami konsolidasi akan berpotensi mengalami kegagalan.

Pada lokasi penelitian, perbaikan tanah yang dilakukan oleh kontraktor yaitu menggunakan metode PVD dan Preloading untuk mempercepat proses konsolidasi. Berbagai macam monitoring atau instrumentasi telah di pasang untuk memantau kondisi aktual.

Dari latar belakang diatas penulis merencanakan rumusan beberapa pertanyaan dalam penelitian ini yaitu:

1. Seberapa besar penurunan yang terjadi menggunakan teori konsolidasi 1 Dimensi?
2. Berapa jarak ideal pemasangan PVD?
3. Seberapa besar penurunan yang terjadi menggunakan metode numerik / Plaxis dengan PVD+PHD preloading dan tanpa PVD preloading?
4. Seberapa besar Faktor Keamanan yang terjadi saat menggunakan PVD+PHD Preloading dan tanpa menggunakan PVD Preloading.
5. Seberapa besar penurunan, deformasi lateral dan tekanan air pori jika dibandingkan antara analisis dengan numerik Plaxis dan hasil monitoring di lapangan dan berapa derajat konsolidasi yang terjadi (U)?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang diharapkan dari penelitian yang dilakukan oleh penulis yaitu :

1. Untuk mencari besar penurunan menggunakan metode konsolidasi 1 Dimensi.
2. Untuk mencari jarak ideal pemasangan PVD.
3. Untuk mengetahui besar penurunan menggunakan metode numerik Plaxis dengan PVD+PHD preloading dan tanpa PVD preloading.
4. Untuk mengetahui faktor keamanan pada penggunaan PVD+PHD Preloading serta tanpa PVD preloading pada tanah lunak dalam.
5. Untuk mengetahui besar penurunan, deformasi lateral dan tekanan air pori pada analisis numerik dan aktual dan besarnya derajat konsolidasi (U).

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian yang direncanakan oleh penulis adalah:

1. Sebagai bahan referensi untuk para desainer dalam hal penerapan perbaikan tanah menggunakan PVD dengan preloading pada tanah lunak yang masih berkonsolidasi.
2. Penerapan – penerapan instrumentasi apa saja yang perlu di pasang untuk memonitoring pekerjaan perbaikan tanah menggunakan PVD dengan preloading.

3. Memberikan informasi seberapa efektif perbaikan tanah lunak yang masih berkonsolidasi menggunakan PVD dengan preloading.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Soil* / Tanah

Soil/tanah yaitu gabungan mineral alam yang dapat di pisahkan bila agregat itu diaduk ke dalam air (Terzaghi, 1987). *Soil* atau Tanah didiskripsikan secara umum yaitu kumpulan dari berbagai bagian padat dan tidak terikat satu dengan yang lainnya, celah di antara material tersebut berisikan udara serta air (Verhoef 1994).

Tanah lunak yaitu tanah kohesif yang tersusun dari butiran yang berukuran sangat kecil. Tanah lunak memiliki kuat geser rendah, kemampuan kompresibilitas tinggi, daya dukung rendah dan memiliki permeabilitas kecil. Untuk mengetahuinya perlu penyelidikan serta pengendalian menyeluruh agar tidak terjadi problematika terhadap ketidakstabilan dan penurunan untuk waktu yang lama sehingga dapat mengakibatkan kerusakan konstruksi di atasnya. Ada beberapa macam kondisi tanah meliputi lempung lunak dan gambut.

Toha 1989 menyebutkan tanah lunak mempunyai kandungan air berkisar 80 s/d 100%, batas cair 80 s/d 110%, batas plastis 30 s/d 45%. Saat di uji dengan *sieve analysis*, butiran yang lolos saringan no200 > 90% dan mempunyai kekuatan geser berkisar 20 s/d 40 kN/m².

2.2. **Penyelidikan Tanah**

Tahap pertama yang dilakukan di suatu proyek pembangunan yaitu melakukan penyelidikan tanah secara aktual serta dilaboratorium untuk melihat daya dukung, jenis/sifat tanah serta kondisi geologi. Dalam hal ini yaitu susunan lapisan tanah dan sifat tanah. Penyelidikan tanah di lokasi proyek menggunakan sondir, uji Standard Penetration Test, pemboran tanah serta laiinya. Sampel dari tanah yang diperoleh di lapangan akan dilakukan pengetesan dilaboratorium untuk mencari karakteristik dari tanah.

2.3. Parameter Tanah

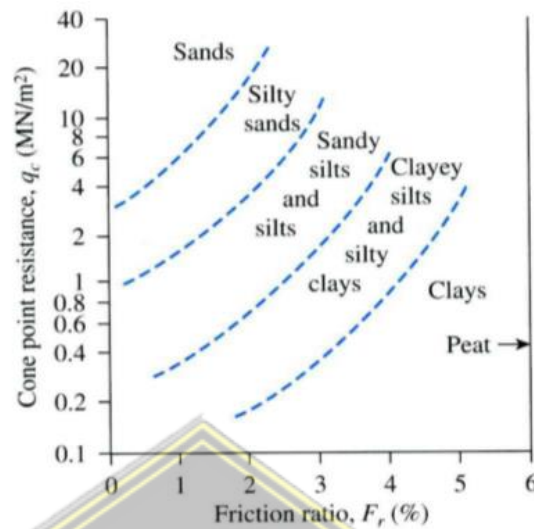
2.3.1. Klasifikasi Tanah menurut Sondir

Dari hasil tes sondir dari lokasi proyek, yang terdiri dari hasil pembacaan manometer setiap jarak kedalaman 20,0 cm s/d ujung konus. Hasil pembacaan ke-1 yaitu perlawanan konus (Q_c) dan pembacaan ke-2 yaitu perlawanan geser ($Q_c + F_s$) yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis tanah. Jenis tanah yang dapat teridentifikasi ditunjukkan pada Tabel dibawah ini.

Tabel 2.1. Klasifikasi Tanah menurut Sondir

Hasil Sondir		Klasifikasi
Q_c	F_s	
6,0	0,15-0,40	Humus, lempung sangat lunak
6,0-10,0	0,20	Pasir kelanauan lepas, pasir sangat lepas
	0,20-0,60	Lempung lembek, lempung kelanauan lembek
	0,10	Kerikil lepas
10,0-30,0	0,10-0,40	Pasir lepas
	0,40-0,80	Lempung atau lempung kelanauan
	0,80-2,00	Lempung agak kenyal
30-60	1,50	Pasir kelanauan, pasir agak padat
	1,0-3,0	Lempung atau lempung kelanauan kenyal
	1,0	Kerikil kepasiran lepas
60-150	1,0-3,0	Pasir padat, pasir kelanauan atau lempung padat dan lempung kelanauan
	3,0	Lempung kekerikilan kenyal
150-300		Pasir padat, pasir kekerikilan, pasir kasar
	1,0-2,0	pasir, pasir kelanauan sangat padat

Untuk menetapkan jenis tanah dapat dilakukan dengan cara melihat gambar di bawah ini yaitu:



Gambar 2.1. Grafik Perbandingan Tekanan konus dengan Ratio Geser

2.3.2. Klasifikasi Tanah menurut Uji Standar Penetrasi

Standar penetrasi merupakan jumlah banyaknya penetrasi pukulan (30,0cm terakhir) yaitu dengan menjatuhkan palu dari pada ketinggian 75 cm. Berat palu yaitu 63,5kg.

Hubungan kepadatan tanah, berat jenis tanah kering dan jenuh, nilai NSPT, tekanan konus, dan sudut geser dalam (ϕ) yaitu sebanding. Hal tersebut bisa di lihat pada Table 2.2, 2.3, dan 2.4.

Tabel 2.2. Hubungn Kepadatan Tanah, Berat Jenis Tanah Kering, NSPT, tekanan konus (q_c) dan sudut geser dalam (ϕ) (Mayerhof, 1965)

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

Tabel 2.3. Hubungan NSPT terhadap berat jenis tanah jenuh

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

Tabel 2.4. Hubungan Nilai Berat Volume

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

Adapun parameter yang didapatkan dari uji *standart penetration test*, yaitu:

1. Permeabilitas (*Permeability*)

Permeability yaitu kecepatan proses masuknya air pori pada tanah sampai keadaan jenuh. Penentuan permeabilitas tanah secara vertikal dan horisontal sangat penting pada saat pengolahan perhitungan.

Angka permeabilitas diambil dari kajian terdahului yang dilakukan oleh Wesley tahun 1977 yaitu tentang koefisien permeabiliy untuk berbagai ukuran partikel tanah sesuai dengan tabel berikut.

Tabel 2.5. Nilai Permeability (Wesley, 1977)

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

2. Modulus Elastisitas & Angka Rasio Poison

Nilai dari modulus elastisitas yaitu nilai perbandingan terhadap tegangan dan regangan yang memperlihatkan besarnya angka elastisitas tanah. Angka rasio poison ditentukan sebagai rasio kompresi poros terhadap regangan pemuaian lateral. Nilai Modulus Elastisitas dan angka rasio poison ditentukan menurut jenis tanah pada Table dibawah ini.

Tabel 2.6. Hubungan antara Modulus Elastisitas dan angka rasio poison (Meyerhof,1956)

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

3. Sudut Geser Tanah

Sudut geser tanah yaitu parameter terbentuk dari tegangan normal serta geser didalam tanah dan batuan. Sudut geser ini merupakan sudut retakan yang muncul ketika suatu material dipengaruhi oleh gaya atau

tegangan yang melebihi kemampuannya untuk menahan gaya geser. Semakin besar sudut geser suatu material, maka material tersebut akan semakin kuat menerima beban luar yang diberikan. Kekuatan geser tanah suatu material memiliki sudut geser serta nilai kohesi. Ketahanan tanah akibat beban tekanan samping dapat diasumsikan menggunakan sudut geser tanah serta nilai kohesi. Nilai-nilai tersebut di dapatkan dari pengujian sifat tanah seperti uji geser langsung maupun uji Traxial.

Tabel 2.7. Hubungan Sudut Geser Tanah terhadap Jenis Tanah

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

Tabel 2.8. Hubungan Antara Sudut Geser, Plastisity & Jenis Tanah
(Bjerrum, 1960)

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

4. Kohesi

Kohesi merupakan gaya tarik menarik antara partikel-partikel dalam batuan, yang diukur dalam satuan berat per satuan luas. Semakin besar kekuatan gesernya, maka semakin besar pula nilai kohesi dari batuan tersebut. Nilai kohesi diperoleh melalui tes laboratorium, yaitu tes geser langsung dan tes triakial. Kohesi juga bisa ditentukan dari hasil tegangan konus yang terdapat dalam data sondir.

$$C = \frac{Q_c}{20} \dots \dots \dots (2.1)$$

Hubungan kohesi, NSPT serta sudut geser dalam dilihat pada Tabel dibawah ini.

Tabel 2.9. Hubungan NSPT, Kohesi dan Sudut Geser Tanah

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

2.4. Tanah Lunak

2.4.1. Deskripsi Tanah Lunak

Adalah tanah kohesif yang terdiri dari butiran yang berukuran sangat kecil. Tanah lunak mempunyai kuat geser yang rendah, kemampuan kompresibilitas yang tinggi, daya dukung yang rendah dan mempunyai koefisien permeabilitas yang kecil. Perlu dilakukan penyelidikan dan pengendalian menyeluruh supaya tidak terjadi permasalahan ketidakstabilan serta penurunan jangka panjang yang dapat mengakibatkan kerusakan pada konstruksi diatasnya.

Toha 1989 menyebutkan tanah lunak mempunyai kandungan air berkisar 80 s/d 100%, batas cair 80 s/d 110%, batas plastis 30 s/d 45%. Saat di uji dengan *sieve analysis*, butiran yang lolos saringan no200 > 90% dan mempunyai kekuatan geser berkisar 20 s/d 40 kN/m².

Tabel 2.10. Jenis Tanah menurut Kandungan Organik

Jenis Tanah	Kadar Organik %
Lempung	< 25
Lempung Organik	25 - 75
Gambut	>75

Tanah lempung yaitu jenis tanah yang memiliki beberapa partikel mineral tertentu yang dapat memberikan sifat plastis pada tanah ketika

dicampur dengan air ("Grim, 1953"). Partikel-partikel tanah yang berukuran lebih kecil dari 2 mikron ($=2\mu$) atau lebih kecil dari 5 mikron.

Pada umumnya partikel-partikel dari mineral lempung berukuran koloid ($<1\mu$) dan ukuran 2μ yang merupakan batas atas dari ukuran mineral lempung. Dalam penentuan jenis tanah perlu diketahui mineral yang terkandung di dalamnya, karena tidak cukup hanya melihat ukuran butirannya saja. Menurut ASTM D-653 ukuran partikel lempung adalah yang berukuran 0,002 mm s/d 0,005 mm.

Pada rekayasa geoteknik terdapat dua jenis golongan tanah lunak yang definisinya berdasarkan kuat geser yang terdapat pada Tabel berikut:

Tabel 2.11. Definisi Kuat Geser Lempung Lunak (Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah, 2002)

Konsentrasi	Kuat Geser kN/m ²
Lunak	12,5 – 25
Sangat Lunak	$< 12,5$

Tanah gambut merupakan jenis tanah yang berasal dari sisa-sisa tumbuhan yang mengalami proses penguraian. Tanah ini hanya sedikit atau bahkan tidak mengandung kurang dari 5% bahan tanah mineral yang berbentuk kristal. Komponen utamanya adalah bahan organik berupa karbon, yang terdiri dari senyawa seperti *lignin*, *hemiselulosa*, dan humus. Tanah gambut memiliki struktur yang poros dan ringan, sehingga daya dukungnya rendah, serta banyak mengandung asam organik yang menyebabkan pH tanah gambut sangat rendah, yaitu berkisar antara 2,7 s/d 5,0. Kualitas air pada tanah gambut dipengaruhi oleh komposisi bahan penyusun, ketebalan tanah, tingkat penguraian, serta kondisi lingkungan dan pengelolaan airnya (Wibowo, 2010).

Kandungan senyawa organik dan hara mineral dalam tanah gambut berbeda-beda. Perbedaan ini dipengaruhi oleh jenis jaringan penyusun gambut, lingkungan tempat gambut terbentuk, serta perlakuan reklamasi yang diberikan. Kadar senyawa *polisakarida*, *hemiselulosa*, dan *tanin* cenderung berkurang dengan cepat semakin mendekati bagian bawah gambut hingga kedalaman 40 cm, kemudian menurun secara perlahan, kecuali untuk

hemiselulosa pada gambut dari hutan alami. Sementara itu, kadar selulosa meningkat secara perlahan seiring dengan kedalaman gambut, kecuali pada gambut dari hutan alami (Ratmini, 2012).

2.4.2. Karakteristik Tanah Lunak

Tanah lunak memiliki ciri-ciri yang beragam tergantung pada parameter dan tingkat kekonsistenan yang dimiliki oleh tanah tersebut.

a. Ciri-ciri Tanah Lempung Lunak

1. Ukuran butir halus, kurang dari 0,002 mm
2. Permeabilitas rendah
3. Kenaikan air kapiler tinggi
4. Bersifat sangat kohesif
5. Kadar kembang susut yang tinggi
6. Proses konsolidasi lambat.

Untuk mengetahui jenis tanah lempung, tidak cukup hanya melihat ukuran butirnya saja, tetapi juga harus mengetahui jenis mineral yang terdapat di dalamnya. Menurut ASTM D-653 secara fisik, tanah lempung memiliki ukuran partikel berkisar 0,002mm hingga 0,005mm.

b. Karakteristik Tanah Gambut

1. Banyak muncul di daerah rawa
2. Tidak subur, lembap, lembek atau lunak
3. Warna gelap
4. Memiliki rasa asam

Tanah gambut adalah jenis tanah yang terbentuk dari akumulasi sisa-sisa tumbuhan yang hanya mengalami proses penguraian. Tanah ini memiliki kadar bahan organik yang sangat tinggi. Secara umum, tanah gambut terdapat di daerah yang lembap atau tergenang air, seperti cekungan, tepi pantai, atau rawa.

2.4.3. Masalah yang timbul pada Tanah Lunak

Tanah lunak sering kali menjadi masalah dalam proses konstruksi. Hal ini terjadi karena tanah tersebut memiliki daya dukung yang rendah. Daya dukung yang rendah bisa menyebabkan berbagai kerugian, mulai dari meningkatnya biaya konstruksi hingga ancaman terhadap keselamatan bangunan, yaitu struktur yang dibuat tidak stabil dan berpotensi roboh.

Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan upaya perbaikan tanah.

Secara umum, tanah lempung lunak memiliki sifat-sifat berikut:

1. Kuat geser rendah
2. Bisa kadar air bertambah, kuat gesernya berkurang
3. Bila struktur tanah terganggu, kuat gesernya berkurang
4. Bila basah bersifat plastis dan mudah mampat
5. Menyusut bila kering danembang bila basah
6. Memiliki kompresibilitas yang besar
7. Berubah volumenya dengan bertambahnya waktu akibat rangkakan pada beban yang konstan
8. Merupakan material kedap air

2.4.4. Pemampatan Tanah

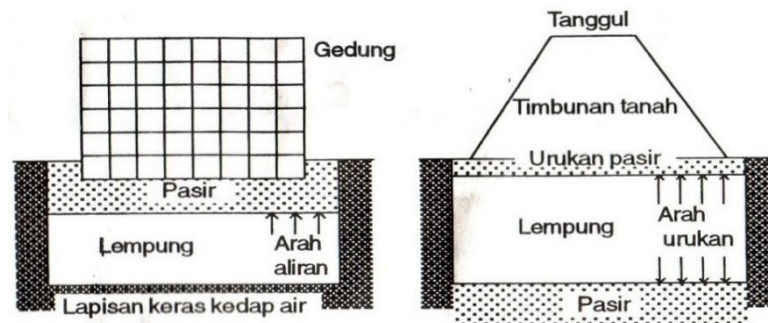
Masalah utama pada tanah lunak dalam proyek konstruksi adalah terjadinya penurunan tanah yang sangat besar. Penurunan ini terjadi karena proses konsolidasi tanah yang tidak cukup baik.

Tekanan air di dalam pori tanah akan meningkat jika lapisan tanah yang sudah tertutup air memiliki kemampuan mengalirkan air yang rendah dan diberi beban. Karena kemampuan aliran air tanah yang rendah, terjadi perbedaan tekanan pori di dalam tanah. Akibatnya, air mengalir menuju daerah dengan tekanan pori yang lebih rendah, sehingga menyebabkan tanah mengalami penyusutan.

Proses tekanan tanah karena pembebanan struktur menyebabkan pengecilan jumlah pori, diikuti dengan keluarnya air, sehingga terjadi pemadatan yang tampak sebagai penurunan struktur tanah. Konsolidasi yang disebabkan turunnya tinggi elevasi tanah adalah aspek penting pada rekayasa geoteknik. Konsolidasi adalah proses penurunan tanah disertai dengan keluarnya air pori tanah, sehingga volume tanah berkurang (Das, 1998).

Plastisitas butiran tanah menyebabkan tanah tetap mengalami penurunan setelah proses konsolidasi primer selesai, dengan tekanan air pori berada pada nilai nol (Bowles J.E 1991). Sehingga hal tersebut di katakan *secondary consolidation*, dan secara umum terjadi pada arah vertikal saja. Lapisan tanah yang dibebani terbatas oleh tanah di sekelilingnya, sehingga

tidak bisa bergerak ke arah horizontal. Aliran air secara vertikal ini dikenal dengan istilah konsolidasi 1D.



Gambar 2.2. Konsolidasi 1 Dimensi (Das, 1998)

Saat proses konsolidasi terjadi, bangunan di atas akan mengalami penurunan. Beberapa hal yang perlu diketahui mengenai penurunan/*settlement* dalam bidang geoteknik adalah:

- Tingkat penurunan/*settlement*
- Kecepatan penurunan/*settlement*

Pada tanah pasir, *settlement* terjadi cepat serta merata, dan besarnya *settlement* tidak terlalu besar, karena pasir memiliki sifat kompresibilitas yang rendah. Pada tanah lempung, penurunan terjadi secara perlahan dan besarnya penurunan lebih besar. Karena itu, penelitian konsolidasi biasanya hanya dilakukan pada tanah lempung (butir halus), karena lempung memiliki sifat "*high compressibility*".

Penurunan konsolidasi yaitu turunnya tinggi tanah kohesif karena air dalam pori tanah menghilang secara perlahan. Proses ini terjadi lambat seiring waktu. Awalnya, air dalam pori tanah masih banyak, sehingga tekanan air itu menyebabkan tanah tidak mampu menahan beban dengan baik. Seiring waktu, air itu keluar, dan tekanan air berkurang. Tekanan air yang berkurang ini berubah menjadi tekanan efektif yang membuat tanah mengeras dan mengalami penurunan. Penurunan konsolidasi berhenti ketika tekanan air pori sudah tidak ada lagi, artinya tanah sudah terdrainase dengan sempurna.

Secondary consolidation yaitu penurunan yang terjadi setelah proses *primary consolidation* selesai. Penurunan terjadi secara perlahan seiring berjalannya waktu.

Maka dari hal tersebut, penurunan total dari tanah yang diberikan beban adalah:

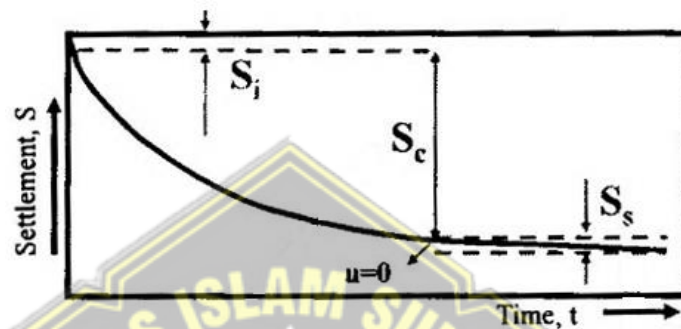
$$S_T = S_i + S_c + S_s \dots \dots \dots (2.2)$$

S_T = Penurunan Total (m)

S_i = Penurunan Segera (m)

S_c = Penurunan Primer (m)

S_s = Penurunan Sekunder (m)



Gambar 2.3. Grafik Hubungan antara penurunan dengan waktu

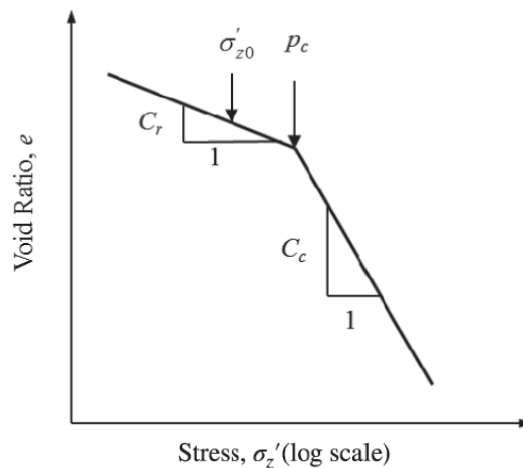
Tegangan prakonsolidasi adalah besarnya tegangan maksimal yang pernah diterima tanah. Nilai P_c' diperoleh melalui grafik hubungan tegangan (s) dengan *void ratio* (e) pada Gambar 2.3. Dari nilai tegangan prakonsolidasi dapat diperoleh besarnya OCR dengan persamaan :

$$OCR = \frac{P_c'}{P_0'} \dots \dots \dots (2.3)$$

dimana:

P_0' = tegangan efektif tanah yang saat ini bekerja

Jika nilai OCR kurang dari 1 tanah dalam kondisi sedang berkonsolidasi (*under consolidating*). Nilai OCR 1 menunjukkan tanah dalam kondisi *normally consolidated*, sedangkan nilai OCR lebih dari 1, tanah *over consolidated*.



Gambar 2.4. Grafik hubungan angka pori dan tegangan dalam skala log (Jie Han, 2015)

2.4.5. Penurunan Segera (*Immediate Settlement*)

Nilai penurunan seketika (S_i) lebih kecil jika dibandingkan dengan konsolidasi primer (S_c) dan *secondary consolidation* (S_s) serta waktu yang dibutuhkan juga lebih pendek.

Penurunan segera dihitung melalui persamaan berikut (Das, 1998).

$$S_i = \frac{qn \cdot B}{E} (1 - \mu^2) I_p \dots \dots \dots (2.4)$$

Diketahui:

S_i = Penurunan segera (m)

qn = Beban Timbunan (kN/m^2)

B = Lebar daerah pembebanan (m)

μ = Angka Poisson

E = Modulus elastisitas tanah (kN/m^2)

I_p = Faktor pengaruh tak berdimensi

Terzaghi (1943) merumuskan faktor I_p sebagai berikut :

$$I_p = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{2mn(m^2+n^2+1)^{\frac{1}{2}}}{m^2+n^2+1+m^2n^2} \times \frac{(m^2+n^2+2)}{(m^2+n^2+1)} + \arctg \frac{2mn(\sqrt{m^2+n^2+1})}{m^2+n^2+1-m^2n^2} \right) \dots \dots \dots (2.5)$$

Tabel 2.12. Perkiraan rasio Poisson (Bowles, 1977)

Macam Tanah	μ
Lempung jenuh	0,40 – 0,50
Lempung tak jenuh	0,10 – 0,30
Lempung berpasir	0,20 – 0,30
Lanau	0,30 – 0,35
Pasir padat	0,20 – 0,40
Pasir kasar	0,15
Pasir halus	0,25
Batu	0,10 – 0,40
Loess	0,10 – 0,30
Beton	0,15

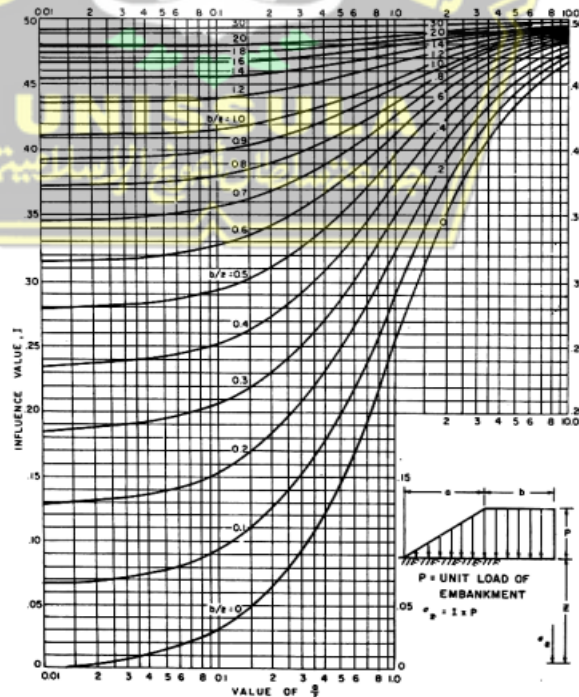
Faktor pengaruh tidak berdimensi bisa diperoleh melalui grafik dibawah ini:

$$q_n = 2 \times I \times \sigma_v'$$

Dimana:

q = tegangan vertikal efektif dipermukaan tanah akibat timbunan

I = Influence faktor



Gambar 2.5. Grafik Influence Factor

2.4.6. Konsolidasi Primer

Beban yang di tambahkan diatas lapisan tanah yang sudah tergenang air menyebabkan tekanan air dalam pori tanah meningkat. Akibatnya, air berusaha keluar dari pori-pori tanah, sehingga volume tanah berkurang. Penurunan yang terjadi disebut penurunan konsolidasi atau konsolidasi primer. Tingkat penurunan konsolidasi pada tanah lunak sangat tergantung pada sejarah tanah. Tanah di kedalaman tertentu sudah mengalami tekanan efektif sebelumnya, yaitu tekanan efektif tertinggi yang pernah dialami sebelumnya.

