

856/FT.01/SKRIP/07/2009



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PARAMETER TANAH *DRAINED* DAN *UNDRAINED* DENGAN
METODE ELEMEN HINGGA FORMULASI *COUPLE*, PADA KASUS
TIMBUNAN BERTAHAP DAN DRAINASE VERTIKAL**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas
Indonesia

METHA HERPATI

0405010434

(Peserta TRIPARTIT UI ITB UGM Program *Credit Earning* di ITB)

**FAKULTAS TEKNIK SIPIL
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
KEKHUSUSAN GEOTEKNIK
UNIVERSITAS INDONESIA
JULI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Metha Herpati

NPM : 0405010434

Tanda Tangan :



Tanggal : 06 Juli 2009

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur Penulis panjatkan kehadiran Allah SWT karena berkat rahmat dan karunia-Nya Penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini. Laporan ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan tahap Sarjana di Departemen Teknik Sipil Universitas Indonesia.

Laporan Skripsi ini membahas mengenai perbandingan parameter *Drained* dan *Undrained* kasus timbunan bertahap yang menggunakan drainase vertikal dengan menggunakan program PLAXIS 7.2. Tujuannya adalah mempelajari, menganalisis, dan memperjelas perbedaan hasil penurunan yang dihasilkan dengan parameter yang berbeda untuk tanah yang sama pada kasus yang dipilih dan juga mempelajari kenaikan kuat geser dari tanah.

Tidak lupa Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah banyak memberikan bantuan dalam pembuatan Laporan Skripsi ini, yaitu:

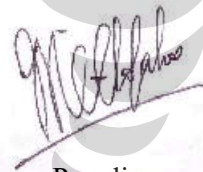
1. Bapak Ir. Widjojo Adi Prakoso, Ph.D., dan Bapak Endra Susila, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir atas waktu, pengertian, kritik, saran, dan seluruh bentuk bimbingan yang diberikan.
2. Bapak Dr. Ir. Ilyas Suratman, selaku dosen penguji atas waktu dan masukan yang diberikan.
3. Orang Tua Penulis, Mamam Juhaefah dan Keluarga Herpati yang telah banyak memberikan dukungan baik berupa doa, moril dan juga materiil.
4. Seluruh Staf Laboratorium Mekanika Tanah ITB, khususnya Suhermanto Siahaan, S.T., dan Dayu Apoji, ST, dan seluruh Staf Laboratorium Mekanika Tanah Sipil UI, atas masukan dan sarannya serta penyediaan data dan fasilitas untuk mengerjakan laporan tugas akhir ini.

5. Seluruh Staf Tata Usaha Program Studi Teknik Sipil UI dan ITB, untuk semua bantuan dan dukungan yang diberikan.
6. Teman-teman Mahasiswa Sipil UI dan Mahasiswa Sipil ITB, untuk seluruh bentuk bantuan dan dukungan baik moral maupun materiil yang telah diberikan.
7. Dan semua pihak yang sudah membantu dalam menyelesaikan Skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih memiliki banyak kekurangan baik dalam penyampaian maupun dalam kajian masalah. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari pembaca.

Akhir kata, semoga Laporan Skripsi ini dapat memberi manfaat bagi semua yang menggunakannya.

Depok, 06 Juli 2009



Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Metha Herpati
NPM : 0405010434
Program Studi : Teknik Sipil
Departemen : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik Sipil dan Lingkungan
Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

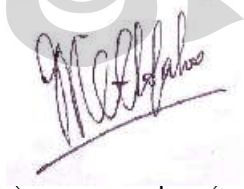
Studi Parameter Tanah Drained dan Undrained dengan Metode Elemen Hingga Formulasi Couple, Kasus Timbunan Bertahap dan Drainase Vertikal

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Institut Teknologi Bandung
Pada tanggal : 06 Juli 2009

Yang menyatakan



ABSTRAK

Nama : Metha Herpati (0405010434)
Program Studi : Teknik Sipil
Judul : Studi Parameter Tanah *Drained* dan *Undrained* dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga Formulasi *Couple*, Studi Kasus Timbunan Bertahap dan Drainase Vertikal

PLAXIS merupakan salah satu piranti lunak komputer untuk menyelesaikan permasalahan – permasalahan dalam bidang rekayasa geoteknik yang menggunakan formulasi metode elemen hingga. Dengan kemampuannya untuk menyelesaikan perhitungan yang kompleks, metode elemen hingga dapat digunakan untuk menganalisis perhitungan dan hubungan antara regangan, tegangan, dan tekanan air pori tanah. Hasil analisis regangan, tegangan, dan tekanan air pori tanah akan sangat mempengaruhi perhitungan nilai kekuatan geser dan kompresibilitas tanah.

Skripsi ini membahas mengenai perbandingan penurunan yang dihasilkan dengan menggunakan parameter yang berbeda yaitu *Drained* dan *Undrained* Analisis penurunan yang dilakukan adalah dengan menggunakan hitungan manual *One Dimensional Consolidation* Terzaghi dan juga PLAXIS 7.2. Kasus yang digunakan dalam analisis adalah kasus timbunan bertahap di atas tanah lunak, dan menggunakan drainase vertikal untuk mempercepat konsolidasi.

Kata Kunci : konsolidasi, *Drained*, *Undrained*, drainase vertikal.

ABSTRACT

Name : Metha Herpati (0405010434)
Department : Civil Engineering
Title : Comparison Study for Drained and Undrained Soil
Parameter Using Finite Element Method Of Couple
Formulation, Study Case in Stage Loading Embankment
and Vertical Drain.

PLAXIS is a finite element package that has been developed specifically for the analysis of deformation and stability in geotechnical engineering projects which use finite element formulation. By its capability, it enables quick generation of complex finite element models. Therefore, it is used to calculate and analyse the relationship between stress, strain, and pore water pressure in the soil. Subsequently, the result of the calculation will influence the calculation of bearing capacity and soil compressibility.

The purpose of this study is to understand and compare the settlement which is calculated in both parameter Drained and Undrained. Settlement Analysis are executed using *One Dimensional Consolidation Terzaghi* and PLAXIS 7.2. The sample project analysed is embankment with stage loading above very soft clay and vertical drain to fasten the consolidation time.

Keywords : consolidation, Drained, Undrained, Vertical Drain

DAFTAR ISI

| | |
|--|------------|
| Lembar Keaslian..... | i |
| Lembar Pengesahan..... | ii |
| ABSTRAK | iii |
| KATA PENGANTAR..... | iv |
| DAFTAR ISI | vii |
| DAFTAR TABEL | ix |
| DAFTAR GAMBAR | x |
| DAFTAR RUMUS..... | xi |
| DAFTAR LAMPIRAN | xii |
| | |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1-1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1-1 |
| 1.2 Ruang Lingkup Pembahasan | 1-3 |
| 1.3 Tujuan..... | 1-4 |
| 1.4 Metodologi | 1-4 |
| 1.5 Daerah Studi Kasus | 1-6 |
| 1.6 Software Pendukung | 1-6 |
| 1.7 Sistematika Pembahasan | 1-7 |
| | |
| BAB II DASAR TEORI..... | 2-1 |
| 2.1 Umum..... | 2-1 |
| 2.2 Tekanan Aktif..... | 2-5 |
| 2.3 Kuat Geser Tanah..... | 2-8 |
| 2.3.1 Keruntuhan Pada Lereng | 2-10 |
| 2.3.2 Konsep Angka Keamanan | 2-12 |
| 2.3.3 Kriteria Keruntuhan Mohr Coulomb | 2-15 |
| 2.3.4 Kenaikan Kekuatan Tanah..... | 2-18 |
| 2.3.5 Stabilitas <i>End of Construction</i> Timbunan di atas Tanah Lempung..... | 2-18 |
| 2.3.6 Analisis <i>Drained</i> dan <i>Undrained</i> | 2-22 |
| 2.4 Teori Penurunan | 2-23 |
| 2.4.1 Penurunan Elastik | 2-24 |
| 2.4.2 Konsolidasi Primer | 2-24 |
| 2.4.3 Konsolidasi Sekunder | 2-29 |
| 2.5 Penurunan Konsolidasi..... | 2-30 |
| 2.6 Timbunan Di Atas Tanah Lunak | 2-35 |
| 2.7 Drainase Vertikal..... | 2-35 |
| 2.7.1 Kapasitas Pengaliran..... | 2-36 |
| 2.7.2 Konsolidasi Dengan Drainase Vertikal..... | 2-37 |
| 2.7.3 Efek Smear dan Gangguan | 2-41 |

| | | |
|-----|------------------------------------|------|
| | 2.7.4 Pemilihan Tipe Drainase..... | 2-42 |
| | 2.7.5 Pemasangan | 2-44 |
| 2.8 | Metode Elemen Hingga..... | 2-47 |

BAB III PROGRAM APLIKASI METODE ELEMEN HINGGA 3-1

| | | |
|-----|--|------|
| 3.1 | Pendahuluan | 3-1 |
| 3.2 | Program PLAXIS Secara Umum | 3-2 |
| | 3.2.1 Beberapa Tampilan Dalam PLAXIS | 3-2 |
| 3.3 | Model Material..... | 3-6 |
| | 3.3.1 Analisis <i>Undrained</i> dengan Parameter Efektif | 3-6 |
| | 3.3.2 Analisis <i>Undrained</i> dengan Parameter Total..... | 3-12 |
| 3.4 | Teori Konsolidasi Pada PLAXIS | 3-13 |
| | 3.4.1 Persamaan Dasar Konsolidasi Pada PLAXIS | 3-13 |
| | 3.4.2 Konsolidasi Elastoplastis Pada PLAXIS | 3-14 |
| 3.5 | Model Mohr-Coloumb Pada PLAXIS..... | 3-15 |
| | 3.5.1 Perilaku Elastis Plastis-Sempurna Pada PLAXIS..... | 3-16 |
| | 3.5.2 Formulasi Model Mohr-Coulomb..... | 3-18 |
| | 3.5.3 Parameter Dasar Model Mohr-Coulomb | 3-20 |

BAB IV PERBANDINGAN PARAMETER *DRAINED* DAN *UNDRAINED* PADA PERMODELAN KASUS TIMBUNAN 4-1

| | | |
|-----|--|------|
| 4.1 | Pendahuluan | 4-1 |
| 4.2 | Data Proyek | 4-1 |
| | 4.2.1 Parameter Pile Dermaga | 4-1 |
| | 4.2.2 Penyelidikan dan Penentuan Parameter Lapisan Tanah | 4-8 |
| 4.3 | Analisis Timbunan | 4-13 |
| | 4.3.1 Tinggi Tahapan Timbunan..... | 4-13 |
| | 4.3.2 Permodelan Timbunan Dengan PLAXIS | 4-14 |
| | 4.3.3 Penurunan Konsolidasi | 4-18 |
| 4.4 | Perbaikan Tanah dengan Drainase Vertikal | 4-20 |
| | 4.4.1 Permodelan Drainase Vertikal dengan PLAXIS | 4-22 |
| | 4.4.2 Kenaikan Kuat Geser Tiap Tahap Timbunan | 4-24 |
| 4.5 | Hasil dan Analisis Penurunan | 4-27 |

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 5-1

| | | |
|-----|-----------------|-----|
| 5.1 | Kesimpulan..... | 5-1 |
| 5.2 | Saran..... | 5-3 |

| | | |
|--|---------------------|------|
| | DAFTAR PUSTAKA..... | xiii |
| | LAMPIRAN | xiv |

DAFTAR TABEL

| | | |
|------------|--|------|
| Tabel 2.1 | Definisi dan Istilah – istilah Dalam Tanah | 2-1 |
| Tabel 2.2 | Rekomendasi Angka Keamanan Minimum | 2-14 |
| Tabel 2.3 | Angka Keamanan Minimum Untuk Lereng Gempa | 2-15 |
| Tabel 2.4 | Rekomendasi Angka Keamanan Minimum Untuk Beberapa Institusi Internasional | 2-15 |
| Tabel 2.5 | Koefisien Permeabilitas | 2-31 |
| Tabel 2.6 | Tipe Drainase Vertikal | 2-37 |
| Tabel 2.7 | Ratio K_h/K_v | 2-39 |
| Tabel 2.8 | Spek Drainase Vertikal Pabrik | 2-43 |
| Tabel 4.1 | Parameter Tanah Pile Dermaga | 4-7 |
| Tabel 4.2 | Parameter Elastik Untuk Berbagai Jenis Tanah | 4-13 |
| Tabel 4.3 | Kedalaman Tanah | 4-14 |
| Tabel 4.4 | Parameter Tanah Undrained | 4-17 |
| Tabel 4.5 | Parameter Tanah Drained | 4-17 |
| Tabel 4.6 | Penurunan Konsolidasi One Dimensional Terzaghi | 4-18 |
| Tabel 4.7 | Vertical Degree of Consolidation | 4-19 |
| Tabel 4.8 | Hubungan Waktu Tunggu dengan Tahapan Timbunan dan Derajat Konsolidasi | 4-22 |
| Tabel 4.9 | Parameter Ekuivalen untuk Analisis Menggunakan Metode Elemen Hingga | 4-24 |
| Tabel 4.10 | Perbandingan Penurunan Total | 4-38 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|---|------|
| Gambar 1.1 | Diagram Alur Pengerjaan Skripsi | 1-5 |
| Gambar 1.2 | Lokasi Pembangunan Proyek Car Terminal Tanjung Priok | 1-6 |
| Gambar 2.1 | Profil Berat dan Volume Tanah | 2-3 |
| Gambar 2.2 | Profil Tanah | 2-6 |
| Gambar 2.3 | Tegangan Karakteristik Tanah Kohesif | 2-10 |
| Gambar 2.4 | Variasi Angka Keamanan | 2-13 |
| Gambar 2.5 | Lingkaran Mohr | 2-16 |
| Gambar 2.6 | Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb | 2-18 |
| Gambar 2.7 | Timbunan di Atas Tanah Lunak | 2-19 |
| Gambar 2.8 | Perubahan Faktor Keamanan pada Kurun Waktu Tertentu Akibat Adanya Embankment..... | 2-20 |
| Gambar 2.9 | Perubahan Kuat Geser pada Kurun Waktu Tertentu Akibat Adanya Embankment..... | 2-21 |
| Gambar 2.10 | Perubahan Tekanan pada Kurun Waktu Tertentu Akibat Adanya Embankment..... | 2-21 |
| Gambar 2.11 | Lapisan Lempung yang Mengalir ke Atas dan ke Bawah..... | 2-25 |
| Gambar 2.12 | Konsolidasi Tegangan pada Saat $t = 0$ | 2-26 |
| Gambar 2.13 | Konsolidasi Tegangan pada Saat $0 < t < 8$ | 2-26 |
| Gambar 2.14 | Konsolidasi Tegangan pada Saat $t = 8$ | 2-27 |
| Gambar 2.15 | Variasi e vs Log t , untuk Indeks Konsolidasi Sekunder | 2-29 |
| Gambar 2.16 | Grafik Time Factor One Dimensional Consolidation | 2-32 |
| Gambar 2.17 | Variasi Nilai U terhadap H | 2-33 |
| Gambar 2.18 | Drainase Vertikal di Bawah Timbunan | 2-36 |
| Gambar 2.19 | Jarak Pengaruh Drainase Vertikal pada Pola Segitiga | 2-38 |
| Gambar 2.20 | Pengaruh Panjang dan Jarak Drainase Vertikal Terhadap Waktu Konsolidasi..... | 2-40 |
| Gambar 2.21 | A Typical Cross Section of A Band Shaped Drain | 2-41 |
| Gambar 2.22 | Diameter Ekuivalen Drainase Vertikal | 2-42 |
| Gambar 2.23 | Pola Pemasangan Tipe Drainase Vertikal | 2-43 |
| Gambar 2.24 | Rig Drainase Vertikal | 2-44 |
| Gambar 2.25 | Urutan Pemasangan Drainase Vertikal | 2-45 |
| Gambar 3.1 | Ide Dasar dari Suatu Model Elastis Plastis-Sempurna..... | 3-17 |
| Gambar 3.2 | Bidang Leleh Mohr-Coulomb dalam Ruang Tegangan Utama ($c = 0$) | 3-19 |

| | | |
|-------------|--|------|
| Gambar 3.3 | Definisi E_0 dan E_{50} untuk Hasil Uji Triaksial Drained Standar | 3-22 |
| Gambar 3.4 | Lingkaran – Lingkaran Tegangan Saat Mengalami Leleh; Satu Lingkaran Menyentuh Garis Keruntuhan Coulomb | 3-24 |
| Gambar 4.1 | Topografi dan Bathimetri Dermaga | 4-2 |
| Gambar 4.2 | Denah Balok dan Pile Cap Dermaga | 4-3 |
| Gambar 4.3 | Potongan Melintang Dermaga dan Detail Secant Pile | 4-4 |
| Gambar 4.4 | Kondisi Eksisting Dermaga dan Pembuatan Lantai Dasar Hingga +2m | 4-5 |
| Gambar 4.5 | Dredging dan Penimbunan Hingga Elevasi Terakhir (+4.4 m) | 4-6 |
| Gambar 4.6 | Lokasi Penyelidikan Tanah | 4-9 |
| Gambar 4.7 | Detail Lokasi Titik Bor dan Sondir | 4-10 |
| Gambar 4.8 | Profil Lapisan Tanah | 4-11 |
| Gambar 4.9 | Model Geometri Tanah Timbunan | 4-14 |
| Gambar 4.10 | Grafik Korelasi antara Phi dan Plasticity Index | 4-15 |
| Gambar 4.11 | Kurva Korelasi Modulus Young (Jamiołkowski) | 4-16 |
| Gambar 4.12 | Grafik Penurunan Konsolidasi vs Waktu | 4-20 |
| Gambar 4.13 | Hubungan Antara Derajat Konsolidasi dan Waktu untuk Berbagai Jarak Drainase Vertikal dengan Konfigurasi Segitiga | 4-21 |
| Gambar 4.14 | Perbandingan Time Rate Hasil Analisis Ekuivalensi Parameter Eksisting Tanah Akibat Beban Timbunan Setinggi 5.4 meter Menggunakan Teori Konsolidasi Terzaghi dengan Teori Elemen Hingga | 4-24 |
| Gambar 4.15 | Tinggi Tahapan Timbunan vs Waktu Tunggu | 4-27 |
| Gambar 4.16 | Permodelan Timbunan dan Drainase Vertikal | 4-27 |
| Gambar 4.17 | Calculation pada PLAXIS | 4-28 |
| Gambar 4.18 | Grafik Penurunan vs Waktu Parameter Undrained (Gain Strength) | 4-29 |
| Gambar 4.19 | Penurunan Total (1.13 m) dengan Parameter Undrained (Gain Strength) | 4-30 |
| Gambar 4.20 | Grafik Penurunan vs Waktu Parameter Undrained (Tanpa Gain Strength) | 4-31 |
| Gambar 4.21 | Penurunan Total (1.35 m) dengan Parameter Undrained (Tanpa Gain Strength) | 4-32 |
| Gambar 4.22 | Grafik Penurunan vs Waktu Parameter Drained (Material Type Undrained) | 4-33 |
| Gambar 4.23 | Penurunan Total (1.17 m) dengan Parameter Parameter Drained (Material Type Undrained) | 4-34 |
| Gambar 4.24 | Grafik Penurunan vs Waktu Parameter Drained (Material Type Drained) | 4-35 |
| Gambar 4.25 | Penurunan Total (1.25 m) dengan Parameter Parameter Drained (Material Type Drained) | 4-36 |
| Gambar 4.26 | Grafik Perbandingan Penurunan Setiap Parameter | 4-37 |