Rumusan menurut Craig (1978) dan Das (1998).

$$S_c = \frac{\Delta e}{1+e_0} H \dots\dots\dots(2.6)$$

Lempung terkonsolidasi normal maka:

$$\Delta e = C_c \{ \log (p_0 + \Delta p) - \log p_0 \} \dots\dots\dots(2.7)$$

Sehingga rumus konsolidasi primer sebagai berikut :

$$S_c = \frac{C_c \times H}{1+e_0} \log \left(\frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \right) \dots\dots\dots(2.8)$$

Untuk lapisan tanah lempung yang tebal, perhitungan penurunan dilakukan secara terpisah untuk setiap lapisan bagian dalamnya. Sehingga, penurunan total untuk seluruh lapisan adalah hasil penjumlahan dari semua penurunan masing-masing lapisan tersebut.

$$S = \sum \frac{C_c H_i}{1+e_0} \log \left(\frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \right) \dots\dots\dots(2.9)$$

Untuk tanah lempung yang terkonsolidasi berlebih ($p'_c > p'_0$) penurunan konsolidasi pimer dinyatakan dengan rumus yang bergantung dengan nilai p'_1 ,

1. Jika, $p'_1 < p'_c$

$$S_c = C_s \frac{H}{1+e_0} \log \frac{p'_1}{p_0}$$

2. Jika, $p'_1 > p'_c$

$$S_c = C_s \frac{H}{1+e_0} \log \frac{p'_c}{p_0} + C_c \frac{H}{1+e_0} \log \frac{p'_1}{p'_c}$$

Dimana :

- Sc = Penurunan konsolidasi primer (m)
- Hi = Tebal sub lapisan (m)
- Po (i) = Tekanan efektif overbuden untuk sub lapisan ke-i (kN/m²)
- Δp (i) = Penambahan tekanan vertikal untuk sub lapisan ke-i (kN/m²)
- eo = Angka Pori awal
- Cc = Indek pemampatan
- Δe = perubahan angka pori
- H = tebal lapisan tanah

2.4.7. Konsolidasi Sekunder

Menurut Bowles J.E (1991), perubahan bentuk partikel tanah yang memiliki sifat plastis menyebabkan tanah tetap mengalami penurunan meskipun setelah tekanan air pori mencapai. Tahapan itu dikenal sebagai *secondary consolidation*.

$$C_{\alpha} = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta e}{\log(t_2/t_1)} \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana :

- C_α = Indeks pemampatan sekunder
- Δe = Perubahan angka pori
- t₁, t₂ = time/waktu

Untuk mencari konsolidasi sekunder menggunakan rumus :

$$C_{\alpha} = \frac{\Delta e}{\cos(t_2/t_1)} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana :

- C_α = Indeks pemampatan sekunder
- Δe = Perubahan angka pori
- t₁, t₂ = time/waktu

$$S_s = C'_{\alpha} \log(t_2/t_1) = \frac{\Delta e}{\cos(t_2/t_1)} \dots\dots\dots (2.12)$$

- S_s = Nilai konsolidasi sekunder
- C' _α = C _α / (1+e_p)
- E_p = angka pori pada akhir konsolidasi primer
- H = Tebal lapisan lempung

2.4.8.Indek Pemampatan (C_c)

Indeks pemampatan digunakan untuk menghitung besarnya penurunan yang terjadi di lapangan akibat proses konsolidasi. Terzaghi dan Peck (1967) merekomendasikan penggunaan persamaan empiris berikut ini untuk menghitung indeks pemampatan tersebut.

Rumusan tanah lempung yang struktur tanahnya tidak terganggu yaitu:

$$C_c = 0,009 (LL - 10) \dots\dots\dots (2.13)$$

Rumusan tanah lempung yang dibentuk kembali (remolded)

$$C_c = 0,007 (LL - 10) \dots\dots\dots (2.14)$$

Tabel 2.13. Hubungan untuk Indeks Pemampatan, C_c

Persamaan	Acuan	Daerah Pemakaian
$C_c = 0.007 (LL - 7)$	Skempton	Lempung yang terbentuk kembali (remolded)
$C_c = 0.01 W_n$		Lempung Chicago
$C_c = 1.15 (e_0 - 0.27)$	Nishida	Semua lempung
$C_c = 0.30 (e_0 - 0.27)$	Hough	Tanah kohesif anorganik: lanau, lempung berlanau, lempung
$C_c = 0.0115 W_n$		Tanah organik, gambut, lanau organik, dan lempung
$C_c = 0.0046 (LL - 9)$		Lempung Brazilia
$C_c = 0.75 (e_0 - 0.5)$		Tanah dengan plastisida rendah
$C_c = 0.208e_0 + 0.0083$		Lempung Chicago
$C_c = 0.156e_0 + 0.0107$		Semua lempung

Tabel 2.14. Pemampatan dan Pengembang Tanah Asli

Tanah	Batas Cair	Batas Plastis	Indeks Pemampatan C_c	Indeks Pengembang C_s
Lempung Boston Blue	41	20	0.35	0.07
Lempung Chicago	60	20	0.4	0.07
Lempung Ft. Gordon Georgia	51	26	0.12	
Lempung New Orleans	80	25	0.3	0.05
Lempung Montana	60	28	0.21	0.05

2.4.9.Indek Pengembang/*Swelling* (C_s)

Indek pengembang/*Swelling* umumnya dapat ditentukan di labotarium.

$$C_s = 1/5 - 1/10 C_c \dots\dots\dots (2.15)$$

2.4.10. Waktu Konsolidasi

Teori pertama yang digunakan dalam menghitung konsolidasi 1D pada lempung jenuh air diusulkan oleh Terzaghi. Dalam proses perhitungan tersebut, terdapat beberapa asumsi yang diterapkan (Tailor,1948):

1. Campuran tanah dan air memiliki sifat yang sama di seluruh bagian.
2. Tanah dalam kondisi jenuh
3. Air tidak bisa dikompresi atau dipadatkan
4. Partikel tanah juga tidak bisa dikompresi
5. Proses penyesuaian dan aliran air hanya terjadi secara vertikal
6. Hukum Darcy digunakan untuk menggambarkan aliran air dalam tanah

Jika lapisan lempung terletak diantara dua lapisan pasir, diberikan tambahan tekanan sebesar ΔP , maka tekanan air pori pada lapisan lempung akan bertambah. Untuk konsolidasi satu dimensi, air pori akan mengalir keluar secara vertikal, yaitu pada lapisan pasir. Perbedaan antara kecepatan aliran air yang keluar dan yang masuk sama dengan perubahan volume tanah.

Selama konsolidasi, kecepatan perubahan volume tanah adalah sama dengan kecepatan perubahan volume pori. Perubahan angka pori (e) terjadi karena penambahan tegangan efektif. Dengan anggapan bahwa penambahan tegangan efektif sebanding dengan pengurangan tekanan air pori. Hubungan antara waktu konsolidasi dan faktor waktu dapat dilihat pada persamaan 2.5.

Koefisien konsolidasi vertikal (C_v) menentukan kecepatan pengaliran air pada arah vertical dalam tanah. Ada dua metode yang dapat digunakan untuk memperoleh koefisien konsolidasi yaitu metode logaritma waktu (Casagrande dan Fedum, 1940) dan metode akar waktu (Taylor, 1982)

$$T_v = \frac{C_v . t}{H_{dr}^2} \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana:

t = Waktu konsolidasi (s)

T_v = Faktor waktu

H_{dr} = Tinggi tanah yang terkonsolidasi (m)

c_v = Koefisien Konsolidasi untuk Arah Vertikal (cm^2/s)

Variasi derajat konsolidasi rata-rata terhadap faktor waktu yang tak berdimensi, diberikan dalam tabel 2.15, yang berlaku untuk keadaan di mana u_0 adalah sama untuk seluruh kedalaman lapisan yang mengalami konsolidasi.

Untuk nilai faktor waktu T_v , dapat digunakan grafik berikut:

Tabel 2.15. Variasi Faktor Waktu Terhadap Derajat Konsolidasi

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

Derajat konsolidasi (U) yaitu perbandingan antara penurunan tanah yang terjadi pada suatu waktu tertentu dengan penurunan tanah total.

Pada kondisi pemampatan 90%, $T_{90} = 0,848$. Maka

$$T_{90} = \frac{c_v t_{90}}{H^2 dr} \dots \dots \dots (2.17)$$

Atau

$$C_v = \frac{0.848 H^2 dr}{t_{90}} \dots \dots \dots (2.18)$$

Perhitungan selanjutnya untuk menghitung C_v pada tanah berlapis dengan tebal berbeda, waktu konsolidasi bisa dicari dengan rumus berikut:

$$C_v \text{ gabungan} = \frac{(H_1+H_2+H_3+\dots+H_n)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}} + \frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}} + \dots + \frac{H_n}{\sqrt{C_{vn}}}\right)^2} \dots \dots \dots (2.19)$$

2.5. Perbaikan Tanah Lunak

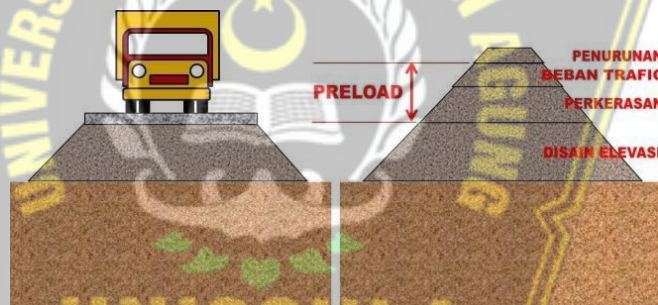
Tanah lunak sering menjadi masalah dalam bidang konstruksi. Komposisi tanah lunak terdiri dari banyak air dan udara di dalam pori-porinya. Hal ini membuat daya dukung tanah menjadi berkurang. Daya dukung yang rendah bisa menyebabkan kerugian besar, terutama dalam meningkatkan biaya konstruksi. Tanah lunak terdiri dari butir halus seperti tanah liat atau pasir halus. Sifatnya adalah memiliki gesekan yang rendah, kemampuan yang tinggi, permeabilitas yang kecil, serta daya dukung yang lebih rendah dibandingkan dengan tanah liat lainnya.

2.5.1. Timbunan *Preloading*

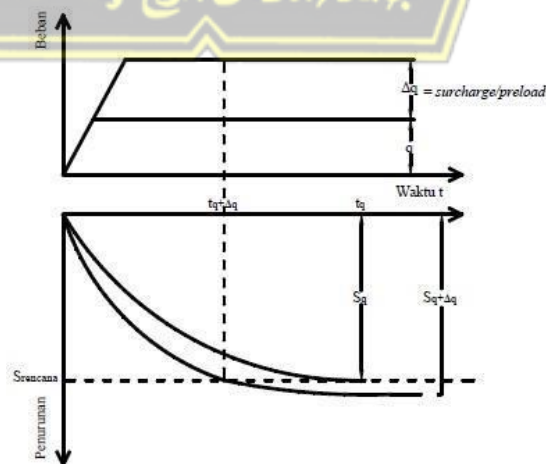
Preloading adalah metode timbunan untuk menggantikan beban yang akan bekerja nantinya setelah konstruksi. Di beberapa kasus, tinggi dari timbunan ditentukan berdasarkan nilai penurunan tanah, sehingga tanah yang ditimbun tidak terbuang percuma dan bisa digunakan sebagai pondasi bangunan.

Tujuan *preloading* adalah untuk meningkatkan kekuatan dukung tanah serta mengurangi kemampuan tanah lunak untuk mengalami kompresi. *Preloading* juga mampu meminimalisir tingkat *settlement* yang terjadi serta mencegah perbedaan penurunan di berbagai bagian tanah.

Dalam metode *preloading* dengan menggunakan timbunan, agar terjadi konsolidasi sesuai dengan yang direncanakan, ketinggian timbunan harus dipertimbangkan secara tepat. Umumnya, tinggi timbunan berada dalam rentang 3 hingga 8 meter, sedangkan besarnya penurunan yang terjadi biasanya berkisar antara 0,3 hingga 2 meter.



Gambar 2.6. Sketsa timbunan preloading



Gambar 2.7. Perbandingan waktu dan penurunan preloading tanpa dan dengan surcharge

Pada saat pelaksanaan, penetapan tinggi awal harus memperhatikan adanya penurunan yang akan terjadi.

1. Tinggi Timbunan Awal ($H_{initial}$)

Tinggi timbunan pada saat pekerjaan tidak sesuai dengan tinggi timbunan yang direncanakan. Untuk menentukan tinggi timbunan yang direncanakan, perlu diperhatikan tingkat pemampatan yang terjadi pada tanah asli. Untuk menghitung tinggi awal timbunan ($H_{initial}$), digunakan persamaan berikut:

$$q = (H_{initial} - S_c)\gamma_{timb} + S_c\gamma'_{timb} \quad (2.20)$$

$$q = (H_{initial} \times \gamma_{timb}) - (S_c \times \gamma_{timb}) + S_c\gamma'_{timb} \quad (2.21)$$

$$H_{initial} = \frac{(q + (S_c \times \gamma_{timb}) + (S_c\gamma'_{timb}))}{\gamma_{timb}} \quad (2.22)$$

$$H_{akhir} = H_{initial} - S_c \quad (2.23)$$

Dimana :

$H_{initial}$ = Tinggi Timbunan Awal

H_{akhir} = Tinggi Timbunan Akhir

S_c = Total Pemampatan Tanah Akibat Timbunan H

γ'_{timb} = Berat Volume Efektif Material Timbunan

Bila $\gamma_{sat} = \gamma_{timb}$, maka:

$$q = (H_{initial} \cdot \gamma_{timb}) - S_c \times \gamma_w \quad (2.24)$$

$$H_{initial} = \frac{q + S_c \times \gamma_w}{\gamma_{timb}} \quad (2.25)$$

2. Penentuan Tinggi Kritis (H_{cr})

Tinggi kritis digunakan sebagai beban awal pada *preloading*. Untuk menghitung tinggi timbunan kritis di atas permukaan air yang ada di atas permukaan tanah, kita menggunakan persamaan berikut:

$$H_{cr} = \frac{SF + C_u \times N_c}{\gamma_{timb}} \quad (2.26)$$

Dimana :

N_c = Faktor Kapasitas Daya Dukung

$\gamma_{timbunan}$ = Berat Volume Tanah Timbunan (t/m^3)

H_{cr} = Tinggi Timbunan Kritis (m)

2.5.2. Pemberian timbunan dengan sistem bertahap

Beban yang ditimbun direncanakan berdasarkan beban yang akan terjadi pada tanah asli, yang menyebabkan proses konsolidasi, serta berdasarkan ketinggian rencana akhir. Untuk menempatkan timbunan di atas tanah dasar, daya dukung tanah tersebut harus diperhatikan agar tidak terjadi longsoran.

Pembebanan bertahap bertujuan untuk memberikan nilai keamanan yang aman yaitu 1 selama proses penimbunan. Besarnya beban preloading yang diberikan dapat ditentukan lebih dulu, lalu dibandingkan dengan tinggi timbunan yang dapat ditahan oleh tanah dasar, yaitu H kritis (H_{cr}).

Tahapan pemberian *preloading* secara bertahap yaitu :

- a) Menghitung pemampatan yang terjadi akibat timbunan tahap 1.
- b) Menghitung besar pemampatan dengan perhitungan dan ketentuan berikut:

- Jika $p'_o + \Delta p_1 \leq p_c$

$$S_c = C_s \frac{H}{1+e_o} \log \left(\frac{p'_o + \Delta p_1}{p'_o} \right) \dots\dots\dots (2.27)$$

- Jika $p'_o + \Delta p_1 + \Delta p_2 \geq p_c$

$$S_c = C_s \frac{H}{1+e_o} \log \left(\frac{p'_c}{p'_o + \Delta p_1} \right) + C_c \frac{H}{1+e_o} \log \left(\frac{p'_o + \Delta p_1 + \Delta p_2}{p'_o + \Delta p_1} \right) \dots\dots\dots (2.28)$$

- Jika $p'_o + \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 > p_c$

$$S_c = C_c \frac{H}{1+e_o} \log \left(\frac{p'_o + \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3}{p'_o + \Delta p_1 + \Delta p_2} \right) \dots\dots\dots (2.29)$$

Dimana:

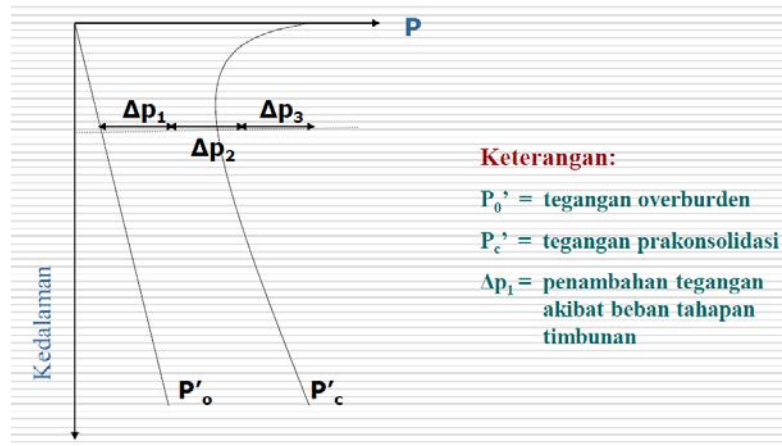
C_c = indek pemampatan

C_s = indek pemuaian

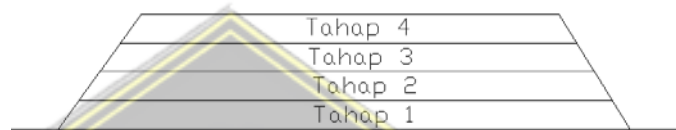
P'_o = tegangan efektif *overburden*

Δp = tambahan tegangan vertical

- c) Membuat diagram penurunan yang diakibatkan beban bertahap untuk menentukan waktu yang dibutuhkan dalam menyelesaikan penurunan konsolidasi.



Gambar 2.8. Diagram Tegangan Untuk Pentahapan Penimbunan



Gambar 2.9. Pembebanan Bertahap

2.6. Percepatan Waktu Konsolidasi

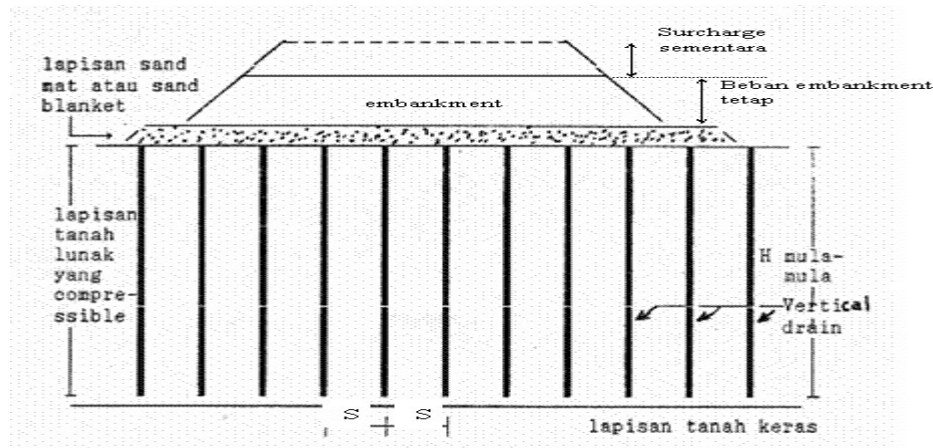
Jika ternyata pemampatan yang direncanakan membutuhkan waktu yang terlalu lama, maka diperlukan upaya mempercepat proses konsolidasi tanah. Salah satu cara untuk mempercepat waktu konsolidasi adalah dengan menempatkan *Vertical Drain*.

2.6.1. Vertical Drain

Fungsi *vertical drain* digunakan pada lapisan tanah lempung yang dapat dikompresi yaitu untuk membantu proses konsolidasi primer agar lebih cepat. Metode perbaikan tanah menggunakan *vertical drain* secara dasar bertujuan agar mengurangi waktu pelaksanaan ketika terjadi pekerjaan timbunan bertahap serta mempercepat waktu untuk mencapai tingkat konsolidasi yang diinginkan.

2.6.2. Menentukan Kedalaman PVD

Pemasangan PVD dapat ditentukan dari ketebalan tanah lunak seperti gambar di bawah ini, yaitu sedalam H tanah. Perencanaan pvd di pasang sampai kedalaman NSPT < 10.



Gambar 2.10. Pemasangan Vertical Drain pada kedalaman lapisan compressible

2.6.3. Menentukan Waktu Konsolidasi

Untuk menentukan waktu konsolidasi didasarkan pada teori aliran air vertikal didalam kolom pasir Barron (1948) menggunakan teori Terzaghi tentang konsolidasi satu dimensi. Teori ini menjelaskan hubungan antara waktu, ukuran saluran drainase, jarak antar drainase, koefisien konsolidasi, dan tingkat rata-rata konsolidasi. Cara menentukan waktu konsolidasi menurut teori Barron (1948) yaitu:

$$t = \left(\frac{D^2}{8Ch} \right) F(n) \ln \left(\frac{1}{1-\bar{u}_h} \right) \quad \dots \dots \dots (2.30)$$

Dimana:

t : waktu

D : diameter equivalen didaerah pengaruh PVD.

D : 1,13 x S (pola bujur sangkar)

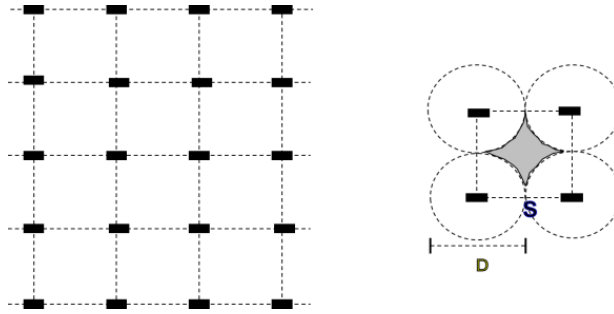
D : 1,05 x S (pola segitiga)

Ch : koefisien konsolidasi arah horisontal (kh/kv). Cv

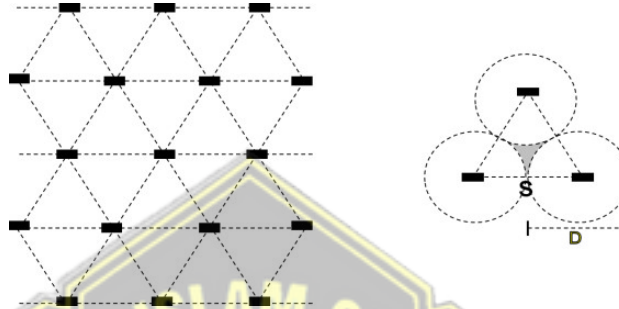
Kh/kv=perbandingan koefisien permeabilitas arah horisontal dan vertikal, pada tanah lempung jenuh air. Nilai (kh/kv) antara 2 s/d 5.

F(n) = faktor nilai hambatan karena jarak antar PVD

\bar{u}_h = derajat konsolidasi arah horisontal



Gambar 2.11. Pola Pemasangan Bujur Sangkar, $D = 1,13 S$



Gambar 2.12. Pola Pemasangan Segitiga, $D = 1,05 S$

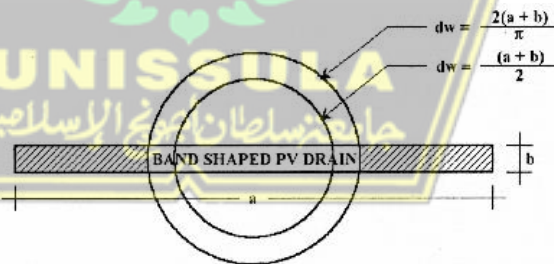
Nilai $F(n)$ didefinisikan sebagai berikut:

$$F(n) = \left(\frac{n^2}{n^2 - 1^2} \right) \left[\ln(n) - \left(\frac{3n^2 - 1}{4n^2} \right) \right] \dots\dots\dots (2.31)$$

Atau

$$F(n) = \left(\frac{n^2}{n^2 - 1^2} \right) \left[\ln(n) - 3/4 - \left(\frac{1}{4n^2} \right) \right] \dots\dots\dots (2.32)$$

Dimana:



Gambar 2.13. Equivalen diameter (dw) untuk PVD

Secara umum $n > 20$ sehingga $1/n = 0$ dan $\left(\frac{n^2}{n^2 - 1^2} \right) \approx 1$

Maka:

$$F(n) = \ln(n) - 3/4 \dots\dots\dots (2.33)$$

$$F(n) = \ln(D/dw) - 3/4 \dots\dots\dots (2.34)$$

Hansbo. (1979) menetapkan waktu untuk konsolidasi menggunakan rumus berikut:

$$t = \left(\frac{D^2}{8ch} \right) (2 \cdot F(n)) \cdot \ln \left(\frac{1}{1-U_h} \right) \dots\dots\dots (2.35)$$

Dimana:

t = waktu yang diperlukan untuk mencapai U_h

D = diameter lingkaran

F(n) = faktor hambatan disebabkan karena jarak PVD

Ch = koefisien konsolidasi tanah horisontal

U_h = derajat konsolidasi tanah (arah horisontal)

Selain konsolidasi akibat aliran pori arah horisontal juga terjadi konsolidasi akibat aliran air arah vertikal U_v . Harga U_v dicari dengan persamaan:

Jika $U_v > 60\%$, maka

$$U_v = (100 - 10^\alpha)$$

Dimana:

$$\alpha = \frac{1.781 - Tv}{0.933}$$

$$\pi = 3.14$$

Jika U_v antara 0 s/d 60%, maka

$$U_v = \left(2 \sqrt{\frac{tv}{\pi}} \right) \times 100\% \dots\dots\dots (2.36)$$

Dan jika nilai $Tv = \frac{t \times C_v}{(HDr)^2}$, maka

Derajat Konsolidasi rata-rata U dapat dicari dengan persamaan:

$$U = [1 - (1 - U_h)(1 - U_v)] \times 100\% \dots\dots\dots (2.37)$$

2.7. Analisa Stabilitas Timbunan dengan Software

Analisis berbagai masalah geoteknik yang terjadi dalam perencanaan sipil bisa lebih mudah dilakukan dengan menggunakan program pemodelan dan *postprocessing* metode elemen hingga software Plaxis. Metode ini dapat menampilkan regangan dalam kondisi dua dimensi atau secara simetris pada sumbu tertentu, sehingga mencerminkan kondisi nyata secara tepat. Pengguna dapat dengan cepat membuat model geometri dan jaring elemen

untuk memperlihatkan penampang lintang dari kondisi yang ingin dianalisis, dengan bantuan antarmuka grafis yang sederhana dan mudah digunakan.

Parameter-parameter yang digunakan pada program ini yaitu:

- a) Berat Volume Tanah Kering (γ dry)
- b) Berat Volume Tanah Basah / (γ wet)
- c) Permeabilitas Arah Horizontal / (k_x)
- d) Permeabilitas Arah Vertikal / (k_y)
- e) Modulus Young's (E),
- f) Poisson's Ratio (ν)
- g) *Cohesion* (c)
- h) Sudut Geser (ϕ)
- i) Sudut Dilatasi (ψ)

Program ini mencakup:

1. *Input*
2. *Calculation*
3. *Output*
4. *Curve*

Program akan memberi peringatan apabila terdapat masukan yang dibutuhkan tetapi tidak dilakukan. Penting untuk di pahami pada saat perubahan pada model geometri yang sudah ada memerlukan penyusunan ulang jaring elemen hingga, dan jika diperlukan, kondisi awal juga harus ditentukan ulang agar sesuai dengan model yang telah diubah. Hal ini akan dicek oleh program.