DAFTAR RUMUS

| | | |
|------------|---|------|
| Rumus 2.1 | Kadar Air | 2-3 |
| Rumus 2.2 | Berat Volume | 2-3 |
| Rumus 2.3 | Angka Pori..... | 2-3 |
| Rumus 2.4 | Porositas | 2-3 |
| Rumus 2.5 | Berat Jenis | 2-3 |
| Rumus 2.6 | Derajat Kejenuhan | 2-3 |
| Rumus 2.7 | Tegangan Total Tanah pada Suatu Titik | 2-6 |
| Rumus 2.8 | Tegangan Air Pori | 2-7 |
| Rumus 2.9 | Tegangan Efektif Tanah | 2-7 |
| Rumus 2.10 | Kenaikan Kekuatan Tanah | 2-10 |
| Rumus 2.11 | Tegangan Total/Safety Factor | 2-13 |
| Rumus 2.12 | Tegangan Efektif/Safety Factor | 2-13 |
| Rumus 2.13 | Kekuatan Geser | 2-17 |
| Rumus 2.14 | Kekuatan Geser dengan dasar Tegangan Efektif..... | 2-17 |
| Rumus 2.15 | Tekanan Air Pori Timbunan Awal | 2-19 |
| Rumus 2.16 | Penambahan Tegangan Total | 2-19 |
| Rumus 2.17 | Penambahan Tegangan Efektif Akibat Disipasi Air Pori | 2-20 |
| Rumus 2.18 | Penurunan Elastik | 2-24 |
| Rumus 2.19 | Penambahan Tegangan Total | 2-24 |
| Rumus 2.20 | Konsolidasi Sekunder | 2-29 |
| Rumus 2.21 | Indeks Pemampatan Sekunder..... | 2-29 |
| Rumus 2.22 | Indeks Pemampatan Sekunder..... | 2-29 |
| Rumus 2.23 | Koefisien Perubahan Volume | 2-30 |
| Rumus 2.24 | Koefisien Konsolidasi Vertikal | 2-31 |
| Rumus 2.25 | Angka Pori pada Tanah <i>Normal Consolidated</i> | 2-34 |
| Rumus 2.26 | Penurunan pada Tanah <i>Normal Consolidated</i> | 2-34 |
| Rumus 2.27 | Angka Pori pada Tanah <i>Over Consolidated</i> ($p_o + \Delta P \leq P_c$)..... | 2-34 |
| Rumus 2.28 | Penurunan pada Tanah <i>Over Consolidated</i> ($p_o + \Delta P \leq P_c$)..... | 2-34 |
| Rumus 2.29 | Penurunan pada Tanah <i>Over Consolidated</i> ($p_o + \Delta P > P_c$)..... | 2-34 |
| Rumus 2.30 | Tegangan Air Pori per Satuan Waktu..... | 2-40 |
| Rumus 2.31 | Derajat Konsolidasi Horisontal | 2-40 |
| Rumus 2.32 | Faktor Waktu Horisontal | 2-41 |
| Rumus 2.33 | <i>Smear Effect</i> | 2-41 |
| Rumus 2.34 | Diameter Ekuivalensi Drainase (Hansbo) | 2-41 |
| Rumus 2.35 | Diameter Daerah <i>Smear</i> | 2-42 |
| Rumus 3.1 | Tegangan Geser Efektif Arah xx | 3-6 |
| Rumus 3.2 | Tegangan Geser Efektif Arah yy | 3-6 |
| Rumus 3.3 | Tegangan Geser Efektif Arah zz | 3-6 |
| Rumus 3.4 | Tegangan Geser Efektif Arah xy | 3-6 |

| | | |
|------------|--|------|
| Rumus 3.5 | Tegangan Geser Efektif Arah yz | 3-6 |
| Rumus 3.6 | Tegangan Geser Efektif Arah zx | 3-6 |
| Rumus 3.7 | Tekanan Air Pori Ekses | 3-6 |
| Rumus 3.8 | Invers Hukum Hooke | 3-7 |
| Rumus 3.9 | Perubahan Tekanan Air Pori | 3-7 |
| Rumus 3.10 | Modulus Young Parameter Undrained | 3-8 |
| Rumus 3.11 | Poisson Ratio | 3-8 |
| Rumus 3.12 | Nilai Modulus Bulk | 3-8 |
| Rumus 3.13 | Tegangan Total Nilai B-Skempton..... | 3-9 |
| Rumus 3.14 | Tegangan Efektif Nilai B-Skempton | 3-9 |
| Rumus 3.15 | Tekanan Air Pori Ekses | 3-9 |
| Rumus 3.16 | Hukum Elastisitas Hooke | 3-9 |
| Rumus 3.17 | Modulus Geser | 3-10 |
| Rumus 3.18 | Poisson Ratio Undrained | 3-10 |
| Rumus 3.19 | Kekakuan Bulk dan Air Pori | 3-10 |
| Rumus 3.20 | Kekakuan Bulk dan Air Pori Jika Nilai B-Skempton tidak Diketahui | 3-10 |
| Rumus 3.21 | Nilai B-Skempton | 3-11 |
| Rumus 3.22 | Regangan Volumetrik..... | 3-11 |
| Rumus 3.23 | Konversi Modulus Young Undrained ke Drained..... | 3-11 |
| Rumus 3.24 | Solusi Laminer | 3-13 |
| Rumus 3.25 | Peningkatan Regangan | 3-14 |
| Rumus 3.26 | Vektor Gaya Residual | 3-14 |
| Rumus 3.27 | Peningkatan Perpindahan Total | 3-14 |
| Rumus 3.28 | Perubahan Regangan Elastis | 3-16 |
| Rumus 3.29 | Perubahan Regangan Plastis | 3-16 |
| Rumus 3.30 | Hubungan antara perubahan tegangan efektif dan perubahan regangan untuk model elastis-plastis | 3-17 |
| Rumus 3.31 | Fungsi Potensi Plastis | 3-18 |
| Rumus 3.32 | Fungsi Leleh Dalam Konteks Tegangan Utama..... | 3-18 |
| Rumus 3.33 | Fungsi Potensi Plastis untuk Model Mohr Coulomb..... | 3-19 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | | |
|-------------|---|----|
| Lampiran 1 | Data Penyelidikan Tanah..... | 1 |
| Lampiran 2 | Data Uji Laboratorium | 17 |
| Lampiran 3 | Perhitungan Penurunan One Dimensional Consolidation Terzaghi | 19 |
| Lampiran 4 | Perhitungan Time Rate Consolidation Terzaghi | 20 |
| Lampiran 5 | Drainase Vertikal..... | 21 |
| Lampiran 6 | Parameter Ekuivalensi Drainase Vertikal..... | 29 |
| Lampiran 7 | Grafik Time Rate Consolidation PVD Manual dengan PLAXIS | 31 |
| Lampiran 8 | Kurva Hasil Penurunan Pada PLAXIS..... | 32 |
| Lampiran 9 | Permodelan Geometri Timbunan | 33 |
| Lampiran 10 | Perhitungan Penurunan PLAXIS Parameter Undrained (Gain Strength) | 34 |
| Lampiran 11 | Kurva Time vs Displacement Parameter Undrained (GainStrength) | 35 |
| Lampiran 12 | Perhitungan Penurunan PLAXIS Parameter Undrained (tanpa Gain Strength) | 36 |
| Lampiran 13 | Kurva Time vs Displacement Parameter Undrained (Tanpa Gain Strength) | 37 |
| Lampiran 14 | Perhitungan Penurunan PLAXIS Parameter Drained (Material Type Undrained)..... | 38 |
| Lampiran 15 | Kurva Time vs Displacement Parameter Drained (Material Type Undrained)..... | 39 |
| Lampiran 16 | Perhitungan Penurunan PLAXIS Parameter Drained (Material Type Drained) Penambahan Tegangan Total | 40 |
| Lampiran 17 | Kurva Time vs Displacement Parameter Drained (Material Type Drained) Penambahan Tegangan Efektif Akibat Disipasi Air Pori | 41 |
| Lampiran 18 | Data Perhitungan Penurunan PLAXIS Parameter Undrained (Gain Strength) | 42 |
| Lampiran 19 | Data Perhitungan Penurunan PLAXIS Parameter Undrained (Tanpa Gain Strength) | 43 |
| Lampiran 20 | Data Perhitungan Penurunan PLAXIS Parameter Drained (Material Type Undrained)..... | 44 |
| Lampiran 21 | Data Perhitungan Penurunan PLAXIS Parameter Drained (Material Type Drained)..... | 45 |

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

PLAXIS merupakan salah satu piranti lunak komputer untuk menyelesaikan permasalahan – permasalahan dalam bidang rekayasa geoteknik yang menggunakan formulasi metode elemen hingga. Dengan kemampuannya untuk menyelesaikan perhitungan yang kompleks, metode elemen hingga dapat digunakan untuk menganalisis perhitungan dan hubungan antara regangan, tegangan, dan tekanan air pori tanah. Hasil analisis regangan, tegangan, dan tekanan air pori tanah akan sangat mempengaruhi perhitungan nilai kekuatan geser dan kompresibilitas tanah. Oleh sebab itu, analisis ini merupakan salah satu kajian mekanika tanah yang banyak diaplikasikan pada berbagai konstruksi geoteknik seperti contohnya pada proyek Car Terminal di Jakarta Utara yang berada di atas lapisan tanah lunak. Dengan memasukkan kondisi parameter *drained* dan *undrained* akan dapat dibandingkan perhitungan dan hubungan antara regangan, tegangan, dan tekanan air pori tanah untuk masing – masing kondisi parameter.

Dalam analisis regangan, tegangan dan tekanan air pori pada tanah, perhitungan yang dilakukan secara simultan (*couple*) menjadi penting karena akan menghasilkan nilai yang lebih akurat. Tanah merupakan suatu sistem multifase yang terdiri dari butiran partikel tanah padat yang terdistribusi acak dan memiliki pori – pori di antara butiran – butiran tersebut. Pori – pori tanah ini saling berhubungan satu dengan yang lainnya dan dapat berisi udara atau air atau keduanya. Besarnya tegangan pada tanah akibat suatu beban dipikul oleh butiran tanah (tegangan efektif) dan air pori tanah (tekanan air pori). Hal ini menyebabkan besarnya tegangan tanah dan tekanan air pori saling berkaitan erat, sehingga perhitungan tegangan tanah dan tekanan air pori tanah harus

dilakukan secara simultan (*couple*). Pori – pori di antara butiran partikel tanah memegang peranan yang sangat penting terhadap besarnya regangan, tegangan, dan tekanan air pori pada tanah.

Formulasi metode elemen hingga adalah persamaan simultan aljabar. Berbeda dengan penyelesaian seluruh sistem pada solusi persamaan diferensial, metode elemen hingga menjabarkan persamaan lokal untuk setiap elemen hingga yang kemudian dirakit dalam sistem struktur guna memperoleh solusi global sistem struktur tersebut. Cara numerik ini memberikan nilai pendekatan dari parameter yang tidak diketahui di sejumlah titik – titik nodal di sistem diskrit struktur.

Lapisan tanah lunak pada konstruksi khususnya geoteknik, sering mendatangkan masalah, misalnya pada proses pelaksanaan konstruksi timbunan yang dibawahnya terdapat lapisan tanah lunak. Dalam hal ini harus diperhatikan elevasi ketinggian dari timbunan tersebut. Apabila pembangunan timbunan direncanakan untuk mencapai ketinggian yang relatif tinggi dari elevasi permukaan lapisan tanah lunak, maka konstruksi harus dilakukan secara bertahap agar tidak terjadi kegagalan konstruksi timbunan.

Pelabuhan merupakan gerbang aktivitas perekonomian. Terlebih lagi dalam era globalisasi perdagangan dunia, Pelabuhan memegang peranan yang sangat penting dan menjadi awal dari aktivitas ekonomi terutama di kota – kota besar seperti Jakarta. Untuk itu, perlu dibangun sebuah pelabuhan yang memadai untuk menunjang kemajuan di bidang perdagangan dan industri. PT. (Persero) Pelabuhan Indonesia II menjawab tantangan ini dengan membangun Pelabuhan Car Terminal Tanjung Priok, sebuah pelabuhan yang dilengkapi dengan fasilitas dermaga lengkap, seperti bangunan kantor, lahan parkir yang luas, serta bangunan untuk pencucian mobil otomatis (*automatic car wash*).

Pembangunan Pelabuhan Car Terminal Tanjung Priok di atas tanah lunak akan menghadapi permasalahan geoteknik khususnya akibat timbunan yang tentunya sangat berpengaruh terhadap regangan, tegangan, dan tekanan air pori pada tanah. Pada dasarnya setiap penambahan timbunan akan menyebabkan kenaikan

Universitas Indonesia

tegangan air pori pada tanah lunak yang secara perlahan-lahan akan terdisipasi diikuti dengan meningkatnya tegangan efektif. Dengan meningkatnya tegangan efektif maka daya dukung tanah lunak tersebut juga akan meningkat. Oleh karena itu pada pekerjaan penimbunan bertahap, kecepatan pekerjaan penimbunan ditentukan oleh kecepatan meningkatnya daya dukung tanah lunak akibat pekerjaan penimbunan pada tanah lunak pada tahap sebelumnya.

Informasi yang cukup harus diperoleh untuk membuat suatu desain yang aman dan ekonomis, serta untuk menghindari kesulitan – kesulitan pada saat konstruksi, karenanya dibutuhkan penyelidikan tanah serta analisis geoteknik terhadap perencanaan - perencanaan timbunan yang rinci, khususnya untuk menghindari terjadinya hambatan dan kesulitan lapangan yang timbul akibat variasi kondisi lapangan, utamanya kondisi dan karakteristik tanah dan lingkungannya.

1.2 RUANG LINGKUP PEMBAHASAN

Ruang lingkup pembahasan Skripsi ini, meliputi :

- Studi kenaikan kekuatan tanah (*gain strength*).
- Studi stabilitas timbunan pada tanah lunak.
- Studi penurunan (*consolidation settlement*) akibat timbunan.
- Pemilihan parameter *Drained* dan *Undrained* untuk analisis dan desain.
- Penggunaan drainase vertikal untuk mempercepat proses konsolidasi tanah lunak yang ditimbun.
- Perhitungan konsolidasi tanpa menggunakan drainase vertikal .
- Perhitungan dilakukan dengan bantuan *software, PLAXIS*.

1.3 TUJUAN

Skripsi ini bertujuan untuk :

- Studi Pemilihan Parameter *Drained* dan *Undrained*
- Studi stabilitas tanah untuk tanah timbunan
- Studi kenaikan kuat geser tanah akibat disipasi tekanan air pori
- Studi penurunan pada tanah akibat dari adanya konstruksi timbunan yang dilakukan dengan One Dimensional Terzaghi
- Studi penurunan dengan Drainase Vertikal dengan menggunakan metode elemen hingga dengan menggunakan bantuan *software computer* PLAXIS.

1.4 METODOLOGI

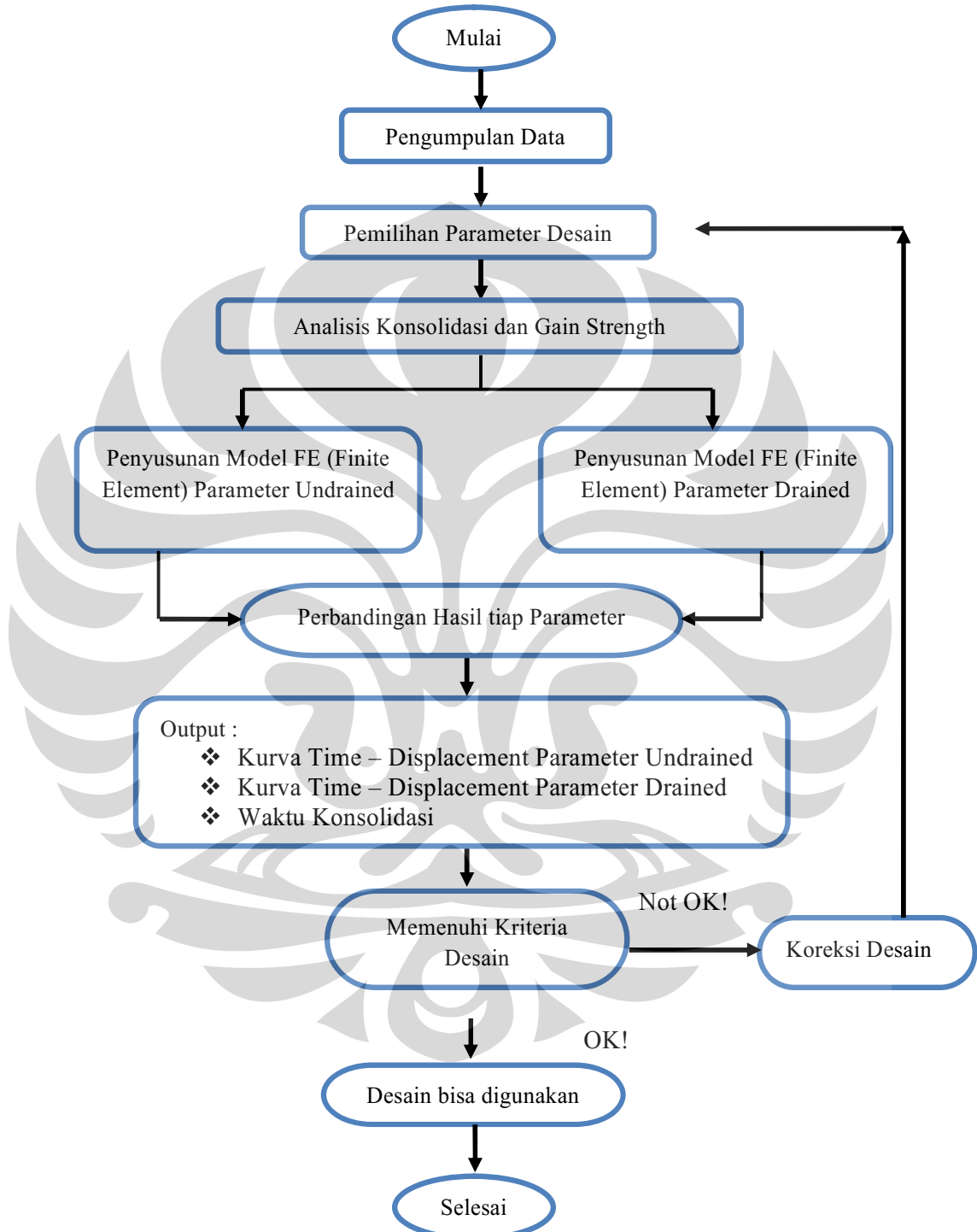
Metodologi laporan ini berisi mengenai analisis timbunan di Pelabuhan Car Terminal Tanjung Priok dengan hitungan manual (mekanika tanah) dan metode elemen hingga, PLAXIS *Version 7.2* dan memasukkan input parameter tanah *Drained* dan *Undrained* .

Berikut ini dijelaskan secara umum alur pelaksanaan timbunan :

Pada perencanaan kita telah mendapatkan tinggi kritis timbunan yang diizinkan. Karena timbunan yang kita berada di atas tanah lunak, yang tidak mampu menahan beban timbunan yang melampaui tinggi kritis maka diperlukan perlakuan khusus pada proses penimbunan yakni penimbunan bertahap. Setiap tahapan timbunan berikutnya harus menunggu terkonsolidasi hingga kuat geser meningkat yang tentunya dapat menahan beban timbunan selanjutnya.

Untuk mencapai hal tersebut diperlukan waktu konsolidasi yang cukup lama. Tentunya waktu yang lama akan memperlambat proses konstruksi sehingga dilakukan alternatif untuk mempercepat konsolidasi yaitu dengan drainase vertikal di dalam tanah dasar timbunan.

Gambar 1.1 menjelaskan secara sederhana dan ringkas studi Skripsi ini, yang disajikan dalam bentuk diagram alur.



Gambar 1.1 Diagram Alur Pengerjaan Skripsi

1.5 DAERAH STUDI KASUS

Skripsi ini mengambil studi kasus pada Proyek Perencanaan Pelabuhan Car Terminal di Tanjung Priok, Jakarta Utara. Gambar 1.2 menunjukkan lokasi rencana pembangunan Pelabuhan Car Terminal Tanjung Priok yang dipilih untuk studi kasus Skripsi ini.



Gambar 1.2 Lokasi Proyek Pembangunan Pelabuhan Car Terminal Tanjung Priok

1.6 SOFTWARE PENDUKUNG

Pada Skripsi ini menggunakan *software professional, PLAXIS Version.7.2*

1.7 SISTEMATIKA PEMBAHASAN

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini berisi mengenai latar belakang, tujuan, metodologi, ruang lingkup pembahasan, dan sistematika pembahasan penulisan Skripsi ini.

BAB II DASAR TEORI

Bab ini menjabarkan tentang konsep atau teori yang mendukung studi yang dipergunakan dalam pengerjaan laporan Skripsi ini, meliputi konsep mekanika tanah, khususnya mengenai stabilitas timbunan, tekanan efektif tanah, kuat geser tanah, konsolidasi, dan konsep dasar metode elemen hingga.

BAB III PROGRAM APLIKASI METODE ELEMEN HINGGA

Bab ini menjelaskan mengenai teori dasar dan formulasi yang digunakan dalam metode elemen hingga, khususnya pada program PLAXIS *version 7.2*, meliputi permodelan yang tersedia serta bagaimana pendekatan analisis yang dilakukan.

BAB IV PERBANDINGAN PARAMETER DRAINED DAN UNDRAINED PADA KASUS TIMBUNAN

Bab ini berisi permodelan sebuah kasus timbunan pada Proyek Pelabuhan Car Terminal Tanjung Priok dengan input parameter *drained* dan *undrained* menggunakan metode elemen hingga, PLAXIS *version 7.2*.