2.8. Kajian Hasil Penelitian Terdahulu

2.8.1. Jurnal penelitian serupa

Tabel 2.16. Tabel Penelitian Terdahulu

No	Judul	Peneliti & Tahun	Hasil Penelitian
1	Analisis Perbaikan Tanah Lunak Metode Preloading Kombinasi Prefabricated Vertical Drain dengan Variasi Spasi Pemasangan PVD (Studi Kasus: Jalan Tol Indralaya – Prabumulih, Sumatera Selatan)	Citra Puspita Lestari, Erdina Tyagita Utami, Julita Hayati, Syahidus Syuhada (2022)	1. Penurunan yang terjadi pada tanah dasar tidak jauh berbeda untuk kondisi dengan dan tanpa PVD. 2. Pemasangan PVD menyebabkan waktu yang dibutuhkan untuk konsolidasi dapat direduksi.
2	Perbaikan Tanah Lempung Lunak Dengan Metode Prefabricated Vertical Drain (PVD)	Rifki Ali, Sri Wulandari (2020)	1. Waktu konstruksi yang dibutuhkan untuk timbunan Preloading antara 14 hari sampai 126 hari. 2. Metode vakum yang dikombinasikan beban

No	Judul	Peneliti & Tahun	Hasil Penelitian
			Preloading, diperlukan waktu konstruksi antara 6 sampai 14 hari.
3	Evaluasi Kinerja Perbaikan Tanah Lunak Dengan Menggunakan Preloading Dan Prefabricated Vertical Drain (PVD)	Zahra Febrina Lilabsari, As'ad Munawir, Yulvi Zaika, Wahyu P. Kuswanda (2018)	Penurunan secara aktual lebih kecil dari pada penurunan teoritis dengan nilai perbandingan tiap SP rata-rata sebesar 0.862
4	Evaluasi Metode Perbaikan Tanah Lunak dengan Preloading Kombinasi PVD-PHD pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Semarang-Demak Paket II	Irvita Asri Aini, Eggy Ihza Maulana, Hinawan Teguh Santoso (2023)	Perbedaan yang signifikan antara waktu tunggu konsolidasi perencanaan dan pelaksanaan, yaitu lebih cepat 28 hari (14,70%) dari perkiraan
5	Pemodelan Perbaikan Tanah Lempung Lunak Menggunakan <i>Vacuum Preloading</i>	Hamdhan, Rahmanisa (2023)	Efektivitas mengurangi waktu penurunan sebesar 95%-96%. Metode preloading ini menyebabkan perpindahan lateral ke arah luar dari, sedangkan vacuum ke arah dalam.
6	Penerapan Soil Preloading, PVD dan PHD untuk Analisis Penurunan Konsolidasi Tanah	Citra Kusuma A, Yelvi, Azmi Lisani W, Handi Sudardja, Maeley M. (2023)	Pola segitiga PVD dengan jarak antar PVD sekitar 1 meter
7	Perbaikan Tanah Lempung Lunak dengan Metode Preloading pada Jalan Tol Palembang – Indralaya STA 1+670	Enita Suardi, Liliwarti, Merley Misriani, Ibnu Iqbal (2021)	Penurunan tanah dasar nya mencapai 1,556meter dengan tinggi rencana timbunan (beban preloading) 5 meter. Waktu untuk mencapai derajat pemampatan 90% adalah 2,149 tahun.
8	Perencanaan Preloading Dengan Penggunaan Prefabricated Vertical Drain Untuk Perbaikan Tanah Lunak Pada Jalan Tol Pejagan-Pemalang	Athaya Zhafirah, Dewi Amalia (2019)	1. Elevasi eksisting = 6.30 m; elevasi rencana = 14.41 m. Tinggi timbunan rencana = 8.10 m. 2. Penurunan yang terjadi 2.122 m dengan waktu konsolidasi 90% selama 38.49 tahun. Tinggi timbunan pada saat pelaksanaan akhir adalah 11.0 m.
9	Research on the acceleration of settlement by installing vertical drain and preloading with sand	Rudy Purwondho, Rihansjah Djohan (2018)	1. Dari instrumentasi geoteknik, penurunan rata-rata (S) 135,50 cm yaitu 95.22 % dari perhitungan teoritis, (Se) 142.30 cm untuk periode 4 bulan. 2. Dari hasil perhitungan kurva penurunan, setelah mencapai ketinggian 1.423 m terlihat penurunan bahwa garis kurvanya hampir datar.
10	The Improvement of Soft Soil Layer for Toll Road Embankment On Java North Shore A Study Case On Jalan Tol Pejagan Pemalang	Dito Senna Hardiman, Rinda Karlisari (2015)	Metode perbaikan tanah menunjukkan kinerja yang baik dan bisa menjadi solusi alternatif perbaikan tanah lunak pada konstruksi tanggul jalan.
11	Comparison of measured and calculated consolidation settlements of thick underconsolidated clay	Manal Salem, Rami El-Sherbiny (2013)	Hasil dari studi ini menegaskan bahwa endapan tanah lempung mengalami underkonsolidasi, yang menimbulkan masalah geoteknik.

No	Judul	Peneliti & Tahun	Hasil Penelitian
12	Stress History Estimation Method of Underconsolidated Soil by Partial Piezocone Dissipation Tests [12]	Songyu Liu, Jun Ju, Guojun Cai & Zhibin Liu (2014)	OCR tanah underconsolidated dapat diketahui langsung dari uji disipasi piezokon
13	Effectiveness of soil improvement for deep excavation in underconsolidated soil: A case study	Yoshua Thendar, Aswin Lim, and Ryan Alexander Lyman (2023)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Hasil analisis menunjukkan bahwa panjang dinding bisa menjadi lebih pendek dari panjang yang dibangun. 2. Jet grouting yang digunakan di belakang dinding sisi kiri berhasil mengurangi defleksi dan penurunan. 3. Deep Cemen Mixing semen hanya mempunyai efek kecil pada defleksi dan settlement.
14	Perbaikan Tanah Lempung Lunak Metoda Preloading Pada Pembangunan Infrastruktur Transportasi di Kalimantan	Wahyu P. Kuswanda (2016)	Perbaikan tanah lempung lunak metoda preloading dengan penggunaan PVD yang menerapkan sistem kontrak berbasis kinerja (performance base contract).
15	Analisis Balik Kurva Penurunan terhadap Waktu pada Pekerjaan Reklamasi dengan Metode Elemen Hingga dan Evaluasi Derajat Konsolidasi Tanah Lunak Berdasarkan Hasil Monitoring Settlement Beacon	Aflizal Arafianto, Glenn Adriel Adiguna, Siska Rustiani	Berdasarkan hasil perhitungan dengan ketiga metode tersebut, maka diperoleh derajat konsolidasi pada area studi adalah berkisar 94.7-97.5%

Tanah pondasi di wilayah pesisir timur Port Said yang diselidiki menimbulkan tantangan geoteknik karena adanya endapan tanah liat dalam yang tebal dan tidak terkonsolidasi. Endapan tanah liat ini memaparkan potensi kegiatan konstruksi terhadap tantangan pemukiman yang berlebihan serta konsekuensi keselamatan dan kemudahan servis yang terkait.

Penghitungan penurunan konsolidasi dari endapan tebal tanah liat berlumpur yang sangat lunak hingga sedang dengan ketebalan sekitar 35 m di bawah terminal peti kemas yang terletak di sebelah timur Port Said di Mesir dibandingkan dengan pengukuran lapangan yang dicatat selama periode dua tahun. Sifat-sifat tanah liat yang kurang terkonsolidasi dinilai menggunakan pengukuran lapangan dan laboratorium. Penurunan yang terukur selama periode awal dua tahun tampaknya berada dalam kisaran penurunan yang diperkirakan berdasarkan uji lapangan dan laboratorium berdasarkan kisaran muatan kontainer kerja dan kisaran nilai cv yang diprediksi. Kesepakatan antara penurunan yang dihitung dan diukur meningkatkan kepercayaan dalam interpretasi keadaan endapan lempung dalam dan parameter kompresibilitas tanah yang dipilih berdasarkan uji laboratorium dan lapangan. Sampai saat ini, penyelesaian yang dihitung dan penyelesaian aktual tampaknya mengikuti tingkat penyelesaian yang serupa.

Ketinggian permukaan tanah asli mempunyai dampak yang signifikan terhadap penurunan yang dihitung dan penurunan aktual karena secara langsung mempengaruhi tekanan prakonsolidasi endapan tanah. Menilai perilaku konsolidasi dan parameter berdasarkan pengukuran lapangan untuk lokasi situs ini memungkinkan pemahaman dan prediksi yang lebih baik mengenai perilaku struktur lain yang dibangun di area terdekat yang direncanakan untuk keperluan industri dengan tanah pondasi yang memiliki karakteristik serupa.

Berdasarkan pada penelitian tentang analisis konsolidasi pada tanah lempung lunak dengan menggunakan metode prefabricated vertical drain (PVD), diperoleh kesimpulan bahwa PVD berperan sebagai saluran yang membantu air pori dalam tanah keluar ke permukaan. Dengan adanya PVD, proses keluarnya air pori menjadi lebih mudah. Untuk hasil yang optimal, PVD perlu dikombinasikan dengan beban, baik berupa tanah timbunan (preloading) maupun kombinasi preloading dan tekanan vakum. Penggunaan PVD dapat mempercepat waktu konsolidasi tanah dibandingkan dengan proses konsolidasi alami tanah tanpa intervensi tersebut.

Jika dengan metode *Preloading*, diperlukan waktu untuk membangun timbunan bertahap agar dapat mencapai daya dukung tanah dasar yang cukup untuk menyangga beban di atasnya. Setelah dilakukan treatment PVD Preloading, nilai faktor keamanan tanah dasar dan timbunan berada dalam rentang 1,36 s/d 1,63 dengan ketinggian timbunan mencapai 7,61 s/d 9,86 meter. Sementara itu, dengan menggunakan metode PVD vakum, nilai faktor keamanan mencapai 1,38 s/d 2,29 dan ketinggian timbunan hanya sekitar 4,67 s/d 6,92 meter. Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa metode vakum lebih efektif meningkatkan faktor keamanan dibanding metode Preloading. Hal ini karena tekanan vakum mampu meningkatkan kekuatan tanah dasar lebih cepat dibanding tekanan dari beban timbunan. Selain itu, metode vakum membutuhkan volume tanah timbunan yang lebih sedikit dibanding metode Preloading, karena tekanan vakum mampu menggantikan kurang lebih 4 meter dari tanah timbunan yang seharusnya dibangun.

Evaluasi dari kinerja perbaikan pada tanah dapat diketahui menggunakan instrument geoteknik seperti settlement plate. Yaitu Perbandingan besarnya penurunan aktual dan teoritis dapat diketahui bahwa penurunan secara aktual lebih kecil dari pada penurunan teoritis. Kemudian diolah menggunakan metode Asaoka diketahui dan besar prediksi penurunan akhir pada SP yang ditinjau adalah sebesar 1.457,69 mm, 2.694,3 mm, 2.495,18 mm, 1.533,89 mm dan 2.774,35 m. Penurunan masih akan terus berjalan sekitar 6 – 43 hari dengan penurunan yang akan terjadi berkisar 100 – 450 mm.

Evaluasi lain yang dapat digunakan adalah menggunakan piezometer. Pada akhir pembacaan Piezometer derajat konsolidasi yang telah tercapai adalah sebesar 85.359% dan derajat konsolidasi rata-rata dari bacaan Settlement Plate sebesar 88,416%

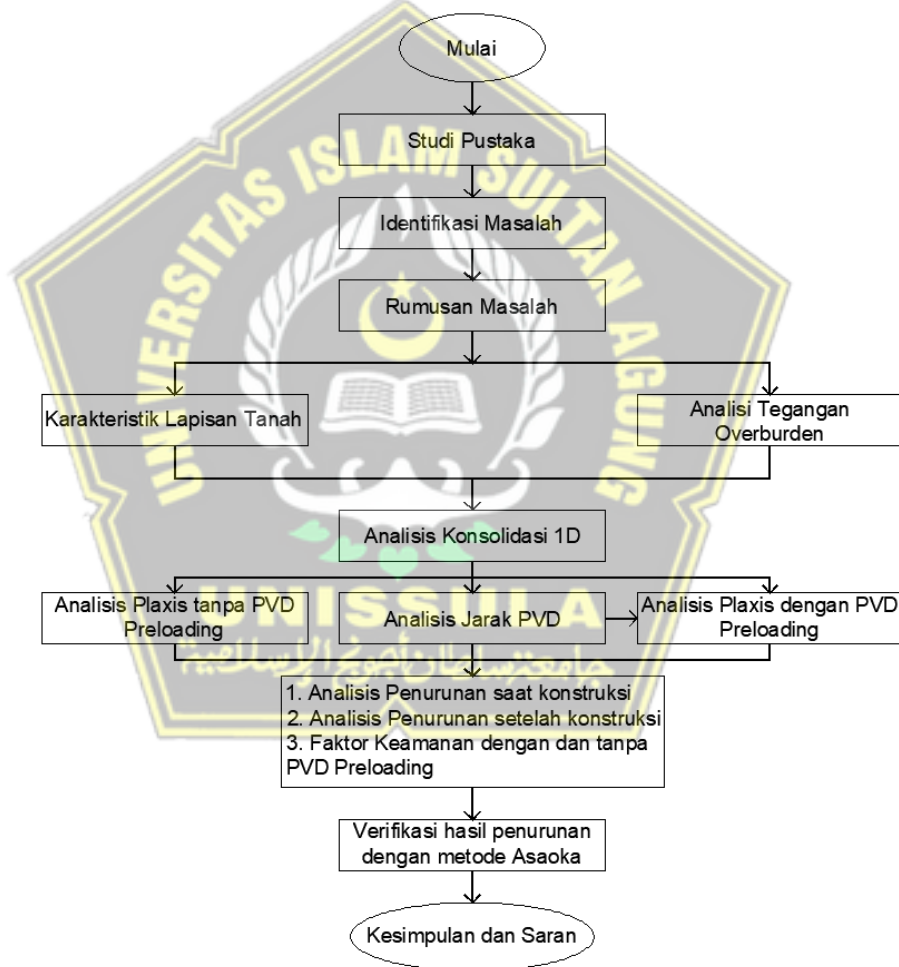


BAB III

METODE PENELITIAN

1.1. Tahapan Penelitian

Tahap yang dilakukan pada penelitian ini diharakan sesuai dengan tujuan yang diinginkan. Dalam penelitian ini dilakukan pengumpulan data yang kemudian akan diolah dengan metoda perhitungan manual maupun menggunakan software geoteknik, sehingga penurunan yang terjadi pada proyek pembangunan jalan tol serpong balaraja dapat diketahui. Langkah – Langkah dalam penelitian ini seperti gambar berikut:

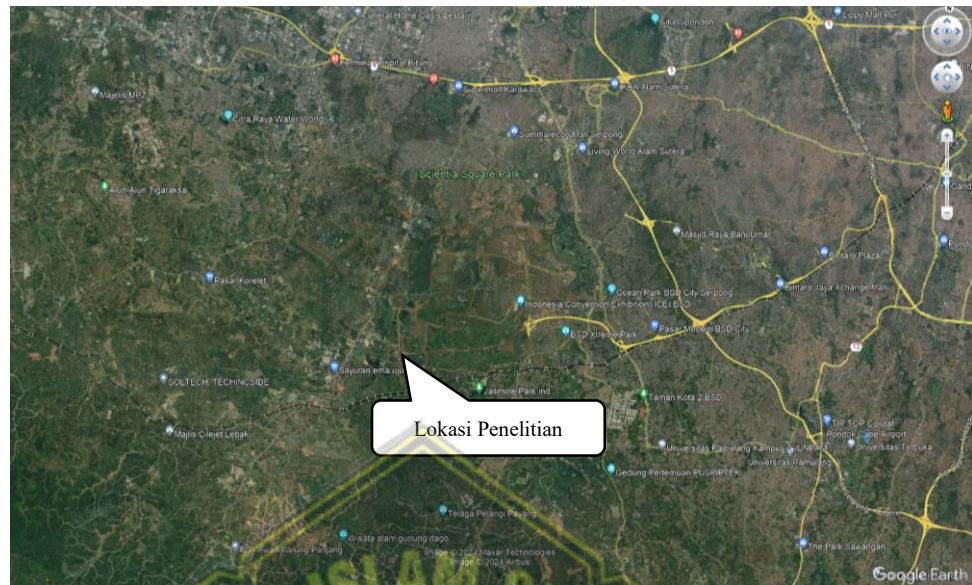


Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

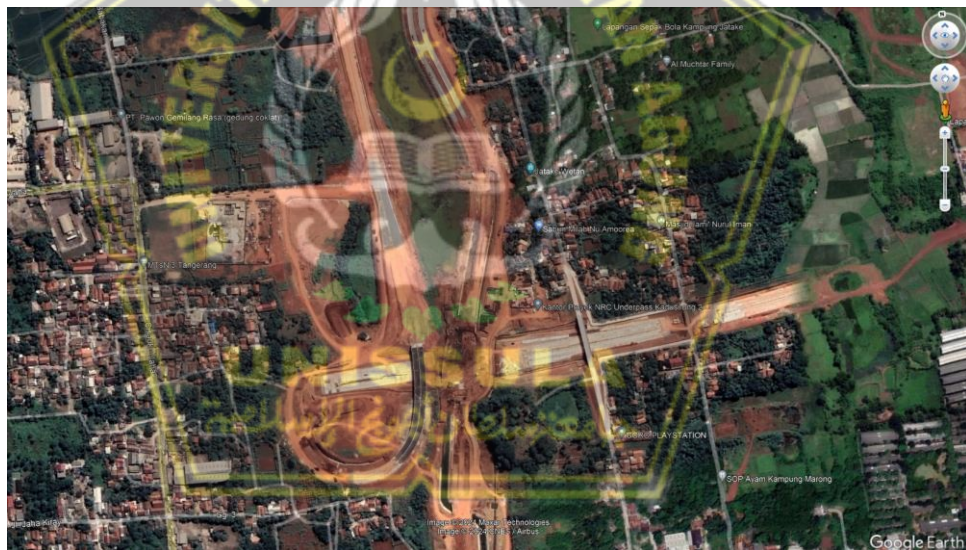
1.2. Lokasi Penelitian

Lokasi untuk penelitian yang akan digunakan dalam studi kasus tesis ini dilakukan pada proyek jalan tol Serbaraja 1B tepatnya data diambil di

daerah Legok, Tangerang, Banten. Lokasi Penelitian bisa di lihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.2. Lokasi Penelitian



Gambar 3.3. Detail Lokasi Penelitian

1.3. Metode Pengumpulan Data

3.2.1. Data Primer

Data primer adalah data yang diperoleh langsung di lapangan oleh dari orang yang bersangkutan melalui wawancara, survei, dan sebagainya. Data primer merupakan data yang perlu diolah kembali. Namun, data merupakan data yang cukup valid karena mendapatkan datanya dari sumber utama.

Sehingga untuk mendapatkan data tersebut harus dapat mencari narasumber yang tepat.

a. Data Borlog

Borlog, atau Standard Penetration Test (SPT), adalah metode pengujian tanah yang lebih tradisional. Dalam pengujian ini, sebuah bor dibor ke dalam tanah hingga kedalaman tertentu, dan palu jatuh digunakan untuk menumbuk pipa bor. Penyelidikan tanah ini adalah untuk mempelajari stratigrafi, susunan dan kekuatan lapisan tanah bawah permukaan, sifat fisik dan teknis tanah, serta sifat-sifat daya dukung tanah

b. Data CPT/CPTu

Sondir, atau Cone Penetration Test (CPT), adalah metode pengujian tanah yang melibatkan penyisipan sebuah konus logam dengan ujung runcing ke dalam tanah. Alat ini dilengkapi dengan sensor untuk mengukur tahanan penetrasi serta tekanan geser atau lateral yang terjadi selama penetrasi. Pengujian ini mengukur resistensi penetrasi tanah terhadap konus, serta mencatat perubahan tekanan pada alat selama penetrasi. Sedangkan Cone Penetration Test with pore pressure (CPTu) adalah uji yang sama dengan sondir akan tetapi yang menjadi pembeda adalah pada ujung konus yang disertai dengan batu pori yang dapat membaca tekanan air pori.

c. Data Monitoring

Data monitoring yang digunakan adalah settlement plates. Settlement plates adalah suatu alat yang dipakai untuk mengukur penurunan tanah (settlement) pada proyek konstruksi, terutama pada timbunan atau struktur tanah lainnya. Alat ini berguna untuk melihat pergerakan vertikal tanah akibat beban konstruksi, sehingga dapat mengidentifikasi potensi masalah seperti penurunan yang berlebihan atau tidak stabil.

3.2.2. Data Sekunder

Data sekunder adalah sekumpulan informasi yang telah ada sebelumnya dan digunakan sebagai pelengkap kebutuhan data penelitian. Data sekunder adalah data yang berhubungan dengan informasi dari sumber yang telah ada sebelumnya seperti dokumen-dokumen penting, situs web, buku, dan sebagainya. Data sekunder dapat diperoleh dari data yang dikumpulkan oleh

organisasi maupun individu lain seperti data sensus yang dikumpulkan oleh pemerintah. Data sekunder berupa grafik, diagram, maupun tabel.

1.4. Analisis Data

3.5.1. Analisis dengan Metode konsolidasi 1D

Analisis dengan metode manual yaitu dengan menggunakan rumus – rumus konsolidasi 1 dimensi dengan menggunakan parameter – parameter tanah yang sudah dikorelasi sebelumnya dilakukannya sebelum konstruksi atau konsolidasi.

Data yang didapatkan untuk kondisi sebelum konsolidasi adalah pengujian CPT, N-SPT, dan pengujian laboratorium. Data ini kemudian dilakukan interpretasi untuk mengetahui karakteristik tanah pada lokasi penelitian.

Uji konsistensi data adalah untuk menyederhanakan kondisi aktual di lapangan sedemikian rupa sehingga dapat dianalisis perilaku tanahnya. Data yang memiliki penyimpangan pola dapat diketahui dari analisis ini. Data yang dilakukan uji konsistensi adalah nilai berat isi tanah, angka pori, koefisien konsolidasi, dan kuat geser tanah.

Tanah dengan zona yang sama memiliki sifat-sifat yang sama dan memungkinkan untuk dikelompokkan atau digolongkan menjadi sebuah area atau lapisan yang tunggal dengan sifat-sifat tertentu dan dapat digunakan dalam analisis.

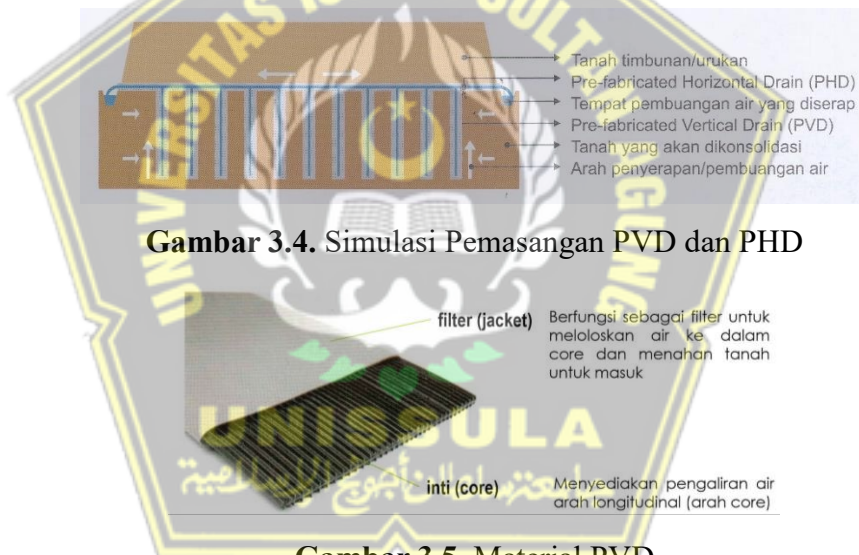
Data yang telah dikumpul dilakukan korelasi untuk mengetahui hubungan antar parameter tanah. Pola yang terbentuk dapat dijadikan acuan untuk memperkirakan besar suatu parameter tanah pada lokasi penelitian.

Korelasi yang dilakukan meliputi hubungan antara nilai koefisien konsolidasi (cc) dengan angka pori (e), water content (w), rasio kompresi (cr), Atterberg Limit. Untuk hasil pengujian CPT pada tanah dengan perilaku clay dilakukan korelasi antara nilai tahanan selimut konus (f_s) dengan tahanan ujung konus (q_c).

Sehingga dari data – data tersebut nantinya dapat diketahui besarnya konsolidasi yang akan terjadi pada lokasi yang akan dikaji.

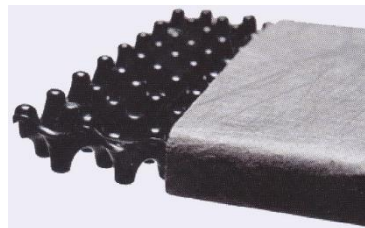
3.5.2. Percepatan Konsolidasi dengan PVD dan PHD

Percepatan konsolidasi tanah menggunakan kombinasi PHD dan PVD menjadi salah satu solusi terbaik dalam bidang geoteknik. Kombinasi dua material ini telah terbukti efektif dan sering digunakan oleh para ahli profesional di dunia dalam hal penanganan permasalahan geoteknik, khususnya percepatan konsolidasi tanah. Dalam tujuan untuk mempercepat konsolidasi tanah tersebut, rekayasa geoteknik memerlukan material untuk mengeluarkan air dan udara dalam tanah dengan cepat. Pre-fabricated Vertical Drain (PVD) adalah material yang tepat untuk mengalirkan air sampai ke permukaan tanah asli yang kemudian diteruskan Pre-fabricated Horizontal Drain (PHD) menuju tempat pembuangan air / drainase sehingga konsolidasi tanah dapat tercapai sesuai dengan perhitungan waktu yang telah direncanakan.



Gambar 3.4. Simulasi Pemasangan PVD dan PHD

Gambar 3.5. Material PVD



Gambar 3.6. Material PHD

3.5.3. Analisis Menggunakan Plaxis

Program Komputer PLAXIS merupakan suatu program komputer yang secara khusus ditujukan untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas

dalam masalah-masalah geoteknik. Program komputer PLAXIS yang dikembangkan pada tahun 1987 di **Technical University of Delft** yang merupakan inisiatif dari *Department of Public Works and Water Management* Pemerintah Belanda. Tujuan awalnya adalah untuk mengembangkan suatu program elemen hingga yang mudah digunakan dalam melakukan analisis timbunan sungai yang berada di atas tanah lunak di dataran rendah Belanda. Sekarang ini program komputer PLAXIS telah dikembangkan agar dapat digunakan untuk menganalisis masalah-masalah lain dalam bidang geoteknik.

Dalam suatu analisis geoteknik dengan menggunakan prinsip elemen hingga, diperlukan suatu model tegangan regangan dari tanah untuk mensimulasikan perilaku tidak linier dan ketergantungan terhadap waktu dari tanah. Selain itu karena tanah termasuk multi-phase material, maka perlu diperhitungkan tekanan pori hidrostatik dan non hidrostatik di dalam tanah.

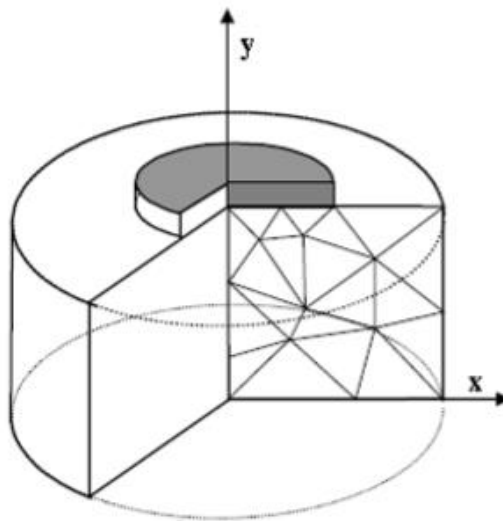
Meskipun pemodelan tanah itu sendiri merupakan suatu hal yang penting, banyak ahli geoteknik dalam melakukan analisis juga memodelkan struktur dan interaksi antara struktur dengan tanah. Untuk mengakomodasi hal tersebut, program komputer PLAXIS dilengkapi dengan kemampuan khusus untuk mengatasi berbagai masalah struktur geoteknik yang kompleks.

a. Regangan Bidang (Plane Strain)

Model plane strain digunakan untuk memodelkan struktur yang penampang sepanjang strukturnya sama serta kondisi tegangan dan beban yang bekerja sepanjang penampang juga sama. Peralihan dalam arah tegak lurus penampang pada model plane strain diasumsikan nol.

b. Aksial Simetri (Axisymmetry)

Model aksial simetri digunakan untuk struktur berbentuk lingkaran yang memiliki penampang dalam arah radial dan kondisi pembebanan di sekeliling sumbu pusat yang seragam. Peralihan dan kondisi tegangan pada model aksial simetri diasumsikan identik dalam arah radial.