Hasil yang diperoleh berupa kurva yang menunjukkan hubungan antara penurunan tanah – waktu dan tekanan air pori – waktu baik pada kondisi *Drained*

Universitas Indonesia

dan *Undrained*. Analisis perbandingan kurva akan menghasilkan kesimpulan akhir.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini menguraikan sekilas tentang permasalahan yang timbul akibat dari timbunan pada proyek pembangunan Pelabuhan Car Terminal Tanjung Priok di atas tanah lunak. Masalah yang muncul adalah penurunan timbunan yang terjadi selama proses tahapan timbunan. Untuk itu perlu dilakukan analisis stabilitas dan penurunan timbunan dan dilakukan permodelan dengan menggunakan software dan dengan input parameter *Drained* dan *Undrained* sehingga dapat diketahui kondisi dan respon yang dihasilkan oleh tanah.

Selain itu juga akan diberikan saran penulis baik mengenai berbagai hal yang dilakukan pada Skripsi ini maupun studi lebih lanjut yang dapat dilakukan.

BAB 2 DASAR TEORI

2.1 UMUM

Perilaku mekanis dari tanah pada dasarnya dapat dimodelkan menggunakan piranti lunak seperti PLAXIS dengan memasukkan berbagai parameter tanah yang diperlukan dan sesuai dengan jenis tanahnya itu sendiri. Berbagai jenis kondisi tanah seperti *Drained* dan *Undrained* pun dapat dikondisikan untuk mengetahui tegangan dan regangan yang sangat berpengaruh terhadap deformasi atau penurunan akibat pembebanan pada tanah dengan menggunakan model formulasi *couple* dua dimensi.

Parameter – parameter yang mempengaruhi tersebut adalah nilai kohesi, sudut geser, tegangan geser dan tegangan normal yang terjadi. Tanah pasir dan lanau anorganik nilai c adalah sama dengan nol. Untuk tanah lempung yang terkonsolidasi normal, harga c juga dapat dianggap sama dengan nol. Sedangkan pada tanah lempung terkonsolidasi-lebih mempunyai harga $c > 0$.

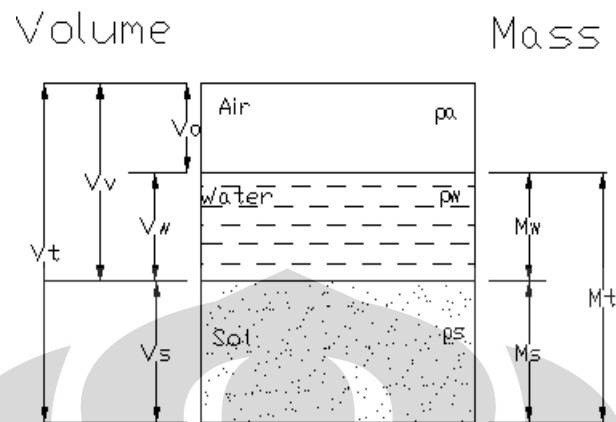
Definisi serta istilah-istilah yang dipakai untuk menyatakan sifat umum tanah adalah sebagai berikut :

Tabel 2.1 Definisi dan Istilah – Istilah Dalam Tanah

| Sifat | Istilah Inggris | Simbol | Definisi |
|--------------------|---------------------------------|------------|---|
| Berat volume tanah | <i>Unit weight density</i> | γ | Perbandingan antara berat tanah seluruhnya dengan volume tanah seluruhnya |
| Berat isi butir | <i>Unit weight of particles</i> | γ_s | Perbandingan antara berat butir dengan volume butir |

| | | | |
|-------------------|---|------------|---|
| Berat isi kering | <i>Dry density</i> | γ_d | Perbandingan antara berat partikel padat tanah dengan volume tanah seluruhnya |
| Berat isi air | <i>Unit weight of water</i> | γ_w | Perbandingan antara berat air dengan volume air |
| Kadar air | <i>Water content / moisture content</i> | w | Perbandingan antara berat air dengan berat partikel padat tanah |
| Angka pori | <i>Void ratio</i> | e | Perbandingan antara volume pori dengan volume partikel padat tanah |
| Porositas | <i>Porosity</i> | n | Perbandingan antara volume pori dengan volume tanah seluruhnya |
| Berat jenis | <i>Specific gravity</i> | G | |
| Derajat kejenuhan | <i>Degree of saturation</i> | Sr | Perbandingan antara volume air pori dengan volume pori |

Untuk mendapat hubungan antara berat isi, kadar air, angka pori, dan sebagainya, kita dapat meninjau sejumlah tanah yang mengandung satuan isi butirnya. Tanah tersebut terdiri dari tiga bagian yaitu butir, air, dan udara, sebagaimana di gambar berikut :



Gambar 2.1 Profil Berat dan Volume Tanah (Bowles,1984)

Berat serta volum dari ketiga bagian ini dapat dihitung dengan memakai definisi-definisi di atas. Hasilnya, masing-masing untuk berat volum, adalah seperti terlihat pada bagian kiri dan kanan dari gambar di atas.

Dengan memakai definisi-definisi yang tadi kita dapat langsung menulis persamaan-persamaan berikut :

$$1. \text{ Kadar air (Water content / moisture content)} : w = \frac{W_w}{W_s} \quad (2.1)$$

$$2. \text{ Berat volume (Unit weight)} : \gamma = \frac{W}{V} \quad (2.2)$$

$$3. \text{ Angka pori (Void ratio)} : e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.3)$$

$$4. \text{ Porositas (Porosity)} : n = \frac{V_v}{V} = \frac{e}{1+e} \quad (2.4)$$

$$5. \text{ Berat jenis (Specific gravity)} : G = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad (2.5)$$

$$6. \text{ Derajat kejenuhan (Degree of saturation)} : Sr = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.6)$$

Dengan percobaan-percobaan di laboratorium kita dapat menentukan berat volum tanah, kadar air, dan berat jenis butirnya. Dengan memakai persamaan-persamaan

di atas kita dapat menghitung angka pori, berat volum kering, dan derajat kejenuhan.

Parameter – parameter yang dibutuhkan untuk input PLAXIS dapat diperoleh dari tahanan geser dan *interlocking* diantara partikel – partikelnya yang tergantung pada gaya – gaya tekan (*confining pressure*) yang bekerja pada partikel tersebut untuk mendapatkan kuat geser pada tanah berbutir kasar. Jenis tanah ini memiliki koefisien permeabilitas yang besar sehingga air dapat mengalir melalui pori – porinya dengan sangat cepat. Selain itu, plastisitas merupakan karakteristik yang penting untuk melukiskan kemampuan tanah untuk berdeformasi pada volume tetap tanpa terjadi retakan atau remahan. Bila suatu beban diberikan pada sampel tanah lempung, diperlukan waktu yang cukup panjang agar tanah tersebut terkonsolidasi sepenuhnya, yaitu selama waktu yang diperlukan untuk mendisipasi tegangan air pori yang terjadi. Dengan demikian akan terjadi *settlement* (jangka pendek). Akan tetapi, setelah terjadi konsolidasi, dimana tekanan air pori berlebih keluar, maka penurunan yang terjadi sangat kecil.

Penambahan beban di atas permukaan tanah dapat menyebabkan lapisan tanah dibawahnya mengalami pemampatan. Pemampatan tersebut disebabkan adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori. Pada pelaksanaan suatu konstruksi timbunan, lapisan tanah lempung lunak biasanya akan mengalami konsolidasi sehingga terjadi penurunan (*consolidation settlement*).

Hal – hal yang mempengaruhi konsolidasi adalah :

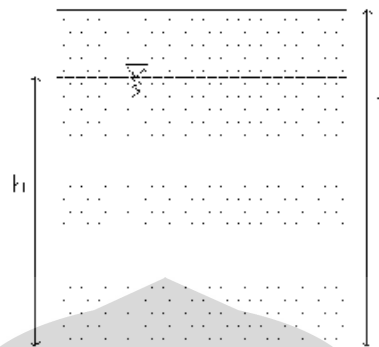
- Koefisien permeabilitas (k)
- Beban (q)
- Waktu (t)
- Tebal lapisan lempung jenuh (H)
- Koefisien konsolidasi (C_v)

Dalam pelaksanaan konstruksi timbunan harus diperhatikan elevasi dari timbunan tersebut. Bila konstruksi direncanakan untuk mencapai elevasi tertentu maka konstruksi dilakukan bertahap agar tidak terjadi kegagalan konstruksi berupa amblasnya timbunan. Pada setiap penambahan timbunan akan terjadi kenaikan tegangan air pori pada tanah lunak yang secara perlahan – lahan akan berkurang diikuti dengan meningkatnya tegangan efektif. Dengan meningkatnya tegangan efektif, maka daya dukung tanah lunak tersebut juga akan bertambah. Oleh karena itu, pada pekerjaan penimbunan bertahap, kecepatan pekerjaan penimbunan ditentukan oleh kecepatan meningkatnya daya dukung tanah lunak akibat pekerjaan penimbunan pada tanah lunak pada tahap sebelumnya.

Selain konsolidasi, hal lain yang perlu diperhatikan juga adalah stabilitas dari lereng timbunan. Stabilitas lereng timbunan perlu diperhatikan agar timbunan tidak kehilangan kehandalannya sebagai suatu struktur. Dalam analisis lereng, ada kemungkinan terjadinya kelongsoran yang mengakibatkan kegagalan konstruksi. Kita harus melakukan analisa terhadap lereng tersebut untuk mengetahui dan mempelajari apakah akan mengakibatkan longsor atau tidak. Disinilah pentingnya dilakukan penghitungan faktor keamanan dari lereng tersebut. Faktor yang perlu dilakukan untuk memeriksa fenomena tersebut adalah menghitung dan membandingkan tegangan geser yang terbentuk sepanjang permukaan retak yang paling mungkin dengan kekuatan geser dari tanah yang bersangkutan, dan proses inilah yang disebut *slope stability analysis*.

2.2 TEKANAN AKTIF

Untuk keperluan mekanika tanah, kita dapat menganggap tanah sebagai suatu kerangka/sistem yang terdiri dari butir-butir tanah, dengan ruangan-ruangan (pori) antara butir-butir ini, yang berisi air dan udara. Apabila tanah ini dalam keadaan jenuh maka pori ini terisi seluruhnya oleh air. Berikut ini akan dibahas mengenai tanah dalam keadaan jenuh.