Gambar 3.7. Ilustrasi Pemodelan dengan Axisymmetry (PLAXIS V8 Reference Manual, 2002)

3.5.3.1. Masukan dalam Program PLAXIS 2D

Dalam membuat pemodelan perlu ditentukan parameter dan interpretasi data terlebih dahulu sehingga dapat memperoleh hasil yang analisa yang sesuai dengan keadaan sebenarnya.

1. Menentukan Geometri

Langkah pertama yang harus dilakukan dalam masukan program komputer PLAXIS adalah membuat model geometri. Model geometri yang dibuat dalam program komputer PLAXIS harus dapat mewakili kondisi di lapangan. Suatu model geometri terdiri dari titik, garis dan cluster. Dalam program komputer PLAXIS kita dapat memasukkan pembagian lapisan tanah, obyek struktur, tahapan konstruksi, pembebanan, dan kondisi batas pada suatu model geometri. Model geometri harus cukup besar sehingga efek batas dari model tidak mempengaruhi hasil dari masalah yang akan dipelajari. Ada tiga jenis komponen dalam model geometri, yaitu:

a. Titik

Titik merupakan awal dan akhir dari suatu garis. Titik juga dapat digunakan untuk menempatkan jangkar, titik beban, titik perletakan, dan sebagai alat bantu untuk memperhalus elemen suatu daerah.

b. Garis

Garis digunakan untuk membentuk suatu batas dari suatu geometri, batas model, dan ketidakkontinuan dalam geometri seperti pada dinding turap,

pembagian lapisan tanah yang berbeda, dan tahapan konstruksi. Suatu garis dapat memiliki beberapa fungsi atau sifat-sifat garis.

c. Cluster

Cluster adalah suatu daerah yang dikelilingi oleh garis. Program komputer PLAXIS secara otomatis dapat mengenali cluster berdasarkan masukan garis-garis geometri. Di dalam suatu cluster, sifat-sifat tanahnya adalah homogen. Oleh karena itu, cluster dapat dianggap sebagai bagian dari suatu lapisan tanah.

2. Pembebanan dan Syarat Batas

Dalam program komputer PLAXIS kita dapat memasukkan beban luar baik yang berupa beban merata maupun beban terpusat. Selain itu program komputer PLAXIS juga memungkinkan untuk kita memasukkan peralihan ke dalam suatu model geometri. Program komputer PLAXIS juga memungkinkan untuk kita memasukkan syarat batas sesuai dengan kondisi di lapangan pada suatu model geometri.

3. Identifikasi Karakter Tanah Dasar

Identifikasi karakter tanah dasar perlu dilakukan sebelum menentukan parameter dan melakukan pemodelan. Sehingga parameter tanah yang akan ditentukan lebih sesuai dengan keadaan sebenarnya.

Secara umum klasifikasi tanah ditentukan berdasarkan ukuran butir dan plastisitas tanah. Pembagian klasifikasi tanah kohesif dan non kohesif dapat ditentukan berdasarkan pada Unified Classification System (USCS) yang mengacu pada ASTM D2487 atau SNI 03-6371-2000.

4. Menentukan Parameter Tanah

Parameter tanah dapat diperoleh dengan korelasi empirik atau dengan tersedianya data laboratorium. Metode untuk menentukan parameter tanah dapat dilihat pada Tabel di bawah ini.

Tabel 3.1. Menentukan Parameter Tanah

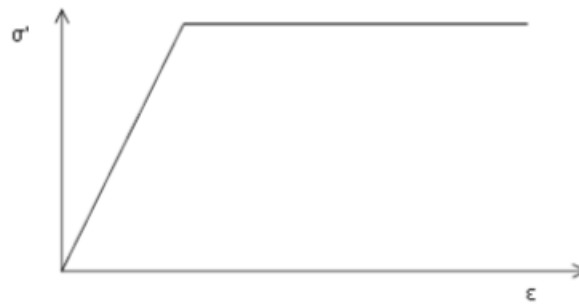
Parameter	Metode yang digunakanq
Unit Weight (γ)	1. Konsistensi / Kepadatan
	2. Korelasi empirik

Parameter	Metode yang digunakanq
Undrained Shear Strength (S_u)	1. <i>Unconfined Compression Test</i>
	2. <i>UU Triaxial Compression Test</i>
	3. CPTu Test
	4. Korelasi empirik
Effective Strength (c' dan ϕ')	1. Korelasi empirik
Stiffness Tanah Kondisi Undrained (E_u)	1. Korelasi empirik
Stiffness Tanah Kondisi Drained (E_d)	1. Korelasi empirik
Coefficient of Consolidation (c_v)	1. 1D Consolidation Test
	2. CPTu – Dissipation Test
	3. Korelasi empirik
Permeability (k)	1. Korelasi empirik
	2. CPTu – Dissipation Test

Setelah model geometri terbentuk, kita harus memasukan data parameter material ke dalam pusat data material program komputer PLAXIS. Program komputer PLAXIS menyediakan berbagai model material untuk mengaplikasikan perilaku tanah, seperti:

a. Model Mohr-Coulomb

Model mohr-coulomb digunakan sebagai pendekatan dari perilaku tanah. Ada 5 model parameter yang digunakan oleh model ini, yaitu : modulus Young (E), Poissons ratio (ν), kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ) dan sudut dilatasi (Ψ).



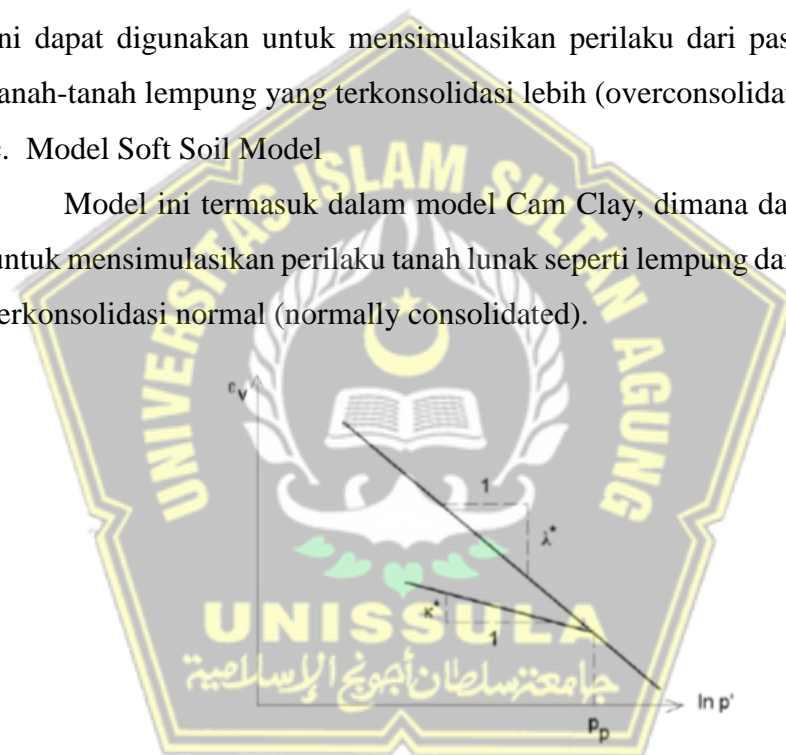
Gambar 3.8. Pemodelan dengan Plastic (Brinkgreve et al., 2014)

b. Model Hardening Soil

Model ini termasuk dalam model hiperbolik. Turunan kedua dari model ini dapat digunakan untuk mensimulasikan perilaku dari pasir, gravel dan tanah-tanah lempung yang terkonsolidasi lebih (overconsolidated).

c. Model Soft Soil Model

Model ini termasuk dalam model Cam Clay, dimana dapat digunakan untuk mensimulasikan perilaku tanah lunak seperti lempung dan gambut yang terkonsolidasi normal (normally consolidated).



Gambar 3.9. Hubungan antara Volumetric Strain pada Tanah Lunak (Brinkgreve et al., 2014)

Semua parameter material dalam program komputer PLAXIS ditujukan untuk merepresentasikan respon efektif dari tanah. Untuk itu program komputer PLAXIS menyediakan 3 (tiga) jenis perilaku, yaitu:

- Perilaku teralir (drained)
- Perilaku tak teralir (undrained)
- Perilaku kedap air (non-porous)

5. Menentukan Derajat Konsolidasi

Derajat konsolidasi perlu diperhitungkan untuk mengetahui apakah lapisan tanah lunak masih mengalami konsolidasi. Setionegoro (2013) telah melakukan sebuah penelitian mengenai hubungan antara B_q terhadap OCR. Dimana nilai OCR kurang dari 1.0 menggambarkan derajat konsolidasi. Rahardjo et al (2015) pada penelitiannya telah mengembangkan penelitian dari Setionegoro (2013) dengan membuat korelasi antara B_q dengan OCR agar perhitungan dapat dilakukan lebih mudah. Persamaan yang menggambarkan korelasi antara B_q terhadap OCR adalah seperti pada Persamaan (3-5).

$$OCR = \frac{1}{(1,2B_q+0,1)} \dots \dots \dots (3.1)$$

6. Penentuan Kondisi Awal

Setelah model geometri dan pembentukan jaring-jaring elemen hingga selesai, maka kita harus memasukan kondisi tegangan awal dan situasi awal. Ada 2 (dua) bagian di dalam menentukan kondisi awal pada program komputer PLAXIS, yaitu:

- ✓ Mengaktifkan tekanan air awal
- ✓ Menentukan konfigurasi geometri awal dan mengaktifkan tegangan efektif awal lapangan.

3.5.3.2. Tahapan Konstruksi

Program komputer PLAXIS memungkinkan kita untuk merubah konfigurasi geometri dengan menonaktifkan ataupun mengaktifkan suatu cluster atau obyek struktur lainnya untuk membuat suatu tahapan konstruksi. Dengan tahapan konstruksi kita dapat melakukan suatu simulasi dari proses konstruksi, penimbunan, dan penggalian dengan lebih akurat dan realistis.

3.5.3.3. Perhitungan Program Komputer PLAXIS

Program komputer PLAXIS menyediakan beberapa jenis perhitungan elemen hingga. Ada 3 (tiga) jenis perhitungan yang disediakan oleh PLAXIS, yaitu:

- Pehitungan plastis (plastic calculation)
- Analisis konsolidasi (consolidation analysis)
- Update mesh analysis

3.5.3.4. Keluaran Program Komputer PLAXIS

Keluaran utama dari perhitungan dengan menggunakan metode elemen hingga adalah peralihan pada titik-titik nodal dan tegangan pada titik-titik tegangan. Apabila model elemen hingga menggunakan elemen struktural, maka gaya-gaya struktural akan ikut dihitung.

1.5. Interpretasi Hasil Settlement Plate

Settlement plate terdiri dari pelat baja dan *settlement rods*. Dasar settlement plate dibungkus dengan geotextile untuk menghindari kontak langsung dengan geo membrane. Sebelum menjalankan vacuum preloading, kita harus menetapkan *benchmark*, yaitu di luar area pengaruh vakum pada lokasi yang stabil. Data dari *settlement plate* sangat bergantung dari proses pemasangan, posisi penempatan atau kondisi material yang tidak bagus sehingga mudah rusak. Interpretasi data dari *settlement plate* digunakan untuk memprediksi besarnya akhir penurunan di lapangan. Apakah tanah masih mengalami penurunan atau sudah tidak terjadi penurunan lagi. Adapun metode yang digunakan yaitu:

3.6.1. Metode Asaoka

Tahun 1978, Akira Asaoka membuat tulisan dengan judul *Observational Procedure of Settlement Prediction* menyampakan bahwa penggunaan solusi analitik untuk prediksi penurunan tidak selalu efektif. Sehingga digunakan jenis metode grafis sederhana untuk mendapatkan prediksi besar akhir penurunan.

Persamaan diferensial linear hasil penelitian Asaoka berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dirumuskan sebagai berikut:

$$\rho_n = \beta_0 + \beta_1 \cdot \rho_{n-1} \dots \dots \dots (3.2)$$

Dimana :

ρ_n = penurunan pada waktu ke-n

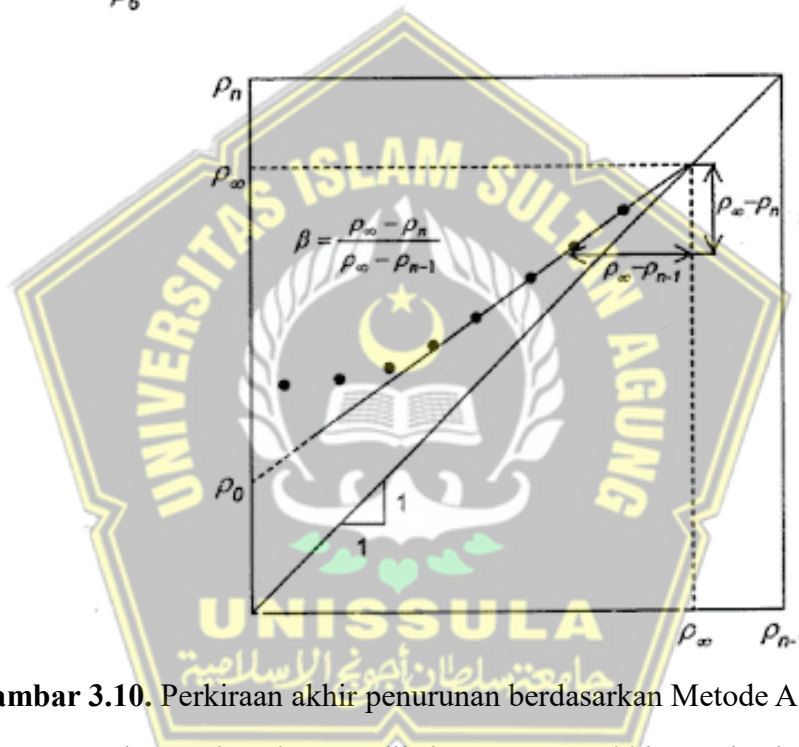
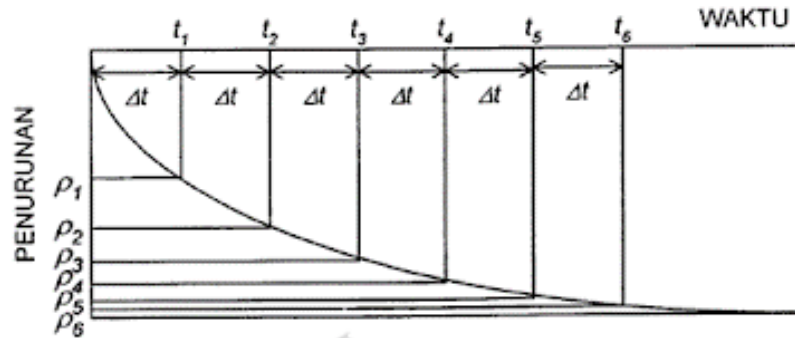
ρ_{n-1} = penurunan pada waktu ke-n-1

β_0 = perpotongan garis ρ_n terhadap ρ_{n-1} saat ρ_{n-1} bernilai nol

β_1 = gradien garis yang dilalui melalui ρ_n terhadap ρ_{n-1}

Penurunan akhir (ρ_{ult}) dapat diperoleh ketika $\rho_n = \rho_{n-1}$, sehingga persamaann menjadi :

$$\rho_{ult} = \frac{\beta_0}{1-\beta_1} \quad (3.3)$$



Gambar 3.10. Perkiraan akhir penurunan berdasarkan Metode Asaoka (1978)

Untuk mendapatkan prediksi penurunan akhir tanah, data penurunan harus dipilih secara tepat sehingga diperoleh nilai penurunan $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$ dengan interval waktu (Δt) yang tetap, seperti yang terlihat pada Gambar 3.9.

Kemudian nilai ρ_n (sumbu-y) dan nilai ρ_{n-1} (sumbu-x) diplot sehingga akan diperoleh titik-titik yang membentuk garis lurus. β_0 ialah waktu titik plot pertama dari regresi linear $\rho_n = \rho_{n-1}$. Penurunan akhir (ρ_f) adalah titik pertemuan antara garis $\rho_n = \rho_{n-1}$ (bersudut 45°) dengan trendline dari garis ρ_n dengan ρ_{n-1} sebenarnya.

Setelah diperoleh penurunan akhir (ρ_f) maka dapat dicari nilai β_1 yang merupakan kemiringan dari garis ρ_n dengan ρ_{n-1} sebenarnya, yang memberikan hubungan

$$\beta_1 = \frac{\rho_f - \beta_0}{\rho_f} \dots \dots \dots (3.4)$$

Konstanta β merupakan gradien kemiringan dari kurva garis lurus di atas dan nilainya bisa dipergunakan untuk mendapatkan koefisien konsolidasi vertical di mana $H = \frac{H}{2}$ (jarak drainase vertikal terjauh).

$$C_h = \frac{4H^2 \ln \beta}{\pi^2 \Delta t} \dots \dots \dots (3.5)$$



BAB IV

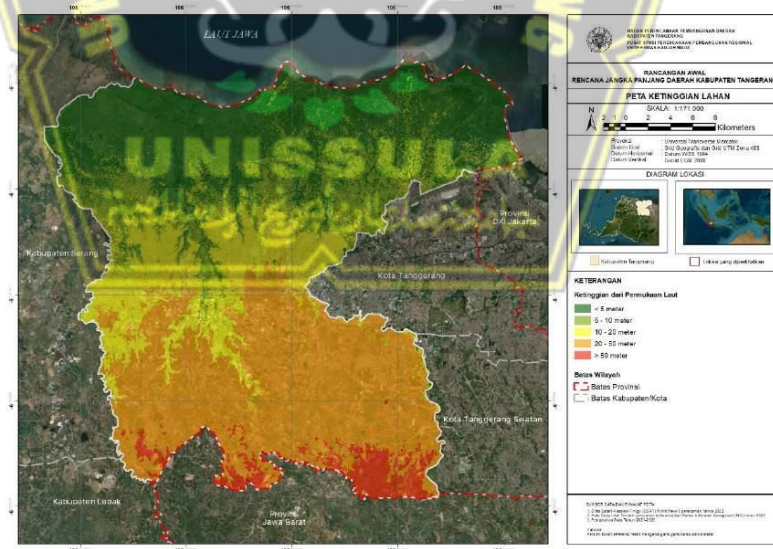
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Gambaran Umum Kabupaten Tangerang

Kabupaten Tangerang memiliki luas wilayah sebesar 1.027,757 km². Secara astronomis, terletak di antara 6°00' hingga 6°20' Lintang Selatan dan 106°20' hingga 106°43' BT. Kabupaten Tangerang juga berbatasan dengan ibu kota negara, yaitu Provinsi DKI Jakarta, yang merupakan pusat pemerintahan dan pusat perekonomian nasional. Bagian utara wilayah Kabupaten Tangerang berupa kawasan pesisir, sedangkan bagian lainnya adalah daratan.

4.1.1. Kondisi Topografi

Kondisi topografi daerah bisa di lihat dari 2 aspek, yaitu tinggi rendahnya permukaan tanah dan kemiringannya. Dilihat dari tinggi permukaan tanah, Kabupaten Tangerang termasuk daerah rendah karena seluruh wilayahnya berada pada ketinggian di bawah 200 meter di atas permukaan laut.



Gambar 4.1 Peta Ketinggian Lahan Kabupaten Tangerang

Berdasarkan gambar di atas, bagian utara Kabupaten Tangerang memiliki ketinggian 0 sampai 10 meter di atas permukaan laut, bagian tengah

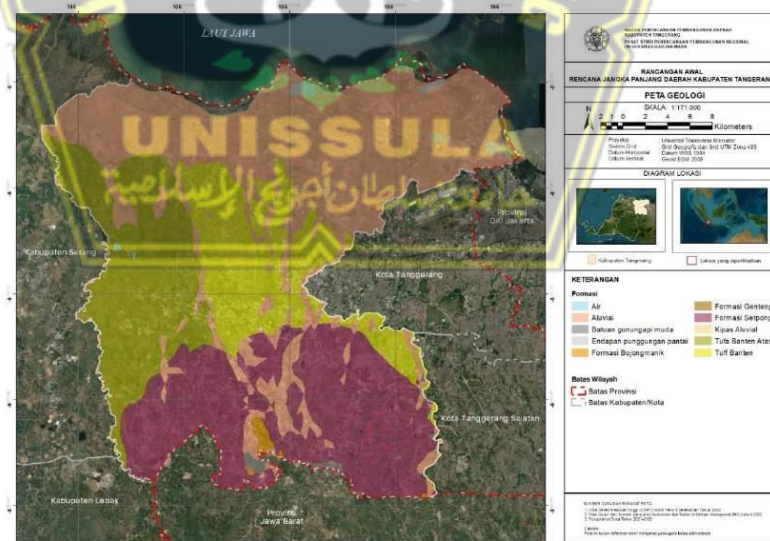
memiliki ketinggian 10 sampai 20 meter, dan bagian selatan memiliki ketinggian lebih dari 20 meter.

4.1.2. Kondisi Geologi

Wilayah Kabupaten Tangerang terbentuk dari hasil endapan batuan Tersier serta endapan dari aktivitas gunung api Kwarter, baik langsung maupun tidak langsung. Endapan ini berupa batuan lempung, batuan pasir, dan tanah yang terbentuk dari material letusan gunung api, serta endapan tanah alluvial (Qa) yang masih terus terjadi hingga saat ini.

Dari segi stratigrafi, wilayah Kabupaten Tangerang terdiri dari batuan Tersier dan batuan Kwarter. Batuan Tersier terletak di bagian selatan, yaitu daerah aliran sungai Cisadane, yang terdiri dari Formasi Bojongmanik (Tmb), Formasi Genteng (Tpg), dan Formasi Serpong (Tpss). Sementara itu, batuan Kwarter terdiri dari Tuff Banten (QTvb), Batuan Gunungapi Muda (Qv), Endapan Pematang Pantai (Qbr), dan Endapan Aluvial (Qa).

Kabupaten Tangerang memiliki potensi sumber daya geologi berupa pasir, serta potensi sumber daya air berupa air permukaan (DAS) dan air tanah dalam bentuk Cekungan Air Tanah (CAT) Tangerang – Jakarta dengan beberapa lapisan akifer.



Gambar 4.2 Peta Kondisi Geologi Kabupaten Tangerang

Sumber: Badan Informasi Geospasial dan ArcMap (diolah), 2023

4.2. Geometri Badan Jalan Eksisting

Jalan Tol Serbaraja adalah salah satu Proyek Strategis Nasional (PSN) di Provinsi Banten yang diharapkan dapat meningkatkan keterhubungan wilayah menuju Jakarta serta memberikan akses yang lebih baik ke Merak dan Lampung karena terhubung dengan jalan tol Tangerang – Merak.

Jalan tol terletak di Kabupaten Tangerang dengan kondisi geologi yang terbentuk dari endapan batuan Tersier dan endapan dari aktivitas gunungapi Kuarter, baik langsung maupun tidak langsung. Endapan ini berupa batuan sedimen piroklastik, epiklastik, dan klastik yang terbentuk sebagai endapan alluvial (Qa) hingga saat ini.

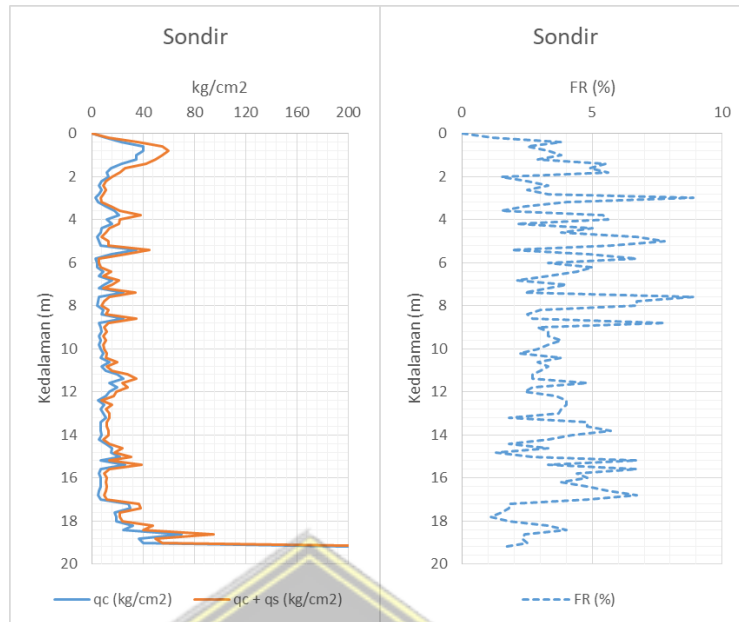
Jalan tol sendiri melewati beberapa lokasi bekas galian pasir yang rencananya akan dilakukan penimbunan badan jalan. Dari data penyelidikan tanah yang sudah dilakukan berupa Borlog, CPT, maupun CPTu, terlihat adanya tanah lunak dari eksisting penimbunan bekas galian pasir sampai dengan kedalaman kurang lebih 20m masih terdapat tanah lunak.

4.3. Penyelidikan Tanah

Penyelidikan tanah yang sudah dilakukan berupa sondir (CPT), Borlog, maupun CPTu, terlihat adanya tanah lunak dari eksisting penimbunan bekas galian pasir sampai dengan kedalaman kurang lebih 20m masih terdapat tanah lunak.

4.3.1. Pengujian Sondir (CPT)

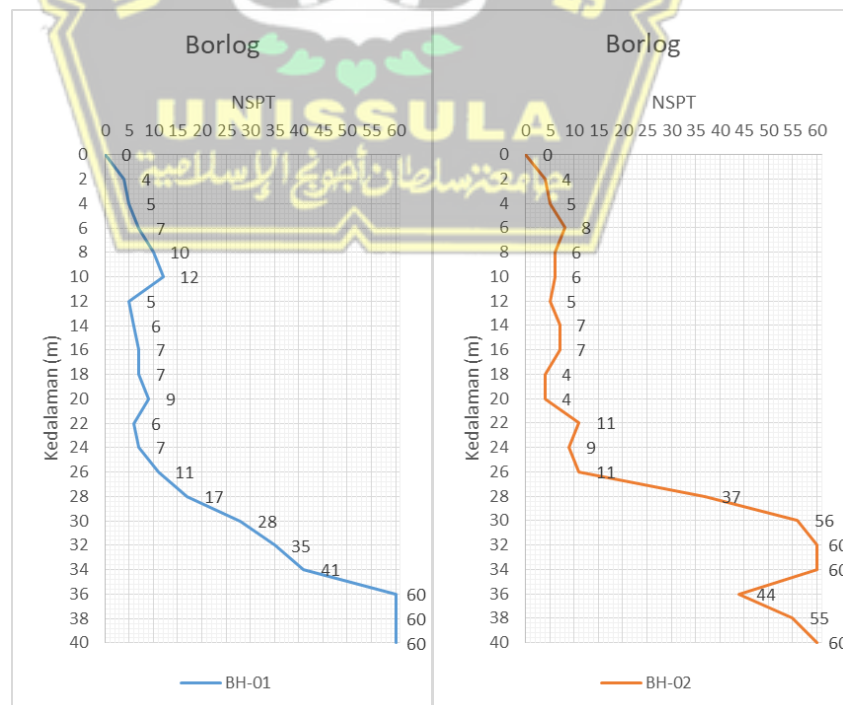
Pengujian sondir atau CPT dimaksudkan sebagai data pendukung dari pengujian bor agar dapat membaca daya dukung tanah per 20 cm, sedangkan dengan bor pengujian daya dukung tanah atau NSPT dilakukan tiap interval 2 m. Berdasarkan hasil pengujian sondir dari hasil uji sondir tertera pada Gambar 4.2 didapati bahwa tanah sangat lunak / very soft soil ($q_c \leq 10 \text{ kg/cm}^2$) pada lokasi studi ini berada hingga kedalaman 2 meter sampai dengan 17 meter dari permukaan tanah, sementara itu tanah keras ditemui pada kedalaman >19 meter dari permukaan tanah.