Gambar 2.2 Profil Tanah

Tegangan tanah merupakan besarnya gaya yang dialami oleh tanah pada suatu titik yang ditinjau. Jadi, tegangan yang bekerja pada suatu titik tanah dapat dihitung dengan menghitung besar beban yang bekerja diatas titik tersebut.

Permukaan air tanah disini terlatak pada kedalaman h, dan berat isi tanah yang terletak di atas muka air = γ_1 , sedangkan berat isi tanah dibawah muka air = γ_2 . Kita dapat langsung menghitung tegangan pada titik yang ditinjau pada kedalaman h ini :

$$s = \gamma_1 (H - h) + \gamma_2 h \quad (2.7)$$

dimana σ = tegangan total tanah pada suatu titik

γ = berat volume tanah di atas titik yang ditinjau

H = tinggi tanah di atas titik yang ditinjau

h = tinggi muka air tanah di atas titik yang ditinjau
muka tanah

Nilai tegangan yang didapatkan pada penghitungan di atas adalah nilai tegangan total tanah. Tegangan total adalah besarnya tegangan dari seluruh komponen tegangan yang dialami pada suatu titik tanah yang ditinjau. Jadi, tegangan total ini adalah tegangan akibat berat tanah (termasuk air porinya) diatas tempat yang bersangkutan.

Selain tegangan total ini, besarnya tegangan air di dalam pori ini bisa kita hitung. Tegangan ini disebut tegangan air pori (*pore water pressure*) / semu pori di dalam tanah berhubungan satu dengan yang lainnya, sehingga tegangan air pori adalah sama dengan tegangan hidrostatik.

$$u = \gamma_w \times h \quad (2.8)$$

dimana : u = tegangan air pori

γ_w = berat volume air

h = tinggi muka air tanah dari permukaan tanah

Tegangan air pori yang bekerja diruangan-ruangan antara butir-butir tanah akan mengurangi tegangan yang sebenarnya bekerja pada butir-butir tanah. Tegangan yang bekerja pada butir-butir tanah adalah selisih antara tegangan total dengan tegangan air pori.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.9)$$

dimana : σ' = tegangan efektif tanah

σ = tegangan total tanah

u = tegangan air pori tanah

Tegangan σ' disebut tegangan efektif, karena memang hanya tegangan ini lah yang memiliki pengaruh terhadap kerangka butir tanah.

Persamaan $\sigma' = \sigma - u$ sepatutnya dianggap sebagai persamaan terpenting dalam bidang mekanika tanah. Sebagian besar soal-soal dalam bidang ini menyangkut dua hal utama, yaitu :

1. kekuatan geser tanah,
2. *compressibility* tanah, yaitu kemampuan perubahan volume tanah yang terjadi akibat perubahan tekanan yang bekerja pada tanah.

Kekuatan geser tanah tergantung terutama kepada tekanan antara butir-butir tanah, yaitu kepada tegangan efektif. Demikian juga dengan volume tanah tergantung

pada kerangka pada kerangka butir tanah sendiri. Tidak terjadi perubahan pada isi tanah terkecuali ada perubahan pada tegangan efektifnya.

Jadi kekuatan geser maupun *compressibility* tanah tergantung kepada tegangan efektifnya, bukan kepada tegangan totalnya. Rumus $s' = s' - u$ hanya berlaku apabila tanah berada dalam kondisi jenuh.

2.3 KUAT GESER TANAH

Kekuatan geser suatu tanah merupakan perlawanan di dalam tanah tersebut per satuan luas terhadap keruntuhan atau pergeseran sepanjang bidang geser dalam tanah yang dimaksud. Kita harus mengetahui sifat – sifat ketahanan geser pada suatu tanah untuk menganalisa masalah stabilitas tanah tersebut. Hal ini disebabkan karena pada dasarnya keruntuhan suatu tanah bukan akibat kehancuran butirannya.

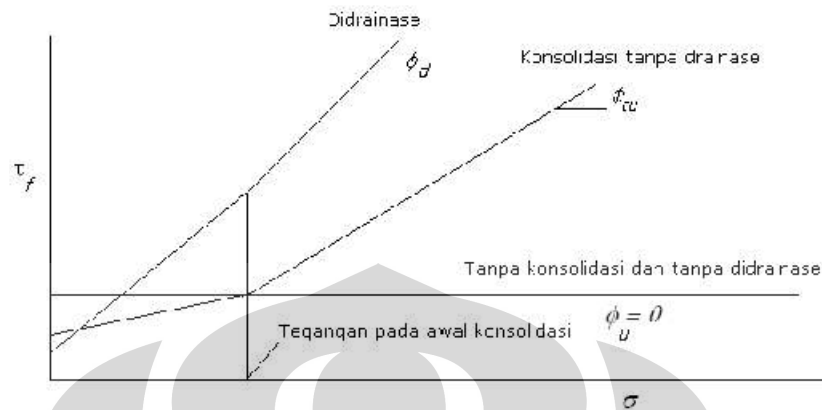
Analisa kuat geser sebagai berikut :

- Kuat geser tanah terdiri dari dua komponen utama, yaitu : *frictional strength* dan *cohesive strength*. Besarnya kuat geser ini juga bergantung dengan nilai tegangan vertikal efektif tanah.
- Nilai c dan ϕ sangat bergantung pada beberapa faktor antara lain: jenis tanah, kadar air, kecepatan pembebanan, kondisi drainase, sejarah tegangan, tegangan geser, regangan lateral, tegangan-tegangan utama.

- Untuk tanah berbutir kasar, tidak terjadi gaya kohesif diantara butirannya, yaitu nilai c diambil sama dengan nol. Akan tetapi apabila pada tanah ini bekerja *confining stress*, maka tahanan tanah ini terhadap geser akan merupakan fungsi dari *confining stress* tersebut atau dengan kata lain kuat geser ini akan merupakan fungsi dari beban normal yang bekerja diantara partikel. Nilai ϕ terdiri dari tiga komponen, yaitu : gesekan antar partikel, *interlocking*, dan *dilatancy*.
- Untuk tanah berbutir halus, nilai ϕ akan sama dengan nol, sehingga kuat gesernya akan bergantung pada nilai kohesi, c , tanah. Itulah sebabnya untuk tanah ini, walaupun tegangan yang bekerja sama dengan nol, tanah ini masih mempunyai kuat geser.

Pada pembangunan timbunan diatas tanah lunak, penimbunan tidak akan segera mengakibatkan peningkatan kekuatan tanah. Sesudah lapisan tanah dasar terkonsolidasi oleh beban timbunan tersebut, maka kekuatan geser akan bertambah. Jadi, dalam perhitungan stabilitas sesudah diadakan penimbunan, disarankan mengadakan analisis tegangan total dengan menggunakan nilai kekuatan geser yang diperoleh dari percobaan "*Unconsolidated Undrained*" atau "*Unconfined Compression Test*". Selanjutnya dalam analisis jangka panjang, lebih baik mempertimbangkan peningkatan kekuatan tanah dengan menggunakan analisa tegangan efektif (Kazuto Nakazawa, 2000).

Mengingat tegangan efektif pada tanah lunak yang tidak jenuh meningkat sesuai dengan tegangan total, maka kekuatan geser sebagai faktor yang didasarkan pada nilai tegangan total mempunyai sifat peningkatan seperti yang terlihat pada gambar 2.3. Hal ini berlaku juga untuk tanah yang berada dalam keadaan tidak didrainase (*Undrained*) sampai seluruh pori menjadi jenuh dengan air oleh pembebanan yang terjadi.



Gambar 2.3 Tegangan karakteristik tanah kohesif (Nakazawa K, 2000)

Untuk tanah kohesif kenaikan kekuatan tanah adalah :

$$\Delta C = 0.22 \Delta s \quad (2.10)$$

Sebelum ada timbunan atau pembebanan :

$$C_0 = C_{\text{tanah asli}}$$

Setelah timbunan awal (tahap 1) :

$$C = C_0 + 0.22 \Delta s_1$$

Setelah timbunan berikutnya (tahap 2) :

$$C = C_0 + 0.22 \Delta s_1 + 0.22 \Delta s_2$$

Nilai C akan bertambah jika tahapan timbunan makin tinggi.

(sumber : An Introduction to Geotechnical Engineering Robert D.Holtz, William D.Kovacs)

2.3.1 Keruntuhan Pada Lereng

Dalam disiplin ilmu teknik sipil ada empat macam lereng yang harus kita perhatikan, yaitu :

- Lereng alam, yaitu lereng yang terbentuk karena proses – proses alam.
- Lereng yang dibuat dalam tanah asli, yaitu lereng yang dibuat untuk kepentingan umum dengan tanah asli yang belum dipadatkan. Misalnya, tanah dipotong untuk pembuatan jalan atau saluran air untuk kepentingan irigasi.

- Lereng yang dibuat dari tanah yang dipadatkan, yaitu lereng yang sudah melalui proses pemadatan terlebih dahulu. Misalnya tanggul untuk jalan atau bendungan tanah.
- Lereng yang dibuat dari tanah yang digali, misalnya konstruksi dinding penahan tanah.

Gerakan keruntuhan lereng merupakan suatu gambaran dari struktur tanah dimana gaya yang mendorong melebihi gaya yang menahan pada lereng tersebut. Hampir dari seluruh gaya yang menyebabkan keruntuhan lereng secara dominan dipengaruhi oleh gravitasi dan iklim. Gaya yang disebabkan oleh gravitasi mempunyai kontribusi besar antara lain terhadap berat dari lereng dalam bentuk material, berat beban tanah, serta gaya luar akibat bangunan, tiang pancang, dan beban struktur lainnya. Gaya – gaya dari gempa bumi, ledakan, dan getaran mesin harus ditambahkan pada saat analisis *slope stability*. Adapun gaya yang diakibatkan oleh iklim akan selalu berhubungan dengan masalah air, udara, dan temperatur. Gaya yang diakibatkan oleh ketiga komponen alam tersebut antara lain adalah gaya – gaya dorong angin, aliran permukaan, aliran air tanah, hujan, kelembapan, dan temperatur akan memberikan dampak kepada perpindahan (*displacement*) tanah. Akan tetapi, lereng memiliki kekuatan gaya geser untuk menahan gaya yang menyebabkan material bergerak ke bawah atau menjauhi lereng. Tumbuh – tumbuhan dan sistem struktur buatan manusia seperti penutup lereng (*shore protection*) dan struktur perkuatan lereng, dapat pula meningkatkan perkuatan lereng.