Gambar 4.3 Grafik Hasil Pengujian Sondir

4.3.2. Pengujian Borlog

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan borlog, yang tertera pada gambar 4.4 didapatkan bahwa kondisi tanah merupakan tanah lempung dengan konsistensi lunak sampai dengan medium dengan nilai NSPT 4 – 8 pada kedalaman 0 – 20 m. Sedangkan tanah keras dengan NSPT > 30 terdapat pada kedalaman > 28 m dari permukaan tanah.

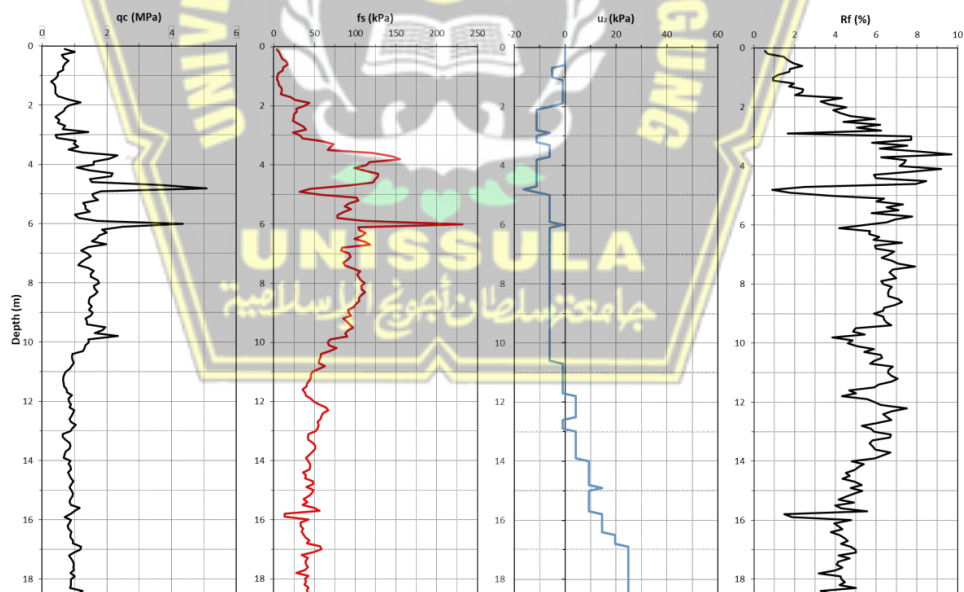


Gambar 4.4 Grafik Hasil Pengujian Borlog

4.3.3. Pengujian CPTu

Uji CPTu adalah salah satu pengujian lapangan yang dilakukan dengan cara penetrasi ke dalam tanah berupa batang besi silinder berdiameter +5 cm yang mana ujung batang merupakan probe berbentuk kerucut dan berisi sensor untuk membaca kondisi tanah. Kecepatan penetrasi yaitu 2 cm/detik dengan pembacaan kontinu berupa tahanan ujung (q_c), hambatan gesekan (f_s) dan tekanan air pori (u).

Uji CPT_U mirip dengan uji sondir mekanis, namun pada uji ini terdapat instrumen elektrik tambahan. Instrumen ini memungkinkan uji CPT_U untuk menganalisis karakteristik tanah secara lebih akurat sesuai kondisi sebenarnya di dalam tanah. Alat ini mampu menghasilkan data berupa tahanan ujung, gesekan selimut, dan tekanan air pori. Data-data tersebut merupakan parameter tanah yang dapat digunakan dalam berbagai jenis analisis tanah. Dengan hasil pengujian yang dihasilkan, alat ini dianggap sebagai alat yang sangat berguna karena dalam satu kali pengujian dapat menghasilkan tiga jenis data sekaligus.



Gambar 4.5 Grafik Hasil Pengujian CPTu

Grafik di atas menunjukkan hasil pengukuran data CPTu di lapangan. Pengukuran berakhir di kedalaman 18,50 meter dengan q_c sebesar 1,11 MPa, f_s sebesar 41,88 kPa, dan u_2 sebesar 24,80 kPa. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan nilai yang sangat kontras antara lapisan

tanah timbunan dengan lapisan tanah asli. Untuk lapisan tanah timbunan berada di kedalaman 0 sampai 11,70 meter sedangkan kebawahnya merupakan tanah asli.

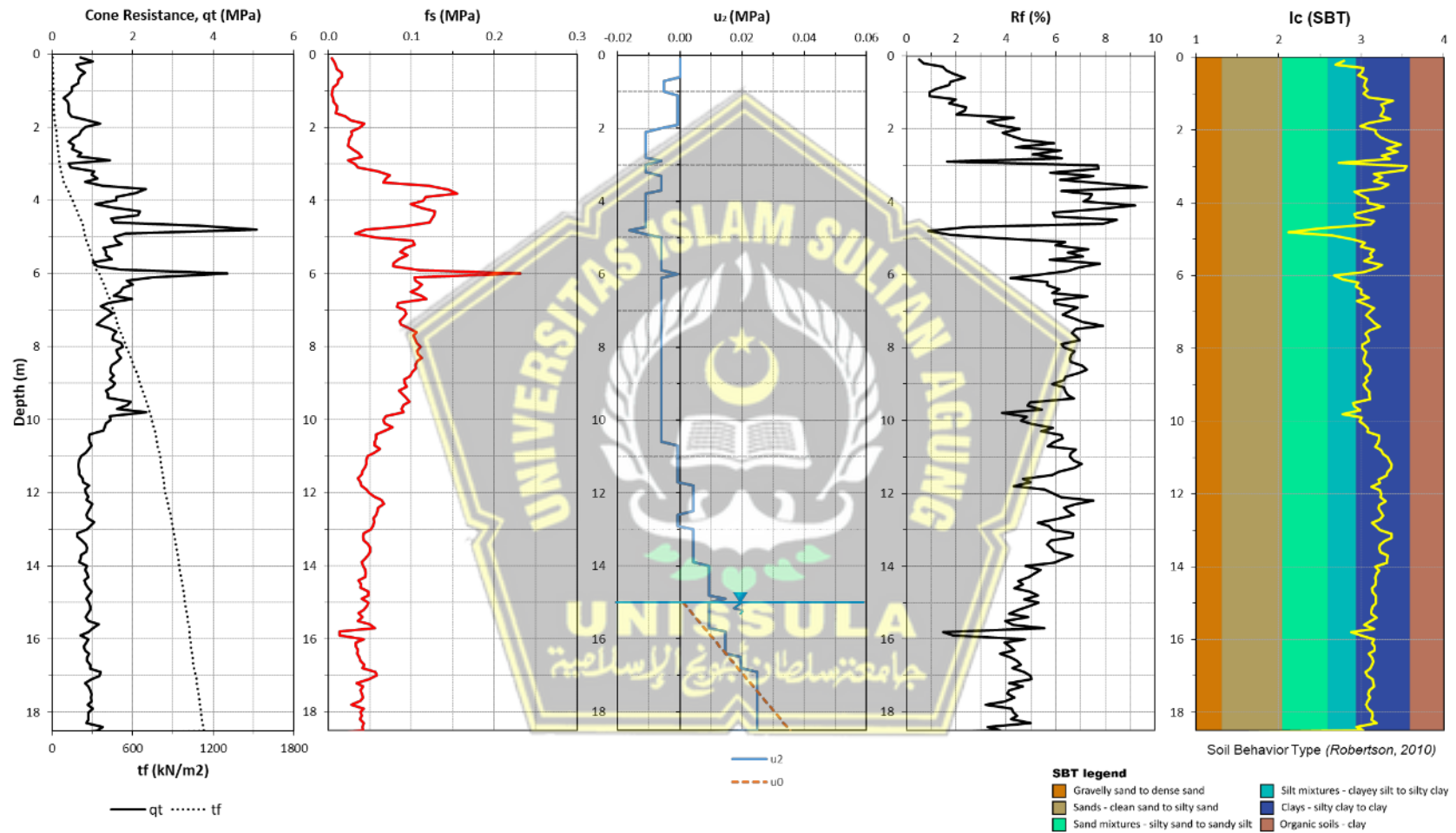
Pada lapisan tanah timbunan tekanan air pori bernilai negatif itu menunjukkan bahwa lapisan tersebut tidak jenuh air. Sedangkan untuk lapisan tanah asli tekanan air pori bernilai positif dan nilainya terus meningkat itu dapat diindikasikan bahwa lapisan tersebut jenuh air dengan muka air tanah berada di kedalaman sekitar 15 meter seperti yang ditunjukkan gambar 4.6.

Kondisi tanah tidak jenuh air disebabkan oleh pori-pori tanah tidak terisi oleh air sepenuhnya, sebagian pori-pori tanah tersebut berisi udara sehingga pembacaan tekanan air pori tidak meningkat signifikan dan terkadang malah negatif. Berbeda dengan kondisi tanah yang jenuh air, pada kondisi ini seluruh pori-pori tanah terisi oleh air sehingga menyebabkan peningkatan tekanan air pori yang signifikan seiring dengan penetrasi kedalaman.

Dalam kasus ini, di sepanjang kedalaman 18,50 meter tekanan air pori u_2 tidak menunjukkan adanya tekanan air pori berlebih sehingga tidak memerlukan adanya dissipasi. Tetapi dengan adanya indikasi peningkatan tekanan air pori u_2 di kedalaman 11 meter bukan tidak mungkin tekanan air pori tersebut akan terus meningkat seiring dengan kedalaman. Namun dengan keterbatasan kapasitas mesin kedalaman penetrasi hanya dapat mencapai 18,50 meter. Untuk jenis perilaku tanahnya sendiri berdasarkan nilai SBT disepanjang penetrasi didominasi oleh tanah jenis lempung seperti yang ditunjukkan grafik ic (SBT) Gambar 4.6.

4.3.4. Pengujian Laboratorium

Benda uji tidak terganggu yang telah diambil pada kedalaman 3,7,15,17 dan 23 meter dari permukaan tanah selanjutnya dilakukan pengujian di laboratorium, adapun parameter yang diuji adalah berupa parameter fisik dan mekanis dari masing – masing lapisan tanah untuk keperluan pemodelan dengan rekapitulasi hasil dari pengujian laboratorium dapat dilihat seperti tertera pada Tabel 4.1.



Gambar 4.6 Grafik Hasil Pengolahan CPTu

Berdasarkan hasil pengujian parameter fisik dan mekanis pada benda uji tak terganggu, didapati tanah berjenis lempung dengan plastisitas rendah (CL). Dari hasil Tabel 4.1 dibawah ini nilai kuat geser (S_u) berjenis sangat lunak.

Tabel 4. 1 Rekapitulasi Hasil Pengujian Parameter Fisik dan Mekanis Laboratorium terhadap Sampel Tidak Terganggu

BORE HOLE	DEPTH (m)	USCS	GS	Determination Unit weight of dry density & moisture content							Atterberg limits			Particle Size Distribution (ASTM D 422)			
				W N %	γ_m gr / cm ³	γ_d gr / cm ³	void ratio e	Porosity n	sr %	wL %	wP %	IP %	GRAVEL %	SAND %	SILT %	CLAY %	
BH_1	3.00 - 3.50	CH	2.6476	44.80	1.643	1.139	1.32	0.57	89.54	87.35	29.22	58.13	8.67	12.60	12.08	66.65	
BH_1	7.00 - 7.50	CH	2.6164	59.79	1.576	0.986	1.65	0.62	94.66	92.47	31.04	61.43	4.49	8.76	10.67	76.08	
BH_1	23.00 - 23.50	CH	2.6561	64.16	1.581	0.963	1.76	0.64	96.93	74.36	29.39	44.97	16.68	21.29	13.02	49.01	
BH_2	3.00 - 3.50	CH	2.6124	61.23	1.579	0.98	1.67	0.63	95.95	90.22	31.51	58.71	7.28	8.20	9.96	74.56	
BH_2	15.00 - 15.50	CH	2.6368	63.43	1.59	0.973	1.71	0.63	97.8	95.88	33.48	62.40	0.00	2.23	7.80	89.97	
BH_2	17.00 - 17.50	CH	2.6226	56.77	1.577	1.006	1.61	0.62	92.67	94.79	32.31	62.48	0.00	1.74	7.72	90.54	

BORE HOLE	DEPTH (m)	Consolidation		Triaxial UU		Unconfined		Direct Shear		Permeability
		Test		Total Stress		Test		Total Stress		Test
		C_v cm ² /sec	C_c	C kg/cm ²	ϕ deg	q_u kg/cm ²	c_u kg/cm ²	C kg/cm ²	ϕ deg	Sec / Cm ²
BH. 1	3.00 - 3.50	0.00166	0.408	0.179	9.536	0.387	0.194	0.057	19.799	5.70E-08
BH. 1	7.00 - 7.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BH. 1	23.00 - 23.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BH. 2	3.00 - 3.50	0.00128	0.583	0.082	4.301	0.159	0.08	0.043	12.776	2.93E-07
BH. 2	15.00 - 15.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BH. 2	17.00 - 17.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-

4.4. Data PVD (Prefabricated Vertical Drain)

Prefabricated vertical drain (PVD) adalah jalur drainase yang dibuat secara fabrikasi yang terdiri dari inti polypropylene yang memiliki profil sirip untuk mengalirkan air pada kedua sisi. Inti tersebut terbungkus filter geotextile non-woven untuk mencegah butiran tanah tidak masuk kedalam inti. (Gambar 4). Material PVD yang diusulkan untuk proyek ini adalah:

Material : Komposit plastik dan geotextile non-woven

Polimer : Polypropylene & Polyester

Tipe : CT-D1010 (3mm x 100mm)

Produksi : Capital Envoy (M) Sdn. Bhd. dan CeTeau FarEast Ltd.

Negara asal : Malaysia

PVD dari Ceteau adalah produk yang telah digunakan di seluruh dunia melalui berbagai proyek. Spesifikasi teknis bahan PVD ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Material PVD CeTeau Drain CT-D1010

4.5. Data Geotextile Woven

Geotextile yang digunakan adalah geotextile woven atau geotextile PET yang memiliki kuat tarik 100/50, dimana spesifikasinya dijelaskan dalam tabel berikut :

Tabel 4. 2 Data Geotextile Woven PET 100/50

Properties	Test Method	Units	HKWG 100/50PET
Strength@Ultimate (MD)	ASTM D4595	kN/m	100
Strength@Ultimate (CD)	ASTM D4595	kN/m	50
Elongation (MD)	ASTM D4595	%	10±2
Strength@5% Strain (MD)	ASTM D4595	kN/m	42
CBR Strength	EN ISO 12236	kN	6.2
Drop Test	EN 918	mm	12
Creep Reduce Strength (MD)	ASTM D4595	kN/m	69
Long Term Design Strength (MD)	GR-GT 7	kN/m	57
Apparent Open Size	ASTM D4751	mm	≤0,55
Flow Rate	ASTM D4491	l/m ² /s	15

Perhitungan Parameter Geotextile

$$EA = \frac{Tall}{\varepsilon} \quad \frac{Tegangan}{Regangan}$$

$$Tult = 100 \quad \text{kN/m}$$

$$\text{Batas Regangan} = 5 \quad \%$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,05 \\
 R_{Fcr} &= 1/(\% \text{ Ultimate Strenght}) \\
 \% \text{ of Ultimate} &= 70 \\
 \text{Strenght} &= \% \\
 R_{Fcr} &= 1,4 \\
 R_{Fid} &= 1,1 \\
 R_{Fcbd} &= 1 \\
 \text{No Joint} & \\
 T_{all} &= \frac{T_{ult}}{(R_{Fcr} \times R_{Fid} \times R_{Fcbd})} \\
 &= 64 \text{ kN/m} \\
 EA &= \frac{T_{ult}}{\text{Batas Regangan}} \\
 &= 1273 \text{ kN/m} \\
 N_p &= \frac{T_{ult}}{2} \\
 &= 67
 \end{aligned}$$

4.6. Perhitungan Tinggi Initial (H initial)

Untuk menentukan H awal, dilakukan analisa konsolidasi menggunakan variasi beban yang diberikan pada timbunan (q). Variasi beban tersebut adalah:

$$\begin{aligned}
 q &= 1,8 \text{ t/m}^2 \rightarrow q \text{ timbunan } 1,8 \text{ t/m}^2 \\
 q &= 3,6 \text{ t/m}^2 \rightarrow q \text{ timbunan } 3,6 \text{ t/m}^2 \\
 q &= 5,4 \text{ t/m}^2 \rightarrow q \text{ timbunan } 5,4 \text{ t/m}^2 \\
 q &= 7,2 \text{ t/m}^2 \rightarrow q \text{ timbunan } 7,2 \text{ t/m}^2 \\
 q &= 9,0 \text{ t/m}^2 \rightarrow q \text{ timbunan } 9,0 \text{ t/m}^2 \\
 q &= 10,8 \text{ t/m}^2 \rightarrow q \text{ timbunan } 10,8 \text{ t/m}^2 \\
 q &= 12,6 \text{ t/m}^2 \rightarrow q \text{ timbunan } 12,6 \text{ t/m}^2
 \end{aligned}$$

Variasi pembebanan dengan beban kendaraan

$$\begin{aligned}
 q &= 3,3 \text{ t/m}^2 \rightarrow q \text{ timbunan } 1,8 \text{ t/m}^2 + q \text{ surcharge } 3,6 \text{ t/m} \\
 q &= 5,1 \text{ t/m}^2 \rightarrow q \text{ timbunan } 3,6 \text{ t/m}^2 + q \text{ surcharge } 3,6 \text{ t/m} \\
 q &= 6,9 \text{ t/m}^2 \rightarrow q \text{ timbunan } 5,4 \text{ t/m}^2 + q \text{ surcharge } 3,6 \text{ t/m} \\
 q &= 8,7 \text{ t/m}^2 \rightarrow q \text{ timbunan } 7,2 \text{ t/m}^2 + q \text{ surcharge } 3,6 \text{ t/m} \\
 q &= 10,5 \text{ t/m}^2 \rightarrow q \text{ timbunan } 9,0 \text{ t/m}^2 + q \text{ surcharge } 3,6 \text{ t/m} \\
 q &= 12,3 \text{ t/m}^2 \rightarrow q \text{ timbunan } 10,8 \text{ t/m}^2 + q \text{ surcharge } 3,6 \text{ t/m} \\
 q &= 14,1 \text{ t/m}^2 \rightarrow q \text{ timbunan } 12,6 \text{ t/m}^2 + q \text{ surcharge } 3,6 \text{ t/m}
 \end{aligned}$$

4.6.1. Perhitungan Besar Pemampatan

Menurut analisa data tanah, diketahui bahwa ketebalan lapisan tanah yang bisa mengalami pemadatan adalah 20 meter. Lapisan ini mempunyai nilai NSPT < 8, sehingga konsistensinya berada antara sangat lunak hingga sedang. Untuk menghitung konsolidasi tanah, kita bisa menggunakan rumus (2.2), (2.3), (2.4), dan (2.5). Penghitungan konsolidasi dibagi menjadi dua bagian, yaitu konsolidasi akibat beban timbunan dan konsolidasi akibat beban timbunan serta beban tambahan. Dibawah ini merupakan contoh perhitungan konsolidasi akibat beban timbunan sebesar 7,2 ton per meter persegi pada lapisan tanah ke-6. Gambar penampang tanah dapat dilihat pada Lampiran 2.

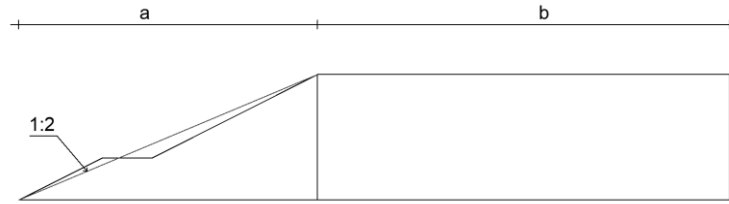
$$\begin{aligned}
 h &= 1 \text{ m} & \gamma_w &= 1,0 \text{ t/m}^3 \\
 \gamma_{\text{sat } 2} &= 1,590 \text{ t/m}^3 & \gamma'_2 &= 0,97 \text{ t/m}^3 \\
 C_c &= 0,300 & \gamma_{\text{sat timb}} &= 1,80 \text{ t/m}^3 \\
 e_0 &= 1,67 & \gamma'_{\text{timb}} &= 0,80 \text{ t/m}^3 \\
 \gamma_{\text{sat } 1} &= 1,579 \text{ t/m}^3 & \gamma'_1 &= 0,98 \text{ t/m}^3
 \end{aligned}$$

1. Tegangan overburden efektif (P_o')

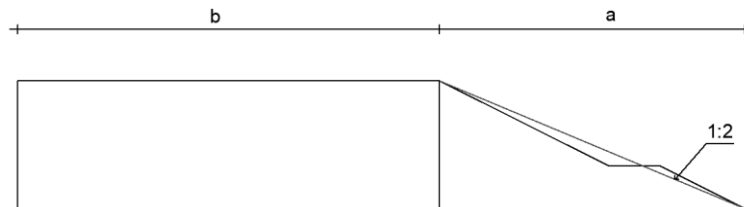
Dihitung ditengah lapisan dengan rumusan (2.11)

$$\begin{aligned}
 P_o' &= (\gamma'_1 \times h_1) + (\gamma'_2 \times h_2) + (\gamma'_3 \times h_3) + (\gamma'_4 \times h_4) + (\gamma'_5 \times h_5) + (\gamma'_6 \times h) \\
 &= (0,98 \times 0,5) + (0,98 \times 1) + (0,98 \times 1) + (0,98 \times 1) + (0,98 \times 1) + \\
 &\quad (0,97 \times 1) \\
 &= 5,38 \text{ t/m}^2
 \end{aligned}$$

1. Penambahan Tegangan (ΔP)



Gambar 4.8 Potongan Timbunan untuk Area 1 Ditinjau Sebelah Kiri



Gambar 4.9 Potongan Timbunan untuk Area 1 Ditinjau Sebelah Kanan

$$\begin{aligned} b_1 &= 22 \text{ m} & b_2 &= 22 \text{ m} \\ z &= 9,5 \text{ m} & a_2 &= 29 \text{ m} \\ a_1 &= 22 \text{ m} \end{aligned}$$

Persebaran tegangan pada lokasi timbunan sisi kiri, $b_1/z = 4,89$ dan $a_1/z = 4,89$ sehingga dari bacaan Gambar 2.1, dipakai faktor distribusi tegangan $I_1 = 0,5$.

Pada lahan sisi kanan $b_2/z = 4,89$ dan $a_2/z = 0,76$ dengan factor persebaran tegangan $I_2 = 0,5$. Maka:

$$\begin{aligned} \Delta p_1 &= (I_1 + I_2) \times q \\ &= (0,5 + 0,5) \times 7,2 \\ &= 7,2 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

2. Besarnya Pemampatan (S_c)

$$\begin{aligned} S_c &= \frac{H}{1 + e_o} \left[C_c \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta \sigma}{\sigma'_o} \right) \right] \\ &= \frac{1}{1 + 1,67} \left[0,3 \log \left(\frac{5,38 + 7,2}{5,38} \right) \right] \\ &= 0,041 \text{ m} \end{aligned}$$

Total pemampatan pada seluruh layer tanah yang diakibatkan beban timbunan $q = 7,2 \text{ t/m}^2$ adalah sebesar 1,191 m.

Selanjutnya dilakukan hitungan pemampatan yang diakibatkan beban timbunan dan surcharge. Timbunan surcharge diasumsikan sebagai beban terbagi rata $q = 3.6 \text{ t/m}^2$

$$\begin{aligned} B &= 11 \text{ m} & m &= 1,69 \text{ m} \\ L &= 22 \text{ m} & n &= 3,38 \text{ m} \end{aligned}$$

Melalui gambar 2.2 didapatkan $I = 0,25$. Sebab I tersebut diambil di titik tengah beban terbagi rata. Kemudian dihitung dengan persamaan (2.7) untuk beban surcharge total dapat dikali 4.

$$\begin{aligned} \Delta p_2 &= 4 \times I \times q \\ &= 4 \times 0,25 \times 3,6 \text{ t/m}^2 \\ &= 3,6 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta p &= \Delta p_1 + \Delta p_2 \\ &= 7,2 + 3,6 \\ &= 10,8 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan rumus (2.2) didapatkan :

$$\begin{aligned} S_c &= \frac{H}{1 + e_o} \left[C_c \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta \sigma}{\sigma'_o} \right) \right] \\ &= \frac{1}{1 + 1,67} \left[0,3 \log \left(\frac{5,38 + 10,8}{5,38} \right) \right] \\ &= 0,053 \text{ m} \end{aligned}$$

Total untuk pemampatan yang terjadi dari seluruh layer tanah yang diakibatkan beban timbunan $q = 10,8 \text{ t/m}^2$ adalah sebesar 1,498 m.

Perhitungan Tinggi Timbunan Awal (H_{initial}) dan Tinggi Timbunan Akhir (H_{final})

Tinggi dari timbunan awal dapat diperoleh dengan menggunakan rumusan (2.14).

$$H_{\text{inisial}} = \frac{q_{\text{final}} + (S_c) \times (\gamma_{\text{timb}} - \gamma'_{\text{timb}})}{\gamma_{\text{timb}}}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} S_c \text{ akibat } (q_{\text{timbunan}}) 7,2 &= 1,191 \text{ m} \\ S_c \text{ akibat } (q_{\text{timbunan}} + \text{surcharge}) 10,8 &= 1,498 \text{ m} \\ \gamma_{\text{timbunan}} &= 1,80 \text{ t/m}^2 \\ \gamma_w &= 1,00 \text{ t/m}^2 \\ \gamma'_{\text{timbunan}} &= 0,80 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

Maka :

$$\begin{aligned}
 H_{\text{inisial timb}} &= \frac{7,2 + (1,191) \times (1,80 - 0,8)}{1,80} \\
 &= 4,662 \text{ m} \\
 H_{\text{inisial timb+surc}} &= \frac{10,9 + (1,498) \times (1,80 - 0,8)}{1,80} \\
 &= 6,832 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$H_{\text{inisial timb+surc}}$ yaitu tinggi timbunan itu sendiri ditambah tinggi timbunan yang mewakili beban yang akan diberikan pada timbunan itu.

Sehingga persamaan H_{final} adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 H_{\text{timbunan}} &= H_{\text{inisial}} - S_c - H_{\text{surcharge}} \\
 &= 6,832 - 1,498 - 0,833 \\
 &= 4,501 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Perhitungan penurunan selengkapnya pada Lampiran. Perhitungan akibat beban variasi diatas didapat hasil yang diperlihatkan pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4.

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Settlement, H_{inisial} , & H_{final} Akibat Beban Timbunan

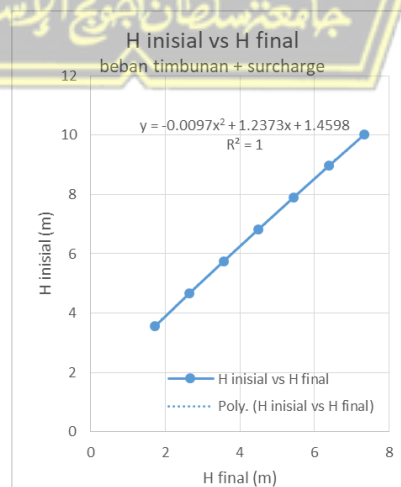
H awal timb	Q timb	Sc	H inisial	H Bongkar	H Final
(m)	(t/m ²)	(m)	(m)	(m)	(m)
A	B	C	D	E	F = D-C
1	1,80	0,478	1,265	0,00	0,788
2	3,60	0,773	2,429	0,00	1,656
3	5,40	1,001	3,556	0,00	2,555
4	7,20	1,191	4,662	0,00	3,471
5	9,00	1,354	5,752	0,00	4,398
6	10,80	1,498	6,832	0,00	5,334
7	12,60	1,627	7,904	0,00	6,277

Tabel 4. 4 Hasil Perhitungan Settlement, H_{inisial} , & H_{final} Akibat Beban Timbunan dan surcharge

H awal timb	Q timb +surc	Sc	H inisial	H Bongkar	H Final
(m)	(t/m ²)	(m)	(m)	(m)	(m)
A	B	C	D	E	F = D-C-E
1	5,40	1,001	3,556	0,833	1,722
2	7,20	1,191	4,662	0,833	2,637
3	9,00	1,354	5,752	0,833	3,565
4	10,80	1,498	6,832	0,833	4,501
5	12,60	1,627	7,904	0,833	5,444
6	14,40	1,744	8,969	0,833	6,391
7	16,20	1,852	10,029	0,833	7,344



Gambar 4.10 Grafik Hubungan antara H_{inisial} & H_{final} akibat beban timbunan



Gambar 4.11 Grafik Hubungan antara H_{inisial} & H_{final} akibat beban timbunan dan surcharg

Maka tinggi timbunan akhir pada elevasi +7,5 m adalah:

$$\begin{aligned} H_{\text{inisial}} &= -0,0097x^2 + 1,2373x + 1,4598 \\ &= -0,0097(7,5)^2 + 1,2373(7,5) + 1,4598 \\ &= 10,19\text{m} \end{aligned}$$

Jadi H_{final} pada timbunan 7,5 m harus direncanakan dengan ketinggian H_{inisial} 10,19 m dan H_{bongkar} 0,833m.

4.7. Perhitungan Waktu Pemampatan Tanpa Percepatan

Setelah mengetahui seberapa besar pemampatan yang terjadi karena beban timbunan dan beban tambahan, dilakukan perhitungan untuk mengetahui berapa lama waktu yang dibutuhkan agar pemampatan tersebut selesai, dengan rumus (2.29). Hal ini bertujuan untuk menentukan apakah diperlukan perbaikan tanah dasar agar proses pemampatan bisa lebih cepat. Berdasarkan data lab pada tabel 4.2 didapatkan nilai $C_v = 0,00128 \text{ cm}^2/\text{sec} = 4,037 \text{ m}^2/\text{tahun}$. Dengan U 90% didapat $T_v = 0,848$

Tabel 4. 5 Variasi Faktor Waktu Terhadap Derajat Konsolidasi

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

$$t = \frac{0,848 \times 20^2}{4,037} = 84,02 \text{ tahun}$$

Dari hasil hitungan diatas, membutuhkan waktu yang cukup lama yaitu 84 tahun sehingga perlu pemasangan (PVD).

4.8. Perencanaan PVD untuk Mempercepat Pemampatan

Dalam perencanaan ini, PVD dipasang pada $NSPT < 10$, yaitu pada kedalaman 20m. Pola pemasangan yaitu menggunakan pola segitiga dan variasi jarak PVD sebesar 1,0m, 1,25m, dan 1,5m. Hal ini dilakukan agar mendapatkan jarak pemasangan yang efisien dan mampu mencapai tingkat konsolidasi yang diharapkan.

4.8.1. Perhitungan Derajat Konsolidasi Vertikal (U_v)

Direncanakan nilai U_v 90%. Sehingga dengan parameter berikut dapat dihitung nilai T_v dan U_v :

$$C_v = 0,00128 \text{ cm}^2/\text{sec}$$

$$t = 1 \text{ minggu}$$

$$= 604800 \text{ detik}$$

$$H_{dr} = 20 \text{ m}$$

$$= 2000 \text{ cm}$$

$$Tv = \frac{604800 \times 0,00128}{(2000)^2} = 0,000193536$$

$$Uv = 2 \sqrt{\frac{0,000193536}{\pi}} \times 100\% = 0,0157$$

4.8.2. Perhitungan Derajat Konsolidasi Horizontal (U_h)

Dalam menghitung derajat konsolidasi arah horizontal menggunakan parameter berikut dengan pola segitiga dan spasi 1,0 m:

$$C_v = 0,00128 \text{ cm}^2/\text{sec}$$

$$K_h/K_s = 3$$

$$\text{Lebar PVD (a)} = 100 \text{ mm}$$

$$\text{Tebal PVD (b)} = 3 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} dw &= 2 \left(\frac{a+b}{\pi} \right) \\ &= 2 \left(\frac{100+3}{\pi} \right) \\ &= 65,57 \text{ mm} \end{aligned}$$

Perhitungan $F_{(n)}$ dengan pola segitiga yaitu $S = 1,0 \text{ m}$

$$D = 1,05 \times S$$

$$= 1,05 \times 1,0$$

$$= 1,050 \text{ m}$$

$$1050 \text{ mm}$$

$$n = \frac{D}{dw}$$

$$= \frac{1050}{65,57}$$

$$= 16,01$$

Perhitungan $F(n)$:

$$F_n = \left(\frac{16,01^2}{16,01^2 - 1} \right) \left[\ln(16,01 - \frac{3}{4} - \frac{1}{4(16,01)^2}) \right]$$

$$= 2,034$$

1. Perhitungan F_n PVD pola segitiga selanjutnya ditunjukkan dalam Tabel 5.4

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan F_n PVD

JARAK PVD S (m)	D (mm)	a (mm)	b (mm)	Dw (mm)	n	F(n)
1,00	1.050	100	3	65,57	16,01	2,034
1,25	1.312,5	100	3	65,57	20,02	2,254
1,50	1.575	100	3	65,57	24,02	2,434

2. Perhitungan U_h

Untuk perhitungan U_h pola segitiga dan jarak 1,0 m pada minggu pertama

$$D = 1.050 \text{ mm}$$

$$= 1,050 \text{ m}$$

$$F(n) = 2,034$$

$$t = 1 \text{ minggu}$$

$$= 604800 \text{ detik}$$

$$C_h = C_v \times (K_h/K_s)$$

$$= 0,00128 \times 3$$

$$= 0,00384 \text{ cm}^2/\text{sec}$$

$$= 0,232 \text{ m}^2/\text{minggu}$$

$$U_h = 1 - \left[\frac{1}{\frac{1 \times 8 \times 0,232}{e^{\left[\frac{1 \times 8 \times 0,232}{1,050^2 \times 2 \times 2,034} \right]}}} \right] \times 100\%$$

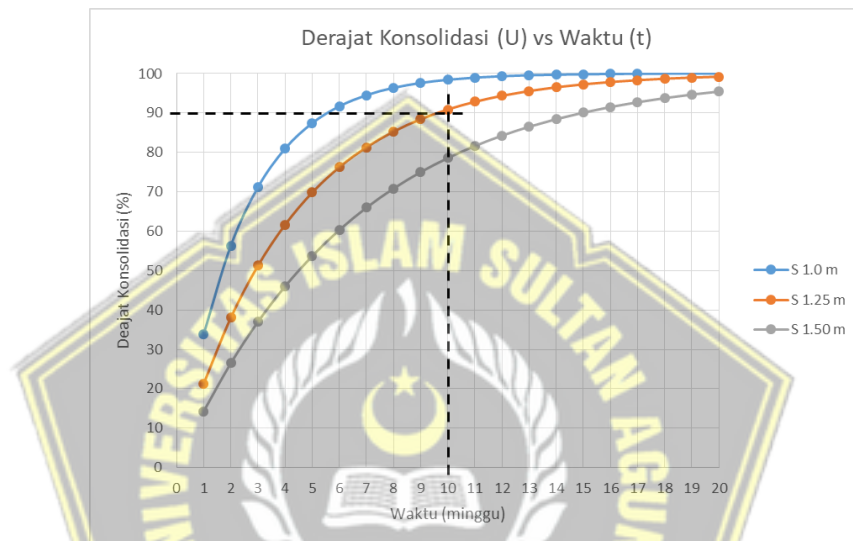
$$= 33,92 \%$$

4.8.3. Perhitungan Derajat Konsolidasi Rata-rata (\bar{U})

Untuk mendapatkan derajat konsolidasi rata-rata dengan rumus (2.38), pada pola pemasangan segitiga dengan spasi 1.1 m adalah :

$$\begin{aligned}
\bar{U} &= [1 - (1 - U_h)x((1 - U_v))] \times 100\% \\
&= [1 - (1 - 0,3392)x((1 - 0.0157))] \times 100\% \\
&= 34,95 \%
\end{aligned}$$

Dari perhitungan tersebut dibuat grafik yang menunjukkan hubungan antara derajat konsolidasi rata-rata dengan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi (\bar{U}). Berdasarkan grafik tersebut, dipilih jarak pemasangan PVD sebesar 1,25 meter. Untuk mencapai derajat konsolidasi 90%, atau tepatnya 91,31%, dibutuhkan waktu selama 10 minggu.



Gambar 4.12 Grafik Hubungan Antara Derajat Konsolidasi dan Waktu

4.9. Perhitungan konsolidasi menggunakan program Plaxis

Dari hasil perhitungan diatas dapat diketahui waktu penurunan dan total penurunan yang terjadi pada timbunan di proyek jalan Tol Serpong - Balaraja tanpa PVD maupun menggunakan PVD dapat di prediksi. Selain prediksi penurunan menggunakan teori konsolidasi 1D dari Terzaghi, kemudian divalidasi menggunakan program komputer.


Program computer/PLAXIS merupakan suatu program yang secara khusus ditujukan untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas masalah-masalah geoteknik.

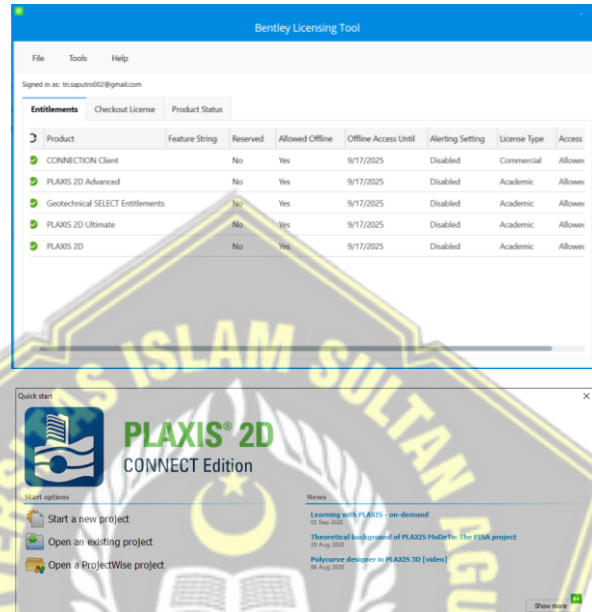
Dalam suatu analisis geoteknik dengan menggunakan prinsip elemen hingga, diperlukan suatu model tegangan regangan dari tanah untuk mensimulasikan perilaku tidak linier dan ketergantungan terhadap waktu dari tanah. Selain itu karena tanah termasuk multi-phase material, maka perlu diperhitungkan tekanan pori hidrostatik dan non hidrostatik di dalam tanah.

4.9.1. Tahap pemodelan pada Plaxis

Perhitungan penurunan pada proyek serpong balaraja menggunakan software Plaxis adalah sebagai berikut:

1. Buka Program Plaxis

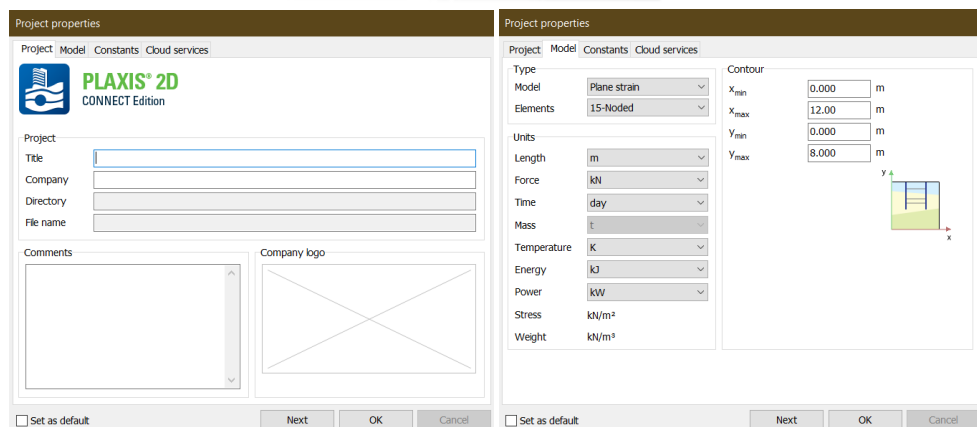
Untuk membuka program Plaxis yang ada di komputer bisa dipilih simbol Plaxis () dan akan muncul seperti gambar dibawah ini.



Gambar 4.13 Halaman Awal Plaxis

2. Klik start a new project


Jendela properti proyek muncul dengan empat lembar tab: Proyek, Model, Constant, dan Cloud Service. Pada bagian Project diisi judul pekerjaan. Pada lembar Model, pastikan bahwa Model diatur ke Plane strain dan Elements diatur ke 15-Noded.

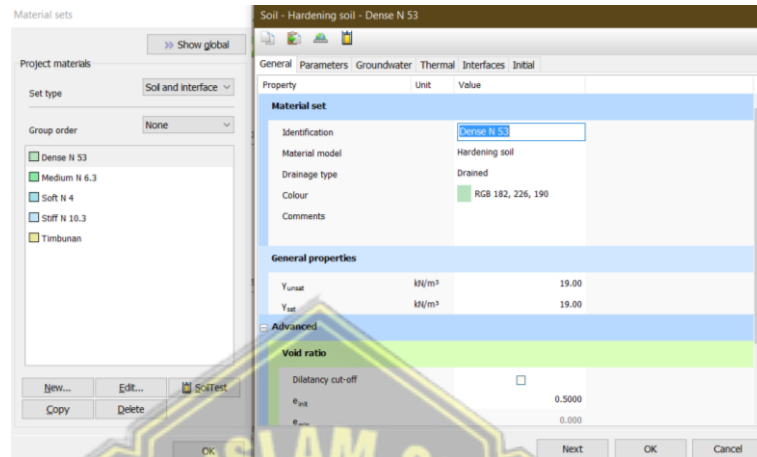


Gambar 4.14 Project Properties

3. Membuat dan menetapkan data material

Untuk membuat material Plaxis seperti langkah-langkah berikut:


- Klik tombol material ().
- Buat data material tanah dan tetapkan ke lapisan yang sesuai.

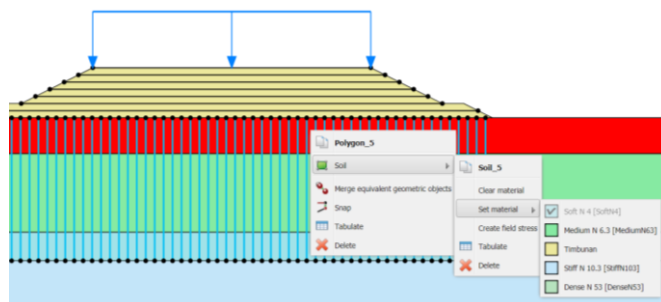


Gambar 4.15 *Soil Properties*

4. Membuat Permodelan konstruksinya

Tanggul dan saluran air ditetapkan dalam mode Struktur.

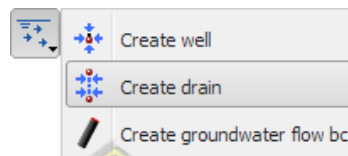
- Klik tab Struktur untuk melanjutkan input elemen struktural dalam mode Struktur.
- a. Untuk menentukan tanggul:
 - Klik tombol Buat poligon () tanah di bilah alat samping dan pilih opsi Buat poligon tanah.
 - Tentukan tanggul di area gambar
 - Klik kanan poligon yang telah dibuat dan tetapkan set data Tanggul ke poligon tanah tersebut.



Gambar 4.16 *Assignment of a material dataset to a soil cluster in the drawing area*

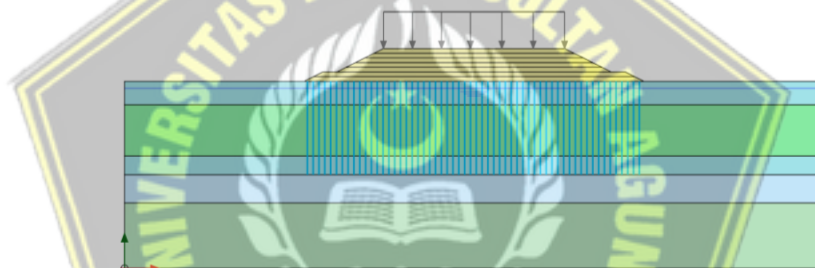
- Untuk menentukan tingkat konstruksi tanggul, klik tombol Potong poligon di bilah alat samping dan tentukan garis potong.
 - Kluster tanggul dibagi menjadi dua sub-kluster.
- b. Untuk menentukan saluran pembuangan

Dalam proyek ini, pengaruh drain terhadap waktu konsolidasi akan diselidiki dengan membandingkan hasilnya dengan kasus tanpa drain. Drain hanya akan aktif untuk fase perhitungan dalam kasus dengan drain.



Gambar 4.17 *Material PVD*

Drainase ditentukan pada lapisan lunak. Jarak antara dua drainase yang berurutan adalah 1.25 m.

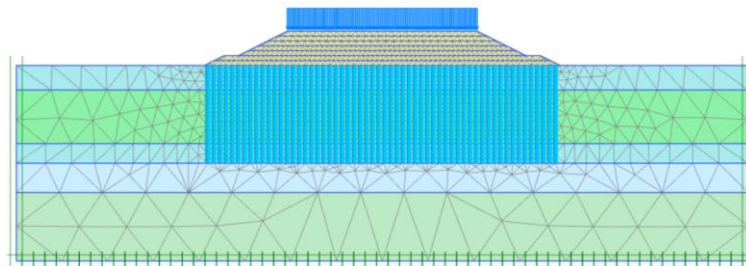


Gambar 4.18 *Permodelan dengan PVD*

5. Buat mesh

Untuk membuat mesh, ikuti langkah-langkah berikut:

- Lanjutkan ke mode Mesh.
- Klik tombol Hasilkan Mesh di bilah alat samping. Untuk parameter Distribusi Elemen, gunakan opsi Medium (default).
- Klik tombol Lihat Mesh untuk melihat Mesh.



Gambar 4.19 *Output Mesh*

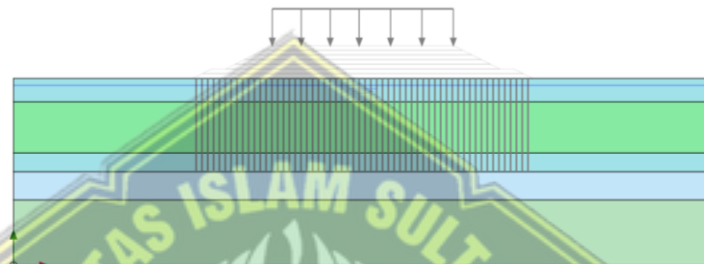
- Klik tab Tutup untuk menutup program Output.

6. Lakukan perhitungan

Konstruksi tanggul dibagi menjadi dua tahap. Setelah tahap konstruksi pertama, periode konsolidasi selama 30 hari diterapkan agar tekanan pori berlebih dapat menghilang. Setelah tahap konstruksi kedua, periode konsolidasi berikutnya diterapkan untuk menentukan penurunan akhir. Oleh karena itu, total empat tahap perhitungan harus ditentukan selain tahap awal.

a. Pada situasi awal.

Geometri aktif yang tersisa adalah horizontal dengan lapisan horizontal, sehingga prosedur K0 dapat digunakan untuk menghitung tegangan awal.



Gambar 4.20 Kondisi Awal

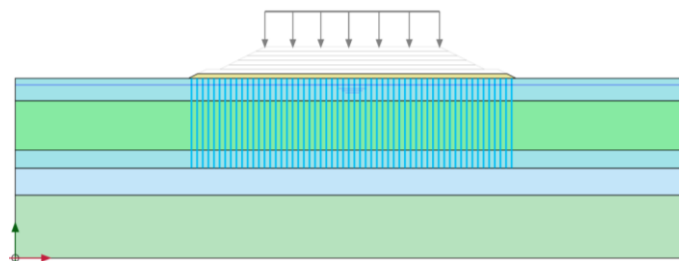
Tekanan air awal sepenuhnya hidrostatik dan berdasarkan garis freatik yaitu -1m sesuai dengan data borlog.

b. Tahapan Analisis

Tahapan analisis yang digunakan adalah analisis bertahap dari pemasangan PVD – timbunan badan jalan – preloading – sampai dengan umur konstruksi 10 tahun.

Tahap 1 : Pemasangan PVD

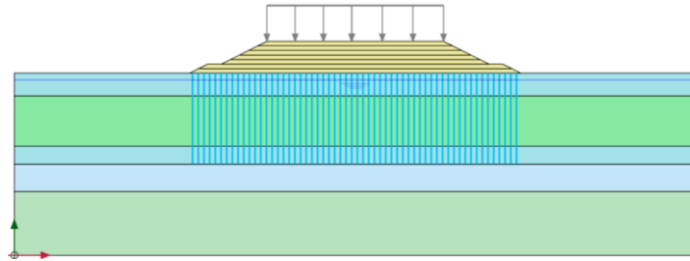
Pemasangan PVD dilakukan mulai dari tanah eksisting sedalam 20 m, dengan jarak pemasangan 1,0 m, 1,25 m dan 1,5 m.



Gambar 4.21 Pemasangan PVD

Tahap 2 : Timbunan Badan Jalan

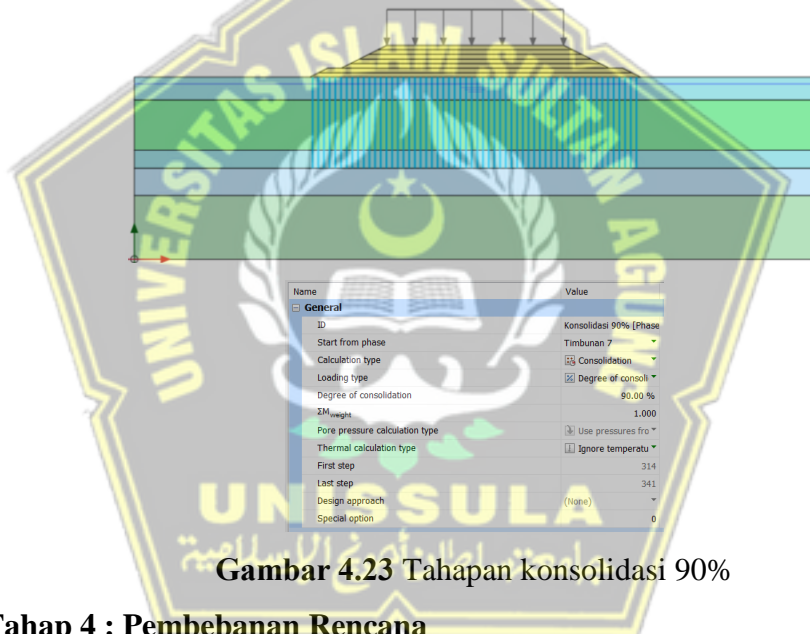
Penimbunan tanah dilakukan dari eksisting sampai dengan tinggi timbunan rencana dengan rencana penimbunan 1 meter dengan waktu 7 hari.



Gambar 4.22 Tahapan Penimbunan Badan Jalan

Tahap 3 : Konsolidasi 90%

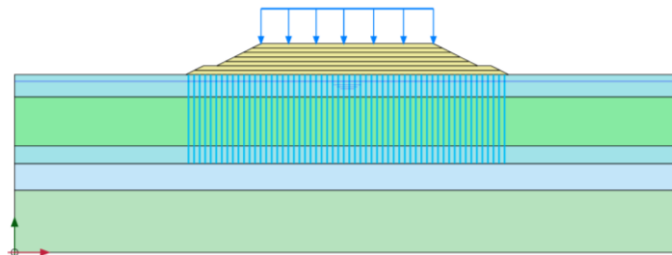
Tahapan konsolidasi 90% yaitu untuk mengetahui besar penurunan yang terjadi pada tinggi rencana timbunan.



Gambar 4.23 Tahapan konsolidasi 90%

Tahap 4 : Pembebanan Rencana

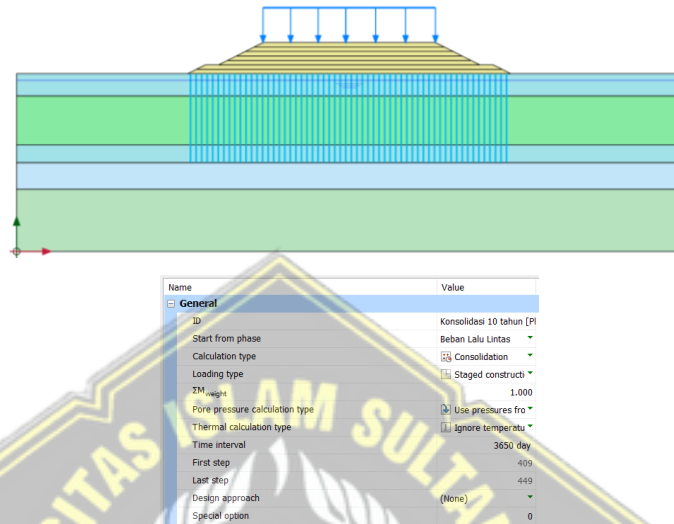
Tahap ini meliputi pemberian beban rencana sesuai dengan kelas jalan yang berlaku. Dalam hal ini beban rencana yang diinputkan dalam program Plaxis ini sebesar 15 kN/m sepanjang rencana badan jalan.



Gambar 4.24 Tahapan Beban Rencana

Tahap 5 : Masa layan 10 Tahun setelah konstruksi

Tahap ini merupakan tahapan konsolidasi selama 10 tahun dimana rencana konstruksi jalan memiliki umur 10 tahun untuk melihat seberapa besar penurunan yang terjadi dari akhir konstruksi sampai dengan umur konstruksi.

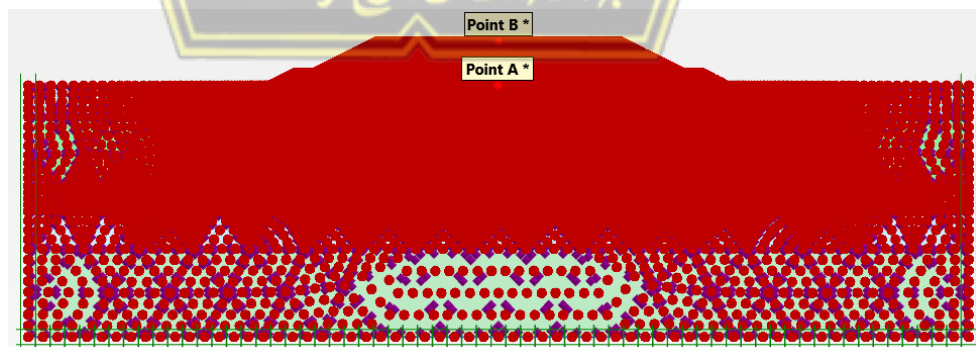


Gambar 4.25 Tahapan masa layan 10 tahun

c. Lakukan perhitungan

Sebelum memulai perhitungan, disarankan untuk memilih titik tegangan untuk pembuatan kurva atau diagram tegangan dan regangan. Untuk melakukannya, ikuti langkah-langkah berikut.