Keseimbangan gaya yang bekerja pada lereng tersebut bisa saja berubah seiring dengan bertambahnya waktu yang disebabkan oleh cuaca dan perubahan tekanan air pori yang diatur oleh faktor iklim, sehingga penggunaan teknologi yang tepat dapat meningkatkan dan memperbaiki kekuatan geser tanah atau meminimalkan efek yang merugikan dari faktor iklim. Mekanisme gaya yang mendorong dan gaya yang menahan diantara butir – butir tanah. Sekali gerakan telah dimulai, bentuk – bentuk

hubungan antara gaya dorong dan gaya tahan tanah mungkin sangat berbeda dari satu proses ke satu proses lainnya, dan perbedaan ini pada umumnya digunakan untuk mengklasifikasikan proses keruntuhan lereng.

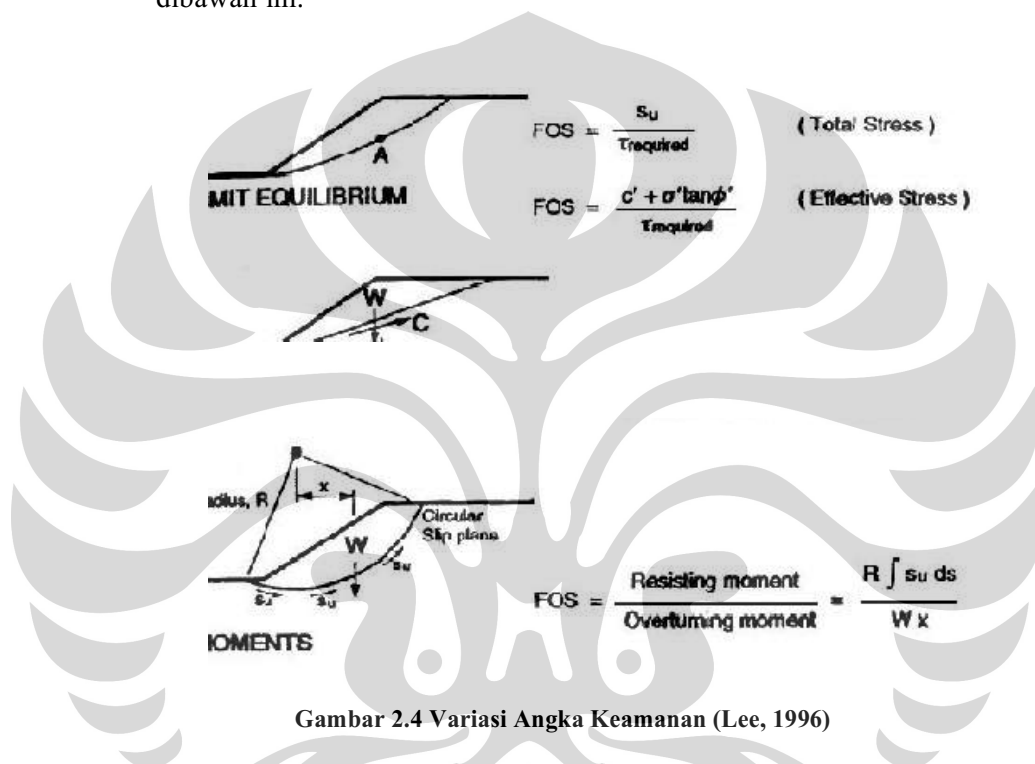
Proses – proses tersebut dapat dipisahkan ke dalam dua kelompok besar, yaitu gerakan partikel tanah. Dalam gerakan massa tanah, keruntuhan yang akan terjadi merupakan suatu unit yang berhubungan, jika gerakan massa tanah tersebut terjadi sepanjang permukaan yang halus (*rigid body movement*) disebut *slide* atau *slump*, bidang terjadinya keruntuhan inilah yang disebut bidang gelincir (*slip surface*). Sedangkan, jika gaya geser terjadi merata di seluruh massa tanah dan tanpa bidang runtuh yang jelas disebut *flow*. Dalam *flow*, gerakan yang terjadi merupakan gerakan diferensial di dalam massa tanah yang mengalir. Gerakan dimana partikel bergerak secara individual tanpa atau sedikit berhubungan dengan partikel didekatnya, sulit untuk terjadi. Sekalipun demikian, beberapa proses terlihat sebagai gerakan partikel, khususnya pada erosi yang disebabkan oleh gelombang, aliran air, hujan, air tanah, dan angin.

2.3.2 Konsep Angka Keamanan

Angka keamanan merupakan hal yang vital dalam mendesain suatu lereng sehingga dibutuhkan pemahaman yang mendalam didalamnya. Nilai angka keamanan diambil sebanding dengan banyaknya ketidakpastian yang terdapat dalam mendesain lereng seperti parameter kekuatan tanah, distribusi tekanan air pori, dan lapisan tanah. Secara umum, semakin kecil kualitas dari investigasi lapangan, semakin tinggi angka keamanan yang harus diberikan. Angka keamanan akan semakin besar jika desainer memiliki pengalaman yang terbatas.

Pada analisis keseimbangan batas, dihitung tegangan geser yang diperlukan sepanjang bidang keruntuhan potensial yang hanya cukup untuk mempertahankan keseimbangan dan dibandingkan dengan kekuatan

geser yang ada. Pada kasus ini angka keamanan diasumsikan konstan untuk seluruh bidang keruntuhan. Maka kekuatan geser yang ada dirata-ratakan dengan proporsi yang sama pada setiap titik dibidang keruntuhan untuk menahang yang meruntuhkan. Berikut ini disajikan variasi angka keamanan yang biasa digunakan yang dapat dilihat dari Gambar 2.4 dibawah ini.



Untuk konsep tegangan total :

$$\tau_{reg} = \frac{S_u}{FS} \quad (2.11)$$

Untuk konsep tegangan efektif :

$$\tau_{reg} = \frac{c'}{FS} + \frac{\sigma' \cdot \tan \phi}{FS \phi} \quad (2.12)$$

Dimana :

S_u = kekuatan geser total *Undrained*

c' = kohesi tanah efektif

f = sudut friksi tanah efektif

FS = *safety factor* untuk tegangan total

FS_c & FS_f = *safety factor* untuk tegangan efektif f

Pengambilan FS_c & FS_f dapat berbeda proporsinya untuk komponen kohesi dan friksi yang dimobilisasi sepanjang bidang keruntuhan. Pada banyak kasus analisis keseimbangan batas, dipakai FS_{ϕ_c} & FS_{ϕ} .

Definisi lain angka keamanan selalu memperhitungkan perbandingan antara gaya yang menahan dan yang meruntuhkan untuk bidang keruntuhan yang datar atau perbandingan antara momen total dengan momen yang meruntuhkan. Ketiga metode pengambilan metoda perhitungan angka keamanan diatas akan memberikan harga-harga yang berbeda. Pemilihan angka keamanan untuk keperluan desain suatu lereng ditentukan oleh jenis / letak lereng yang dapat dilihat pada Tabel 2.2. Tingkat ketidakpastian data tanah yang dibutuhkan serta resiko yang akan ditanggung oleh manusia atau properti lain apabila lereng tersebut mengalami kegagalan.

Tabel 2.2 .Rekomendasi Angka Keamanan Minimum (Duncan and Buchignani, 1975)

| Cost and Consequences of Slope Failure | Uncertainty of Strength Measurements | |
|---|--------------------------------------|----------------|
| | Small | Large |
| Cost of repair comparable to cost of construction. No danger to human life of other property if slope fails. | 1.25 | 1.5 |
| Cost of repair much greater than cost of construction, or danger to human life of other valuable property if slope fails. | 1.5 | 2.0 or greater |

Tabel 2.3 Angka Keamanan Minimum Untuk Lereng – Tanpa Gempa (Konsensus TPKB DKI- Jakarta,1999;Djayaputra,1999)

| Kondisi Lingkungan | Keandalan Parameter Tanah | | | |
|---------------------------|---------------------------|----------|----------|----------|
| | Kurang | | Cukup | |
| | Temporer | Permanen | Temporer | Permanen |
| Tidak ada hunian/bangunan | 1.3 | 1.5 | 1.25 | 1.3 |
| Banyak bangunan sekitar | 1.5 | 2 | 1.3 | 1.5 |

Tabel 2.4 .Rekomendasi Angka Keamanan Minimum dari Beberapa Institusi Internasional

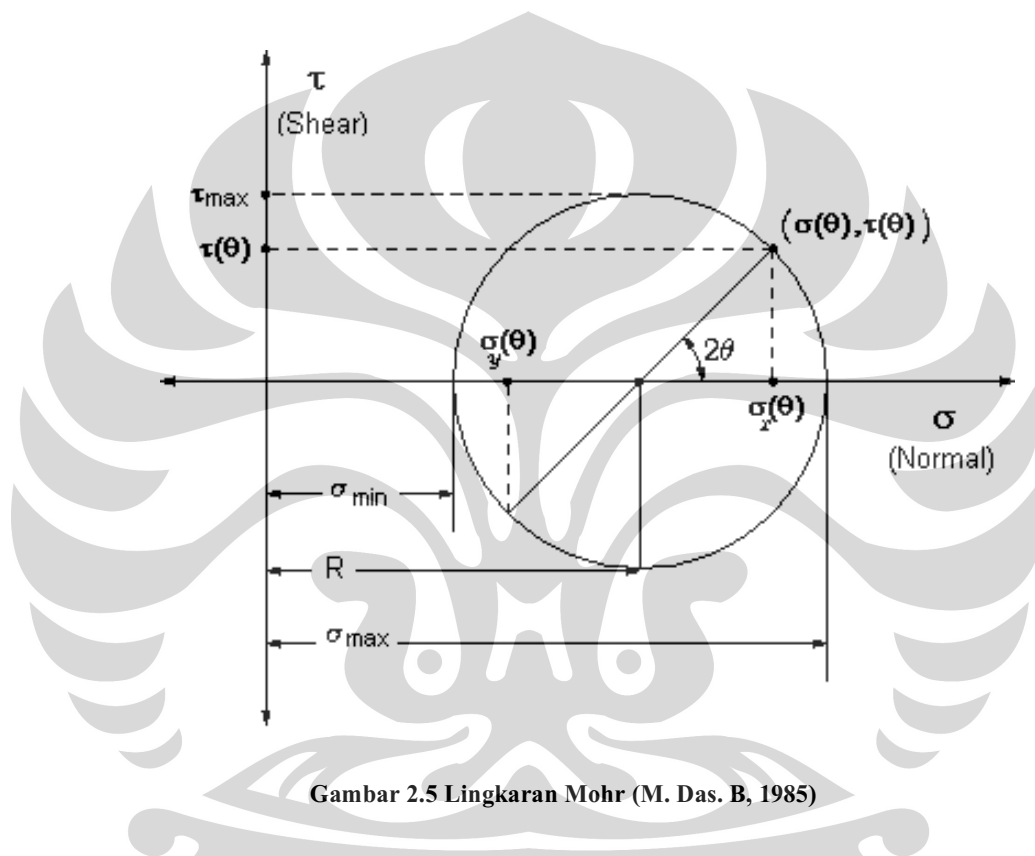
| | United States (Federal Register, 1997) | Minimum SF |
|-----|--|------------|
| I | End of construction | 1.3 |
| II | Partial pool with steady seepage construction | 1.5 |
| III | Steady seepage from spillway or decant crest | 1.5 |
| IV | Earthquake (cases II and III with seismic loading) | 1 |