- Klik tombol *select points for curve* () dan tentukan titik kurva pada tanah dasar dan elevasi rencana timbunan.



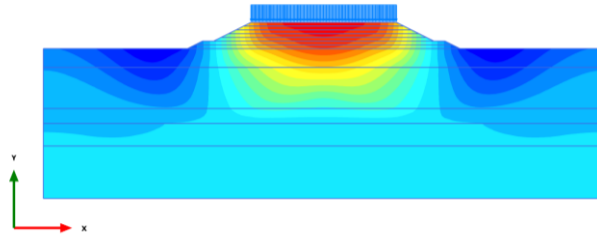
Gambar 4.26 Titik Monitoring

- Klik tombol *calculate* () untuk menghitung permodelan dan tunggu sampai dengan semua tahapan analisis selesai di hitung.

7. Hasil

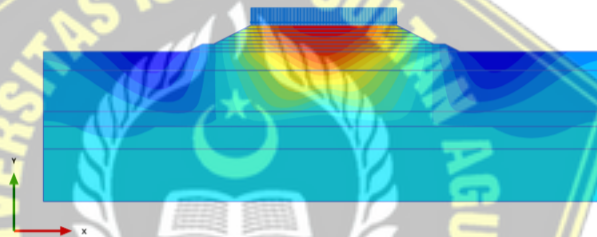
Setelah perhitungan selesai, pilih setiap tahapan dan klik tombol Lihat hasil perhitungan ()

a. Hasil analisis tanpa PVD



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)
Maximum value = 0.4549 m (Element 689 at Node 4872)
Minimum value = -1.258 m (Element 3 at Node 3652)

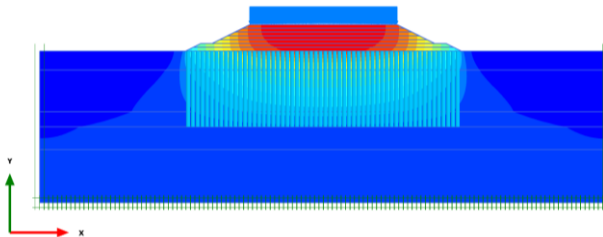
Gambar 4.27 Penurunan 1,258 m (Akhir Konstruksi)



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times) (Time 5434 day)
Maximum value = 0.9385 m (Element 689 at Node 4873)
Minimum value = -2.451 m (Element 3 at Node 3651)

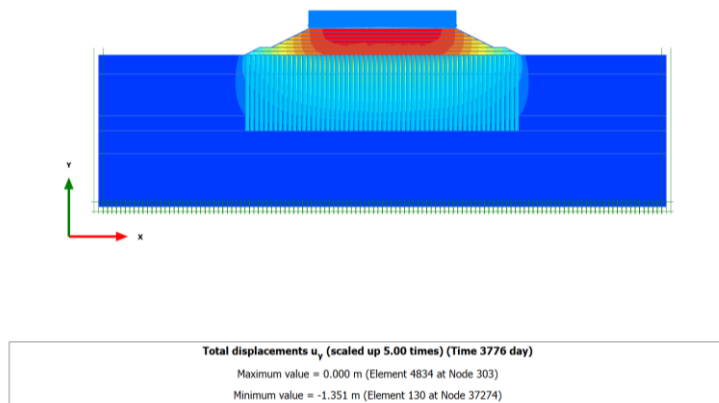
Gambar 4.28 Penurunan 2,451 m (Masa Layan 10 Tahun)

b. Hasil Analisis dengan PVD



Total displacements u_y (scaled up 5.00 times)
Maximum value = 0.03469 m (Element 2875 at Node 16691)
Minimum value = -1.285 m (Element 130 at Node 37271)

Gambar 4.29 Penurunan 1,285 m (Akhir Konstruksi)

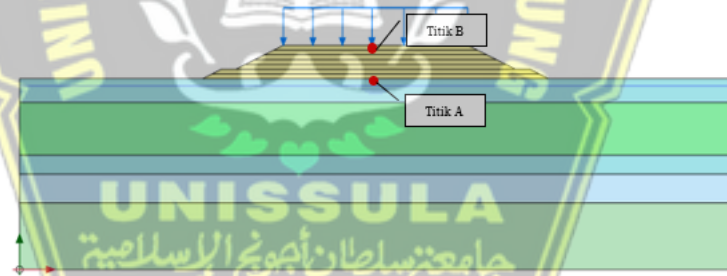


Gambar 4.30 Penurunan 1,351 m (Masa Layan 10 Tahun)

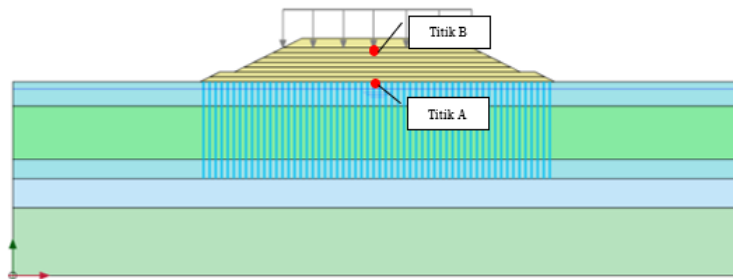
Terlihat bahwa penurunan total tanpa PVD sebesar 1,258 m pada akhir konstruksi dan 2,451 m pada masa layan 10 tahun, sedangkan total penurunan yang terjadi saat menggunakan PVD yaitu sebesar 1,285 m pada akhir konstruksi dan 1,351 m pada masa layan 10 tahun.

c. Kurva Penurunan

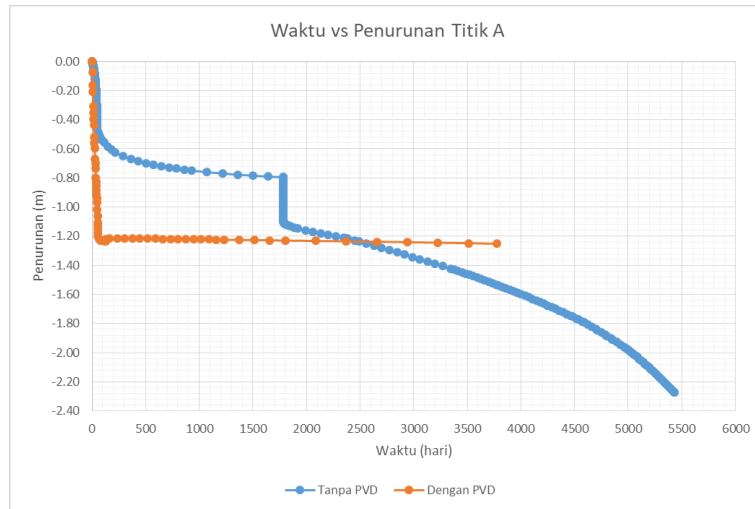
Kurva penurunan atau titik monitoring di tinjau pada permodelan tanpa PVD maupun dengan PVD yang diletakkan pada tanah eksisting dan top elevasi rencana seperti gambar berikut.



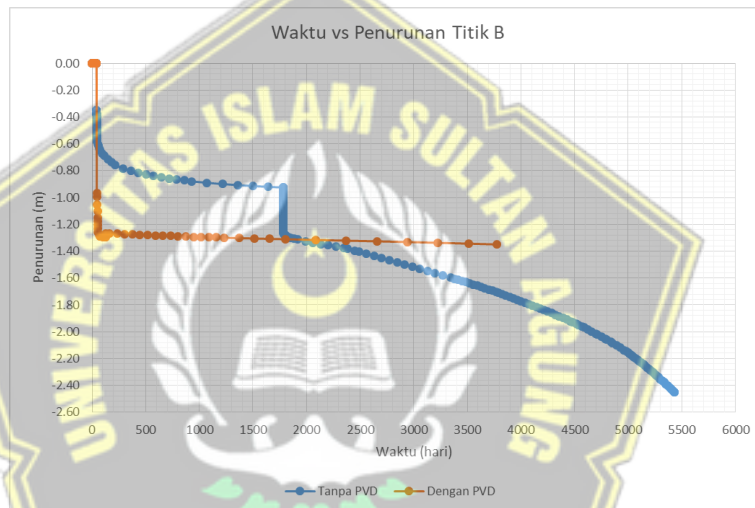
Gambar 4.31 Titik Monitoring tanpa PVD Preloading



Gambar 4.32 Titik Monitoring dengan PVD Preloading



Gambar 4.33 Grafik Penurunan Titik A



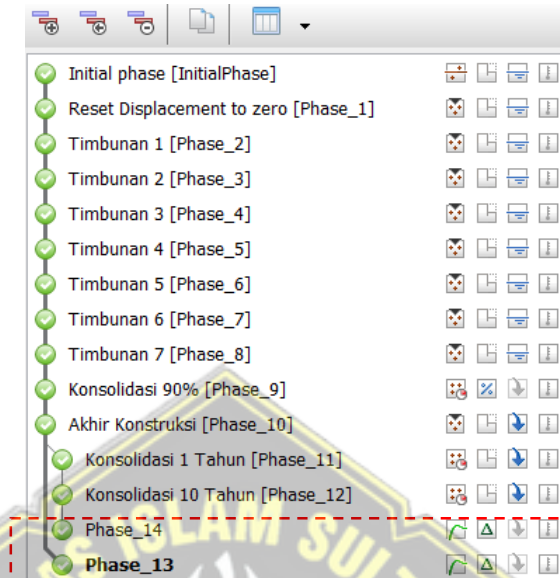
Gambar 4.34 Grafik Penurunan Titik B

Untuk mendapatkan konsolidasi 90%, permodelan tanpa PVD membutuhkan waktu 1.731 hari atau 247 minggu dengan penurunan pada akhir konstruksi sebesar 1,10 m dan pada masa layan 10 tahun sebesar 2,273 m. Sehingga masih terdapat penurunan sebesar 1,173 m dari akhir konstruksi sampai dengan masa layan 10 tahun.

Pada permodelan menggunakan PVD dengan waktu konsolidasi 10 minggu didapatkan penurunan pada akhir konstruksi sebesar 1,235 m dan pada masa layan 10 tahun sebesar 1,252 m. Sehingga masih terdapat penurunan sebesar 0,017 m atau 1,7 cm dari akhir konstruksi sampai dengan masa layan 10 tahun.

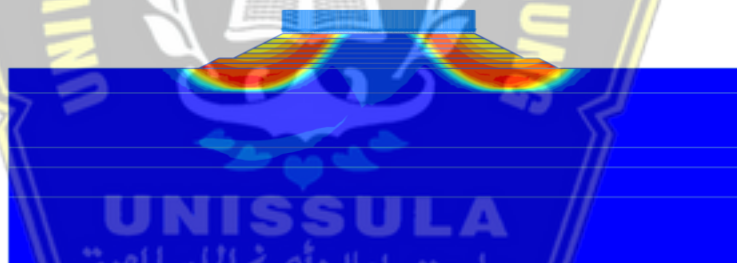
d. Angka Keamanan

Untuk melihat faktor keamanan global untuk timbunan jalan dapat dipilih opsi outup untuk melihat hasil deformasi pada setiap langkah permodelan.



Gambar 4.35 Tahapan pemilihan Faktor Keamanan

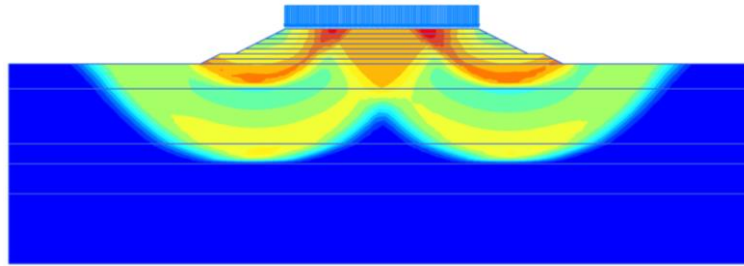
Dapat dilihat pada tahap 13 dan 14 untuk melihat faktor keamanan pada akhir konstruksi dan masa layan 10 tahun dengan hasil sebagai berikut:



Gambar 4.36 Deformasi Faktor Keamanan Pada Akhir Konstruksi (Tanpa PVD)

Reached values	
Reached total time	1784 day
CSP - Relative stiffness	0.01796E-15
ForceX - Reached total force X	0.000 kN/m
ForceY - Reached total force Y	0.000 kN/m
Pmax - Reached max pp	182.8 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase proportion	0.000
ΣM_{weight} - Reached weight proportion	1.000
ΣM_{sf} - Reached safety factor	1.102

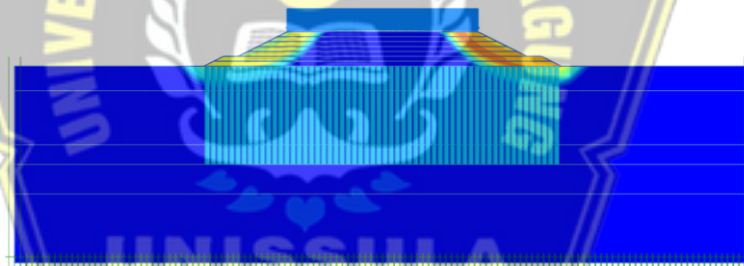
Gambar 4.37 Faktor Keamanan Pada Akhir Konstruksi sebesar 1,102 (Tanpa PVD)



Gambar 4.38 Deformasi Faktor Keamanan pada Masa Layan 10 Tahun
(Tanpa PVD)

Reached values	
Reached total time	5434 day
CSP - Relative stiffness	-0.5898E-15
ForceX - Reached total force X	0.000 kN/m
ForceY - Reached total force Y	0.000 kN/m
Pmax - Reached max pp	175.8 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase proportion	0.000
ΣM_{weight} - Reached weight proportion	1.000
ΣM_{sf} - Reached safety factor	1.030

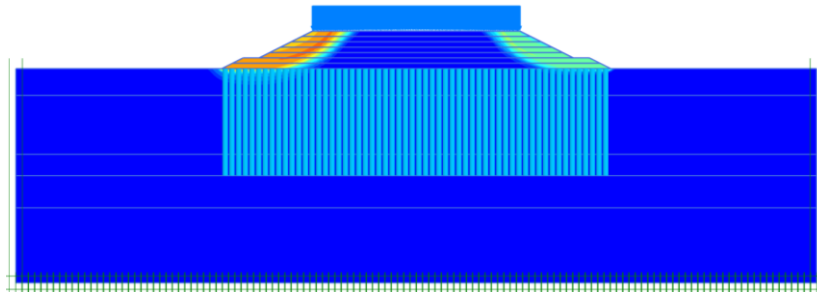
Gambar 4.39 Faktor Keamanan pada Masa Layan 10 Tahun sebesar 1,030
(Tanpa PVD)



Gambar 4.40 Deformasi Faktor Keamanan Pada Akhir Konstruksi (Dengan PVD)

Reached values	
Reached total time	126.0 day
CSP - Relative stiffness	-0.1012E-15
ForceX - Reached total force X	0.000 kN
ForceY - Reached total force Y	0.000 kN
Pmax - Reached max pp	1081 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase proportion	0.000
ΣM_{weight} - Reached weight proportion	1.000
ΣM_{sf} - Reached safety factor	1.549

Gambar 4.41 Faktor Keamanan Pada Akhir Konstruksi sebesar 1,549
(Dengan PVD)



Gambar 4.42 Deformasi Faktor Keamanan pada Masa Layan 10 Tahun
(Dengan PVD)

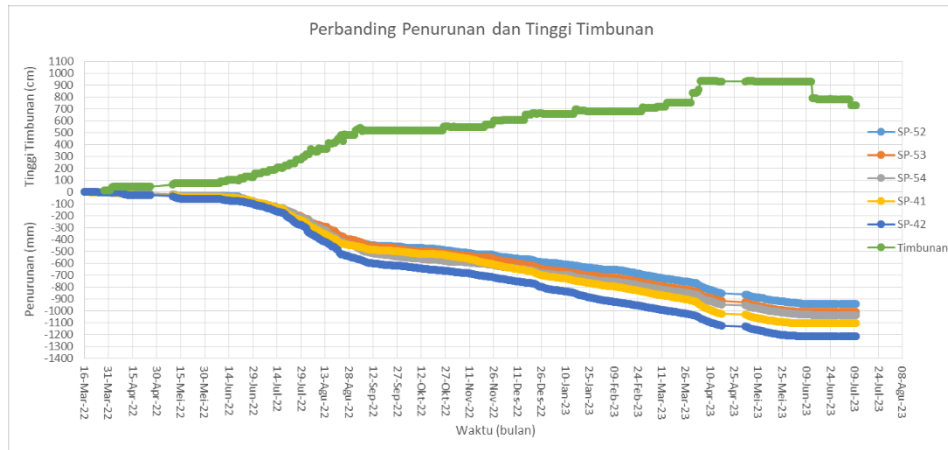
Reached values	
Reached total time	3776 day
CSP - Relative stiffness	-0.1048E-15
ForceX - Reached total force X	0.000 kN
ForceY - Reached total force Y	0.000 kN
Pmax - Reached max pp	1035 kN/m ²
ΣM_{stage} - Reached phase proportion	0.000
ΣM_{weight} - Reached weight proportion	1.000
ΣM_{sf} - Reached safety factor	1.409

Gambar 4.43 Faktor Keamanan pada Masa Layan 10 Tahun sebesar 1,409
(Dengan PVD)

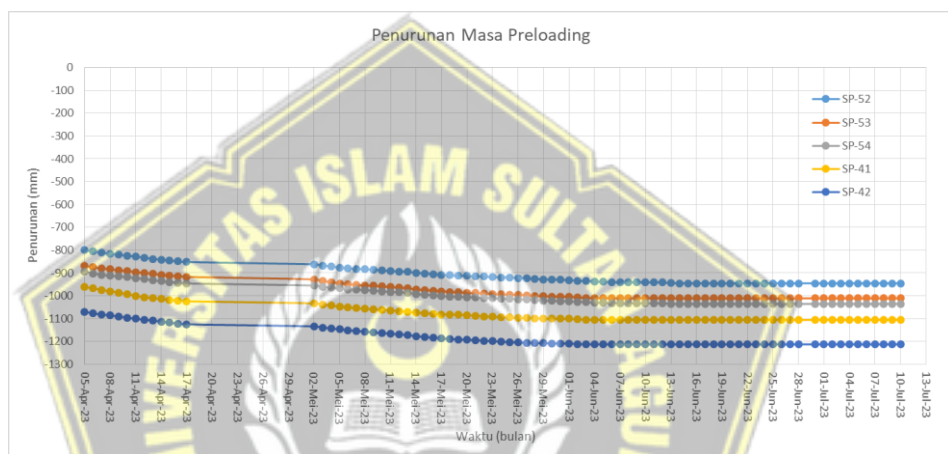
Faktor keamanan yang terjadi tanpa PVD sebesar 1,102 pada akhir konstruksi dan 1,030 pada masa layan 10 tahun, sedangkan faktor keamanan yang terjadi saat menggunakan PVD yaitu sebesar 1,549 m pada akhir konstruksi dan 1,409 m pada masa layan 10 tahun.

4.10. Interpretasi Settlement Plate dengan Metode Asaoka

Settlement plate terdiri dari pelat baja dan *settlement rods*. Data dari *settlement plate* sangat bergantung dari proses pemasangan, posisi penempatan / kondisi bahan yang kurang bagus sehingga rentan rusak. Pembacaan *settlement plate* dilakukan dari awal penimbunan sampai dengan selesainya konstruksi. Dimana perbandingan antara tinggi timbunan dan penurunan dapat dilihat seperti gambar berikut.



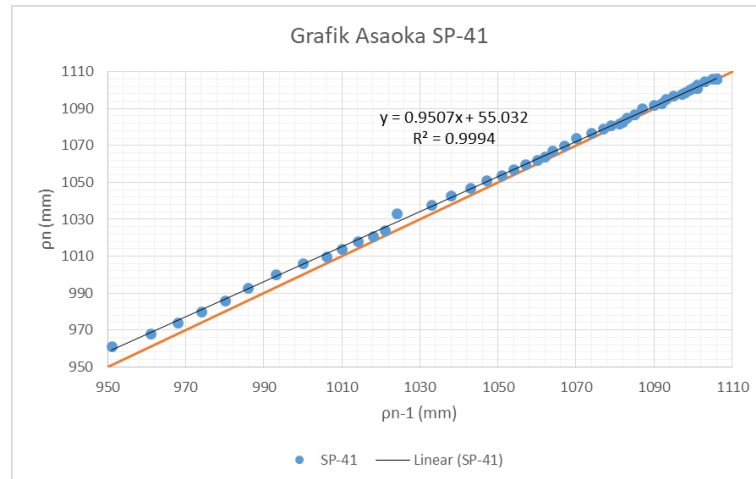
Gambar 4.44 Grafik Penurunan dan Tinggi Timbunan



Gambar 4.45 Penurunan *Settlement Plate* Pada Saat Timbunan *Preloading*

Menurut grafik pembacaan *settlement plate* (SP) 41, 42, 52, 53 dan 53 memiliki bentuk *settlement* yang sama yaitu pada saat dilakukan penambahan timbunan maka terjadi penurunan pada pembacaan *settlement plate*. Penurunan terbesar menurut pembacaan *settlement plate*, yaitu terjadi pada SP 42 dengan total penurunan sebesar 1,213 m.

Untuk memperkirakan penurunan akhir, maka data *settlement plate* harus dipilih, sehingga didapatkan nilai penurunan $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$ dengan interval waktu (Δt). Kemudian nilai ρ_n (sumbu-y) dan nilai ρ_{n-1} (sumbu-x) diplot sehingga diperoleh titik yang membentuk garis lurus.



Gambar 4.46 Grafik Settlement Plate (SP) 41

Perhitungan Estimasi Penurunan Akhir SP-41

Dari Grafik Asaoka diatas, didapat nilai sebagai berikut:

$$\alpha = 55,032$$

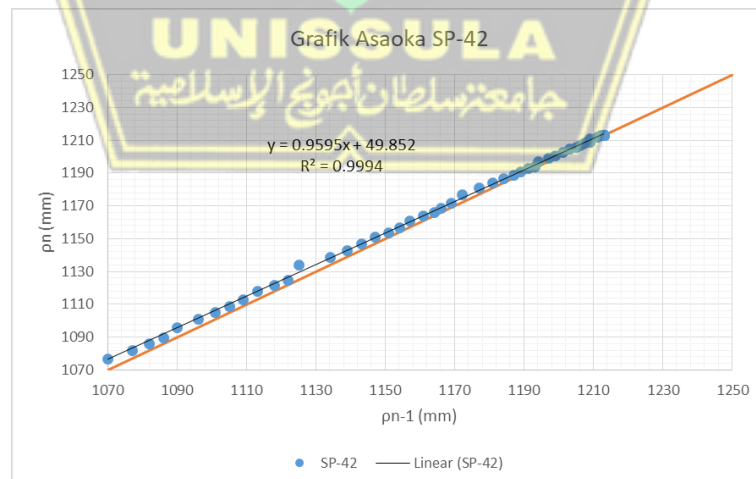
$$\beta = 0,9507$$

$$sf = S_{ult} = \frac{\alpha}{(1-\beta)}$$

$$S_{ult} = 1.116 \text{ mm}$$

$$S_c = 1.106 \text{ mm}$$

$$U (\%) = 99,08 \%$$



Gambar 4.47 Grafik Settlement Plate (SP) 42

Perhitungan Estimasi Penurunan Akhir SP-42

Dari Grafik Asaoka diatas, didapat nilai sebagai berikut:

$$\alpha = 49,852$$

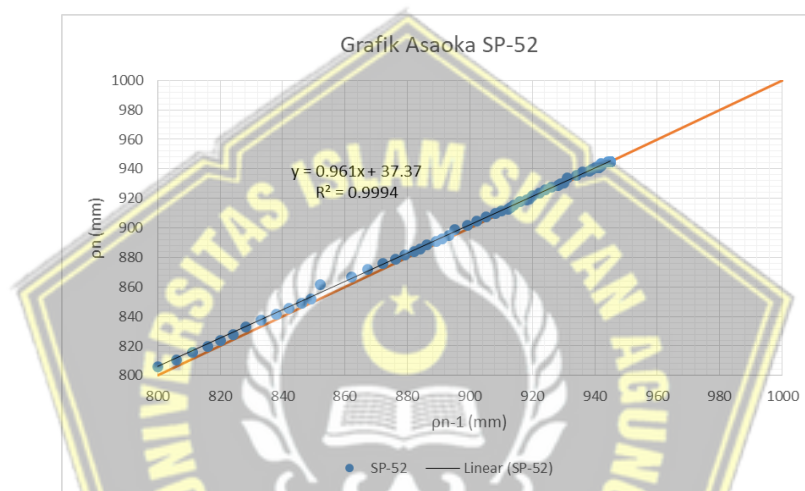
$$\beta = 0,9595$$

$$sf = S_{ult} = \frac{\alpha}{(1-\beta)}$$

$$S_{ult} = 1.231 \text{ mm}$$

$$S_c = 1.213 \text{ mm}$$

$$U (\%) = 98,54 \%$$



Gambar 4.48 Grafik Settlement Plate (SP) 52

Perhitungan Estimasi Penurunan Akhir SP-52

Dari Grafik Asaoka diatas, didapat nilai sebagai berikut:

$$\alpha = 37,37$$

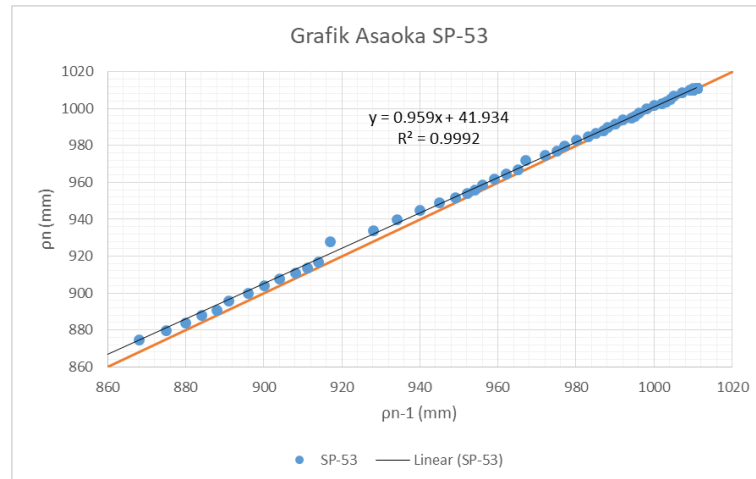
$$\beta = 0,961$$

$$sf = S_{ult} = \frac{\alpha}{(1-\beta)}$$

$$S_{ult} = 958 \text{ mm}$$

$$S_c = 945 \text{ mm}$$

$$U (\%) = 98,62 \%$$



Gambar 4.49 Grafik Settlement Plate (SP) 53

Perhitungan Estimasi Penurunan Akhir SP-53

Dari Grafik Asaoka diatas, didapat nilai sebagai berikut:

$$\alpha = 41,934$$

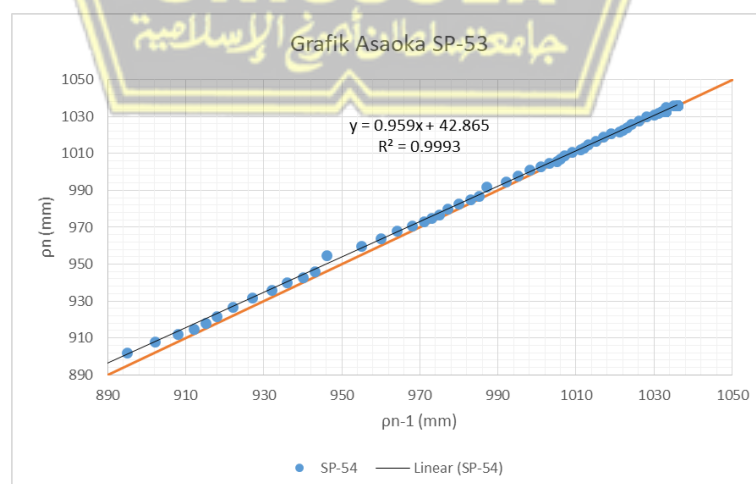
$$\beta = 0,959$$

$$sf = S_{ult} = \frac{\alpha}{(1-\beta)}$$

$$S_{ult} = 1.023 \text{ mm}$$

$$S_c = 1.011 \text{ mm}$$

$$U (\%) = 98,85 \%$$



Gambar 4.50 Grafik Settlement Plate (SP) 54

Perhitungan Estimasi Penurunan Akhir SP-54

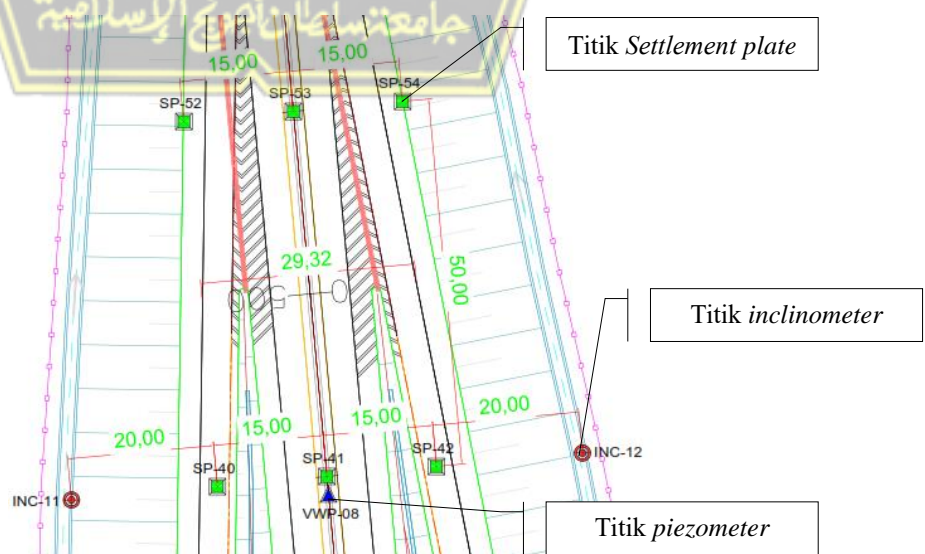
Dari Grafik Asaoka diatas, didapat nilai sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\alpha &= 42,865 \\ \beta &= 0,959 \\ sf &= S_{ult} = \frac{\alpha}{(1-\beta)} \\ S_{ult} &= 1.045 \text{ mm} \\ S_c &= 1.036 \text{ mm} \\ U (\%) &= 99,09 \%\end{aligned}$$

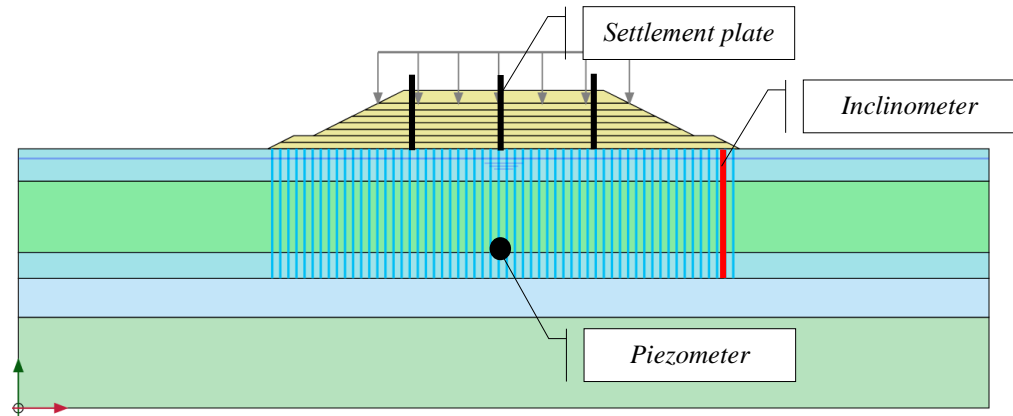
Prediksi Penurunan menggunakan metode asaoka yang diterpkan pada grafik settlement plate nomor 41, 42, 52, 53 dan 54 menunjukkan besar penurunan antara 0,945 m sampai dengan 1,213 m. Derajat konsolidasi (U) yang terjadi pada timbunan dengan rencana ketinggian 7 m yaitu 98% sampai dengan 99%.

4.11. Perbandingan Monitoring Aktual Lapangan dengan Hasil Analisis Plaxis

Layout monitoring aktual di lapangan yang ditunjukkan pada gambar 4.51 dan 4.52 meliputi monitoring penurunan dengan (*Settlement plate*), kenaikan tekanan air pori dengan (*piezometer*) dan deformasi lateral dengan (*inclinometer*) kemudian hasil dari monitoring tersebut di bandingkan dengan hasil analisis Plaxis.



Gambar 4.51 Layout Monitoring Aktual



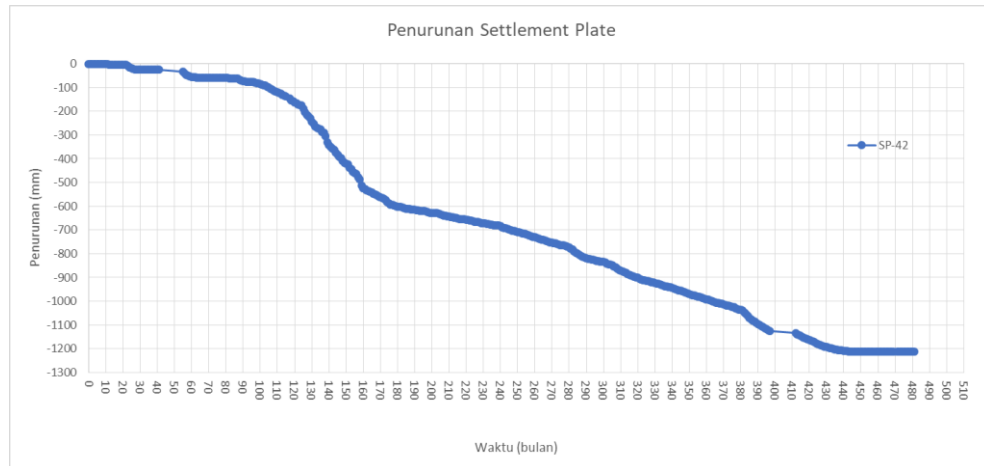
Gambar 4.52 Titik Monitoring Plaxis

Titik *settlement plate* diletakkan di atas tanah eksisting yaitu di tengah, samping kanan dan samping kiri timbunan untuk memonitoring Penurunan tanah. Titik *piezometer* diletakkan pada kedalaman 16 m dari tanah eksisting untuk memonitoring perubahan tekanan air pori, sedangkan titik *inclinometer* diletakkan kaki timbunan untuk memonitoring deformasi lateral. Pengambilan data monitoring efektif dilakukan pada pagi hari sebelum pekerjaan timbunan dimulai.

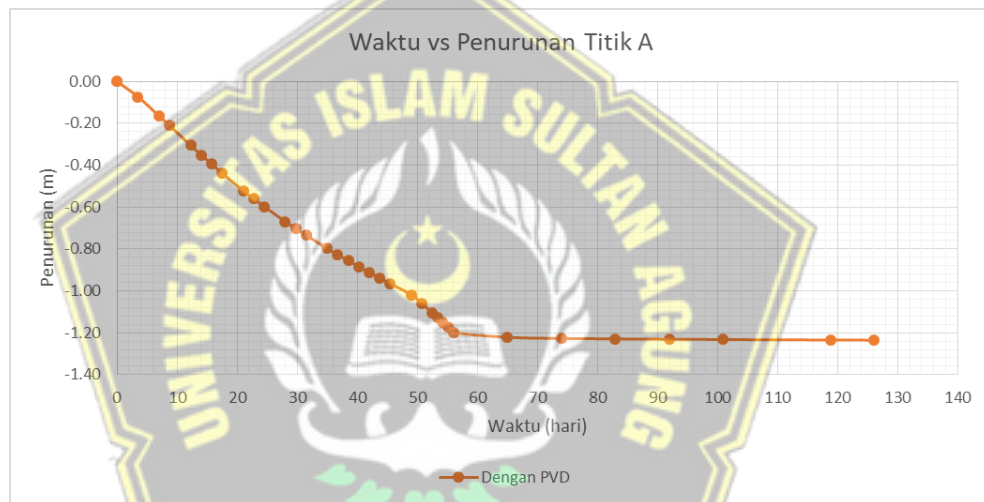


Gambar 4.53 Pengambilan Data Monitoring Aktual

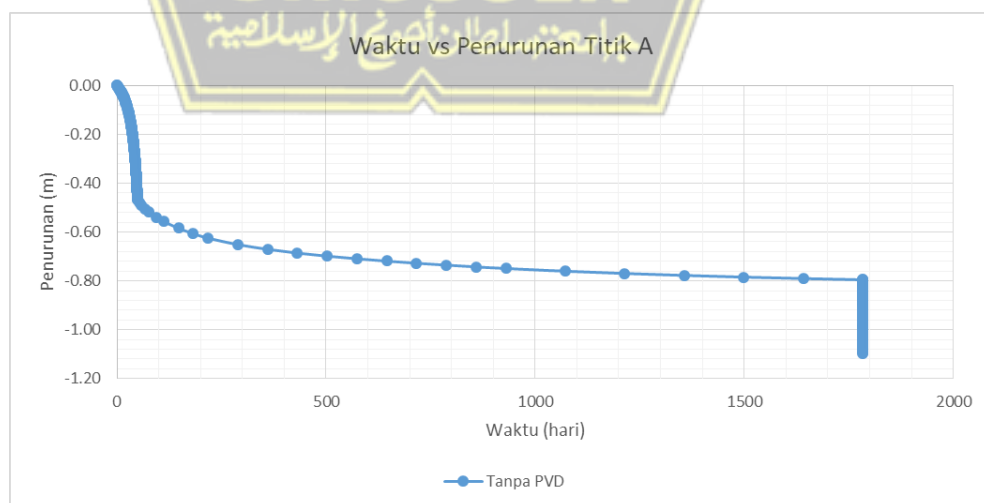
Dari hasil monitoring di lapangan dan pembacaan data pada analisis Plaxis, kemudian di gambarkan pada grafik di bawah ini:



Gambar 4.54 Grafik Pembacaan Penurunan Aktual



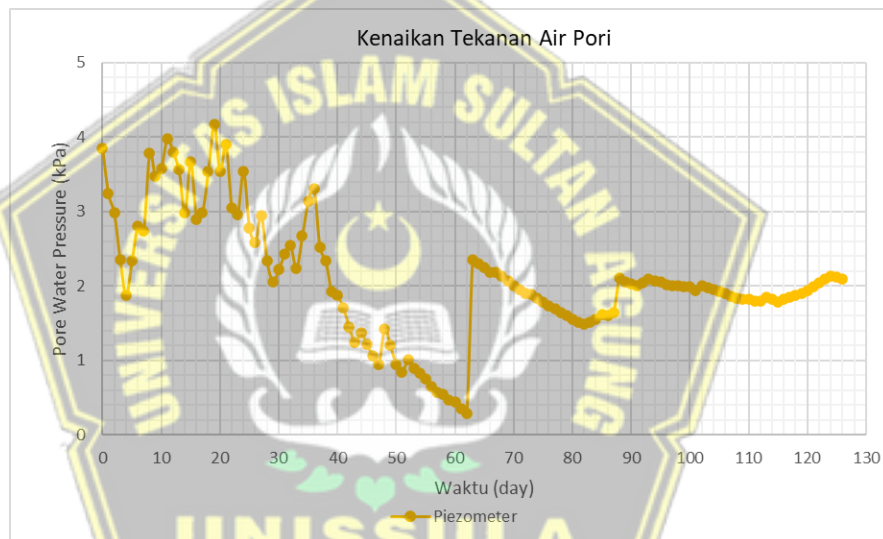
Gambar 4.55 Grafik Monitoring Penurunan Analis Plaxis dengan PVD



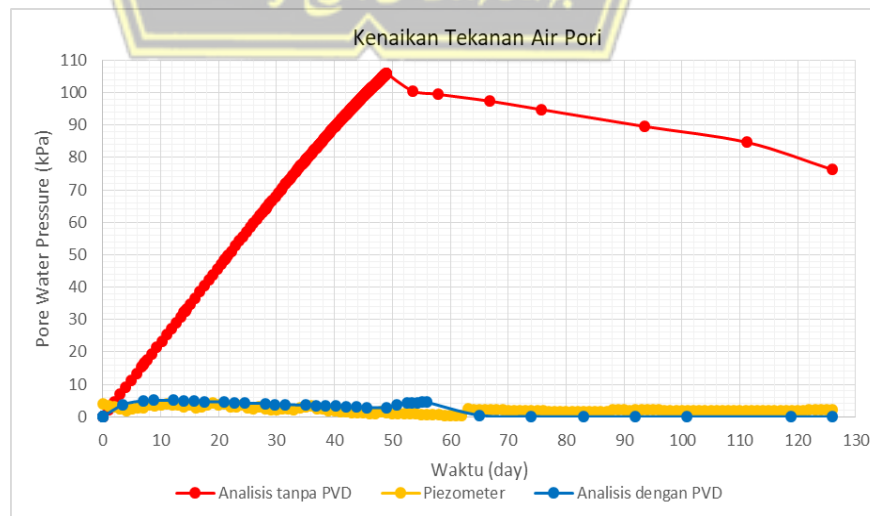
Gambar 4.56 Grafik Monitoring Penurunan Analis Plaxis tanpa PVD

Penurunan yang terjadi menurut data settlement plate sebesar 1,213 yang terjadi pada settlement plate nomor 42. Hasil analisis tanpa PVD penurunan yang terjadi sebesar 1,100 m, sedangkan analisis dengan PVD penurunan yang terjadi sebesar 1,235 m.

Monitoring kenaikan tekanan air pori dilakukan menggunakan piezometer. Sensor pembacaan piezometer ditempatkan pada kedalaman 16 m yaitu terletak pada tanah dengan konsistensi *soft clay*. Hasil dari monitoring dengan piezometer di tampilkan pada gambar 4.57 dengan hasil kenaikan tekanan air pori berkisar 0,29 kPa sampai dengan 4,17 kPa. Kemudian hasil monitoring di lapangan di bandingkan dengan hasil analisis pada kedalaman yang sama dengan hasil seperti gambar 4.58.



Gambar 4.57 Grafik Kenaikan Tekanan Air Pori Piezometer

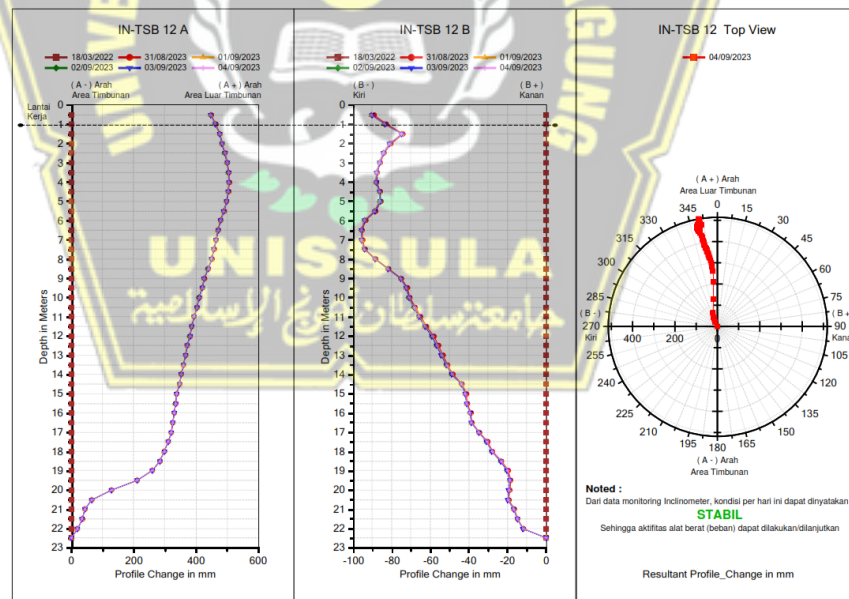


Gambar 4.58 Grafik Kenaikan Tekanan Air Pori Aktual dengan Analisis

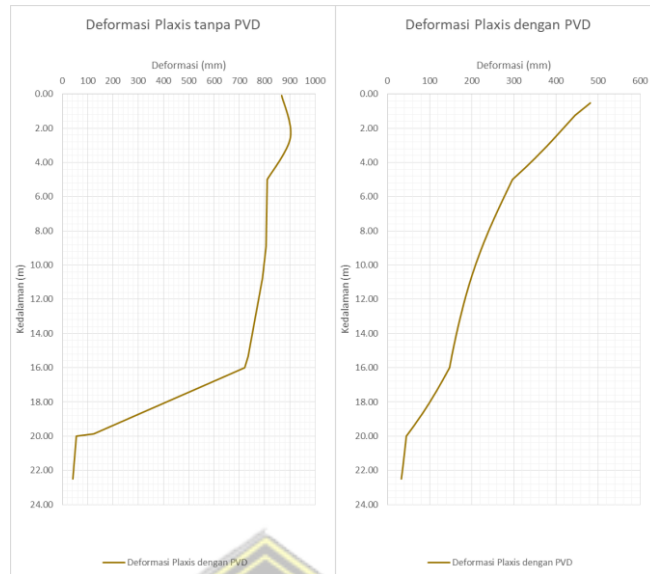
Pembacaan monitoring tekanan air pori menggunakan Pizometer maupun menggunakan Plaxis di monitoring pada kedalaman 16 m. Hasil kenaikan tekanan air pori aktual pada kedalaman 16 m yaitu maksimal 3,98 kPa. Pada analisis tanpa PVD didapatkan tekanan air pori sebesar 106 kPa sedangkan analisis dengan PVD didapatkan tekanan air pori sebesar 5,09 kPa.

Monitoring deformasi lateral di lapangan menggunakan *inclinometer* yang di pasang di kaki timbunan. *Inclinometer* di pasang dari tanah eksisting sampai dengan kedalaman 22 m hal ini untuk mengetahui seberapa besar deformasi lateral yang diakibatkan oleh timbunan di atas permukaan tanah.

Hasil dari monitoring *inclinometer* dapat di lihat pada gambar 4.59. Pada gambar tersebut dapat dilihat deformasi lateral yang terjadi ke arah kiri timbunan dengan besar deformasi lateral sebesar 498 mm. Rata-rata deformasi lateral per hari yaitu kurang dari 1mm/hari dari hal tersebut kondisi timbunan masih dikategorikan stabil. Kemudian deformasi lateral pada analisis Plaxis dapat dilihat pada gambar 4.60 dimana pengambilan data juga dilakukan pada kaki timbunan.



Gambar 4.59 Grafik Monitoring *Inclinometer*



Gambar 4.60 Grafik Pembacaan Deformasi Lateral Plaxis

Data monitoring inclinometer yang diambil pada akhir konstruksi dengan rata – rata pergerakan arah lateral kurang dari 1 mm/hari dan total pergerakan arah lateral sebesar 0,498 m, hasil pergerakan arah lateral pada analisis tanpa PVD sebesar 0,902 m sedangkan hasil pergerakan arah lateral pada analisis dengan PVD sebesar 0,482 m

Tabel 4. 7 Perbandingan Monitoring Aktual dengan Analisis Plaxis

No	Jenis Monitoring	Monitoring pada masa konstruksi		
		Aktual	Plaxis tanpa PVD	Plaxis dengan PVD
1	Penurunan (m)	1,213	1,100	1,235
2	Deformasi Lateral (m)	0,498	0,902	0,482
3	kenaikan Tekanan Air Pori (kPa)	3,98	106	5,09

Tabel 4. 8 Penurunan dan Faktor Keamanan pada Analisis Plaxis

No	Jenis Monitoring	Penurunan pada dasar timbunan (m)		SF
		Plaxis tanpa PVD	Plaxis dengan PVD	
1	Masa konstruksi	1,100	1,235	1,102
2	Masa layan	2,273	1,252	1,030
3	Selisih penurunan	1,173	0,017	-

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari hasil penelitian timbunan diatas tanah lunak pada proyek pembangunan jalan tol Serpong – Balaraja yaitu:

1. Besar penurunan menggunakan teori konsolidasi 1 dimensi didapatkan penurunan sebesar 1,852 m.
2. Jarak ideal pemasangan PVD yaitu 1,25 m, dikarenakan jarak yang terlalu rapat akan berpengaruh terhadap kenaikan biaya, sedangkan jika jarak terlalu renggang maka akan berengaruh terhadap waktu konsolidasi yang semakin lama.
3. Besar penurunan pada analisis tanpa PVD preloading didapatkan penurunan sebesar 1,100 m pada masa konstruksi, dan pada masa layan terjadi penambahan penurunan yang sangat besar yaitu sebesar 1,173 m sehingga tidak masuk dalam kriteria penurunan jangka panjang. Sedangkan besar penurunan pada analisis dengan PVD preloading didapatkan penurunan sebesar 1,235 m pada masa konstruksi, dan pada masa layan terjadi penambahan penurunan yang relatif kecil sebesar 0,017 m dan masuk kriteria penurunan untuk jangka panjang.
4. Faktor keamanan yang terjadi pada analisis tanpa PVD preloading didapatkan faktor keamanan sebesar 1,020. Sedangkan analisis menggunakan PVD preloading sebesar 1,409
5. Besar penurunan pada analisis tanpa PVD sebesar 1,100 m, besar penurunan dengan PVD Preloading sebesar 1,235 m sedangkan besar penurunan aktual sebesar 1,213. Deformasi lateral pada analisis tanpa PVD sebesar 0,902 m, pada analisis PVD Preloading sebesar 0,492 m, sedangkan deformasi lateral aktual yang terjadi sebesar 0,498 m. Kenaikan tekanan air pori yang terjadi pada analisis tanpa PVD 106 kPa, pada analisis dengan PVD preloading sebesar 5,09 kPa, sedangkan kenaikan tekanan air pori aktual yang terjadi sebesar 3,98 kPa. Dan derajat konsolidasi (U) terjadi aktual di lapangan sebesar 98% – 99%.

Pemakaian PVD sangat membantu dalam proses konsolidasi, sehingga waktu konsolidasi atau waktu tunggu yang dibutuhkan relatif cepat jika dibandingkan dengan konstruksi tanpa PVD.

Permodelan menggunakan software Plaxis terklarifikasi dengan hasil monitoring di lapangan yaitu menghasilkan nilai yang sesuai antara analisis dan aktual.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil analisis serta kesimpulan di atas, disarankan hal-hal sebagai berikut:

1. Penimbunan di lokasi bekas galian pasir atau danau sebaiknya menggunakan material berbutir seperti sirtu maupun batu pecah, hal ini untuk mengantisipasi terhadap pemadatan tanah yang tidak bisa maksimal jika menggunakan tanah merah atau material berbutir halus.
2. Pada penanganan tanah menggunakan PVD preloading sebaiknya ditambahkan geotextile woven sepanjang badan timbunan untuk meningkatkan faktor keamanan timbunan, terutama faktor keamanan di tepi timbunan yang dipengaruhi oleh air pori yang mengalir dari Horizontal Drain akibat pemasangan PVD.
3. Perlu pengamatan lebih lanjut terhadap penurunan yang terjadi menggunakan settlement plate atau sejenisnya untuk memastikan apakah penurunan yang terjadi setelah masa konstruksi sudah sangat minim bahkan mendekati angka 0

DAFTAR PUSTAKA

- A. Arafianto, G. A. Adiguna, and S. Rustiani, "Analisis Balik Kurva Penurunan terhadap Waktu pada Pekerjaan Reklamasi dengan Metode Elemen Hingga dan Evaluasi Derajat Konsolidasi Tanah Lunak Berdasarkan Hasil Monitoring Settlement Beacon," *J. Tek. Sipil*, vol. 29, no. 2, pp. 153–160, 2022.
- C. Puspita Lestari, E. Tyagita Utami, J. Hayati, and S. Syuhada, "Analisis Perbaikan Tanah Lunak Metode Preloading Kombinasi Prefabricated Vertical Drain dengan Variasi Spasi Pemasangan PVD (Studi Kasus: Jalan Tol Indralaya-Prabumulih, Sumatera Selatan)," *Orig. Artic. J. Infrastruct. Planning, Des.*, vol. 2, no. 1, pp. 26–32, 2022.
- D. A. Athaya Zhafirah, "Perencanaan Preloading Dengan Penggunaan Prefabricated Vertical Drain Untuk Perbaikan Tanah Lunak Pada Jalan Tol Pejagan-Pemalang," *Jur. Tek. Sipil – FTSP, ITS.*, vol. 21, no. 1, p. 10, 2000.
- D. S. Hardiman and K. Rinda, "The Improvement Of Soft Soil Layer For Toll Road Embankment On Java North Shore A Study Case On Jalan Tol Pejagan Pemalang," *Integr. Solut. to Overcome Clim. Chang. Impact Coast. Area*, pp. 1–7, 2015.
- E. Suardi, L. Liliwarti, M. Misriani, and I. Iqbal, "Perbaikan Tanah Lempung Lunak dengan Metode Preloading pada Jalan Tol Palembang-Indralaya Sta 1+670," *Fondasi J. Tek. Sipil*, vol. 10, no. 2, p. 191, 2021.
- I. A. Aini, E. I. Maulana, and H. T. Santoso, "Evaluasi Metode Perbaikan Tanah Lunak dengan Preloading Kombinasi PVD-PHD pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Semarang-Demak Paket II," *Bentang J. Teor. dan Terap. Bid. Rekayasa Sipil*, vol. 11, no. 1, pp. 21–36, 2023.
- I. N. Hamdhan and N. L. Rahmanisa, "Pemodelan Perbaikan Tanah Lempung Lunak Menggunakan Vacuum Preloading," *JMTS J. Mitra Tek. Sipil*, vol. 6, no. 3, pp. 775–786, 2023.

- M. M. Citra Kusuma A, Yelvi, Azmi Lisani W, Handi Sudardja, "6. Penerapan Soil Preloading, PVD, dan PHD untuk Analisis penurunan konsolidasi."
- M. Salem and R. El-Sherbiny, "Comparison of measured and calculated consolidation settlements of thick underconsolidated clay," *Alexandria Eng. J.*, vol. 53, no. 1, pp. 107–117, 2014.
- R. Ali, "Perbaikan Tanah Lempung Lunak Dengan Metode Prefabricated Vertical Drain (PVD)," *J. Poli-Teknologi*, vol. 19, no. 2, pp. 197–206, 2020.
- R. Purwondho and R. Djohan, "Research on the acceleration of settlement by installing vertical drain and preloading with sand," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 195, no. 1, 2018.
- S. Liu, J. Ju, G. Cai, and Z. Liu, "Stress History Estimation Method of Underconsolidated Soil by Partial Piezocone Dissipation Tests," *Mar. Georesources Geotechnol.*, vol. 32, no. 4, pp. 368–378, 2014.
- W. P. Kuswanda, "Perbaikan tanah lempung lunak metoda preloading pada pembangunan infrastruktur transportasi di Pulau Kalimantan," *Pros. Semin. Nas. Geotek.*, pp. 188–207, 2016.
- Y. Thendar, A. Lim, and R. A. Lyman, "Effectiveness of soil improvement for deep excavation in under-consolidated soil: A case study," *E3S Web Conf.*, vol. 429, 2023.
- Z. F. Lilabsari, A. Munawir, Y. Zaika, and W. P. Kuswanda, "Menggunakan Preloading Dan Prefabricated Vertical Drain (Pvd)," vol. 12, no. 2, pp. 1–6, 2018.