2.3.3 Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb

Keruntuhan pada suatu tanah terjadi akibat kombinasi kritis dari gaya geser dan gaya normal yang dialami oleh tanah tersebut (Mohr,1900). Berdasarkan teori ini, keruntuhan tanah tidak diakibatkan oleh gaya

normal maksimal saja atau gaya geser maksimal saja yang dialami oleh tanah tersebut. Tapi akibat kombinasi gaya normal dan gaya geser yang dialami tanah tersebut. Hubungan antara gaya normal dan gaya geser pada suatu bidang runtuh merupakan suatu fungsi berupa :

$$\tau = f(\sigma)$$



Gambar 2.5 Lingkaran Mohr (M. Das. B, 1985)

Kekuatan geser tanah sendiri dapat dianggap terdiri dari dua komponen, yaitu:

1. komponen yang bersifat kohesi yang bergantung kepada macam tanah dan kepadatan butirnya, dan
2. komponen yang mempunyai sifat gesekan (*frictional*) yang sebanding dengan tegangan efektif yang bekerja pada bidang geser.

Walaupun garis keruntuhan pada rumus tersebut sebenarnya berbentuk kurva lengkung, akan tetapi pada kebanyakan kasus mekanika tanah kurva tersebut dapat disederhanakan dengan menganggapnya sebagai garis lurus (Coulomb, 1776) dengan fungsi :

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (2.13)$$

dimana :

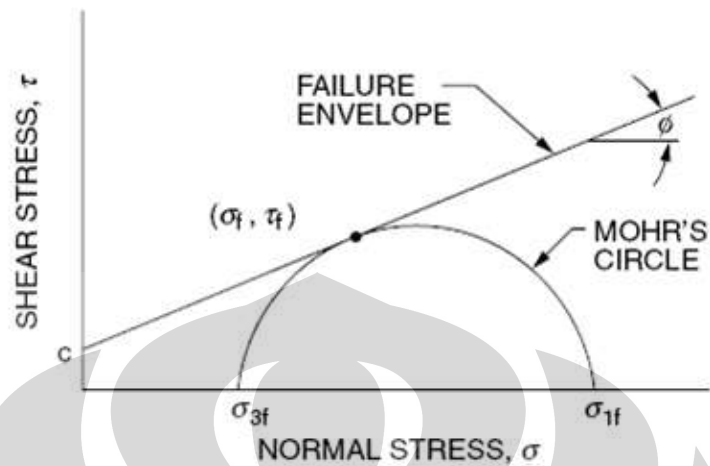
- τ = kekuatan geser
- c = kohesi
- σ = tegangan normal pada bidang runtuh
- φ = sudut geser dalam

Persamaan tersebut dinamakan kriteria keruntuhan Mohr-Coloumb (*Mohr-Coloumb failure criterion*). Persamaan kekuatan geser ini berdasarkan tegangan total.

Pada tanah dalam kondisi jenuh, nilai tegangan normal total yang bekerja pada suatu titik adalah nilai penjumlahan dari tegangan efektif dan tegangan air pori. Jadi tegangan yang dipikul oleh partikel padat tanah sesungguhnya adalah tegangan efektif tanah. Persamaan kriteria keruntuhan Mohr-Coloumb dengan dasar tegangan efektif adalah :

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi' \quad (2.14)$$

dimana σ' , c' , dan φ' adalah nilai tegangan normal pada bidang runtuh, kohesi, dan sudut geser dalam berdasarkan tegangan efektif.



Gambar 2.6 Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb (M. Das, B, 1985)

2.3.4 Kenaikan Kekuatan Tanah

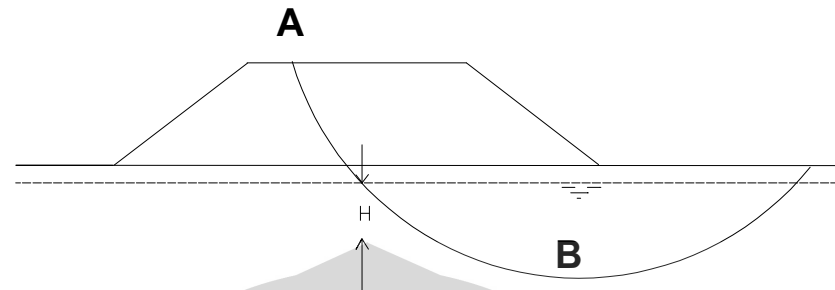
Pada pembangunan timbunan diatas tanah lunak, dibutuhkan waktu yang lama agar air pori terdisipasi, akibat koefisien permeabilitas pada tanah lunak relatif kecil. Hal ini menyebabkan penimbunan tidak akan segera mengakibatkan peningkatan kekuatan tanah. Sesudah lapisan tanah dasar terkonsolidasi oleh beban timbunan tersebut, maka kekuatan geser akan bertambah.

2.3.5 Stabilitas *end of construction* Timbunan di atas Tanah Lempung

Pada Gambar 2.7 terlihat konstruksi timbunan pada tanah lempung jenuh. Misalkan B adalah sebuah titik pada bidang keruntuhan potensial yang berbentuk busur lingkaran sebelum berdirinya timbunan. Dengan asumsi 1-D Terzaghi, dimana pada kenyataannya sepanjang garis keruntuhan A-B ada nilai yang sebagian dipikul oleh tanah maka tekanan air pori di titik B dapat kita nyatakan dengan :

Universitas Indonesia

$$u = h\gamma_w \quad (2.33)$$



Gambar 2.7 Timbunan di Atas Tanah Lunak (after Bishop and Bjerrum, 1960)

Saat proses penimbunan mulai dikerjakan maka tekanan air pori akan terus bertambah sampai konstruksi timbunan selesai pada waktu tertentu, sehingga besarnya tekanan air pori menjadi :

$$u_1 = u + \Delta u \quad (2.15)$$

Dimana : $\Delta u = \text{excess pore pressure}$ yang terjadi akibat lambatnya proses drainase pada tanah lempung.

Besarnya penambahan tegangan (akibat berdirinya konstruksi timbunan yang dianggap berlangsung pada waktu yang singkat) lebih cepat dari proses terdisipasinya air pori (*Undrained*). Akibat proses penimbunan maka terjadi penambahan tegangan pada tanah yaitu penambahan tegangan total dari tanah, dimana penambahan tegangan total tersebut akan dibagi menjadi penambahan tegangan efektif dan penambahan tegangan air pori.

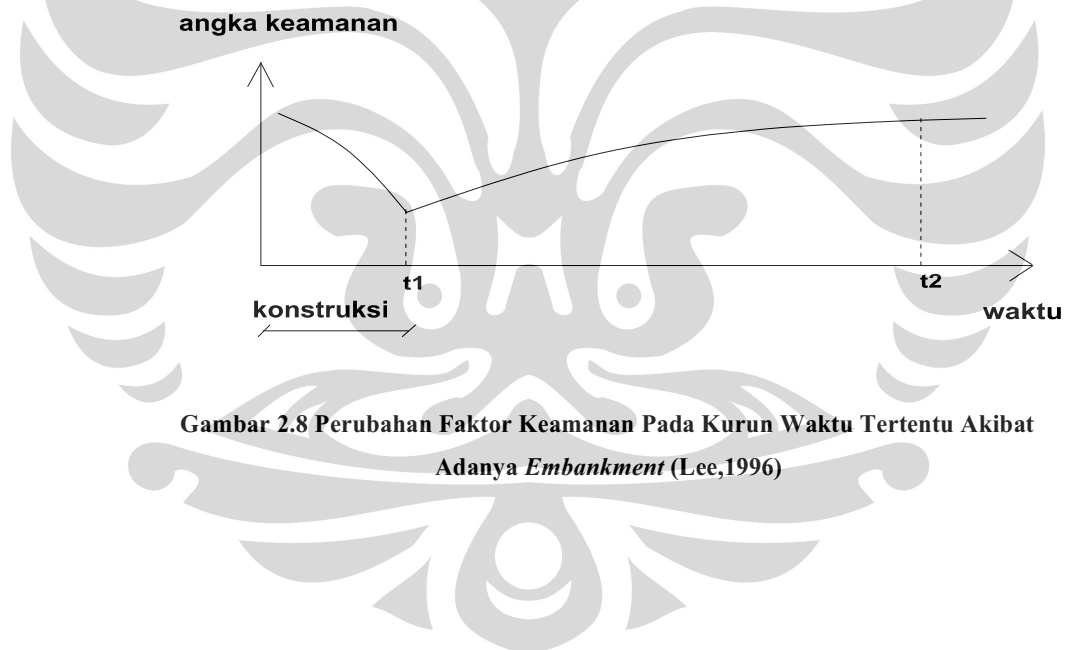
$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta u \quad (2.16)$$

Karena lempung mempunyai daya rembes yang sangat rendah, dan air tidak termampatkan (*incompressible*) dibanding butiran tanah, maka pada saat $t=0$, seluruh penambahan tegangan akan dipikul oleh air atau $\sigma_s = \sigma_u$. Sesaat setelah penambahan tegangan, pada lapisan lempung, air dalam ruang pori mulai tertekan dan mengalir keluar, sehingga tekanan air pori

pada tiap-tiap lapisan tanah akan berkurang secara berlahan-lahan, dan tegangan yang dipikul oleh butiran tanah (tegangan efektif) akan bertambah.

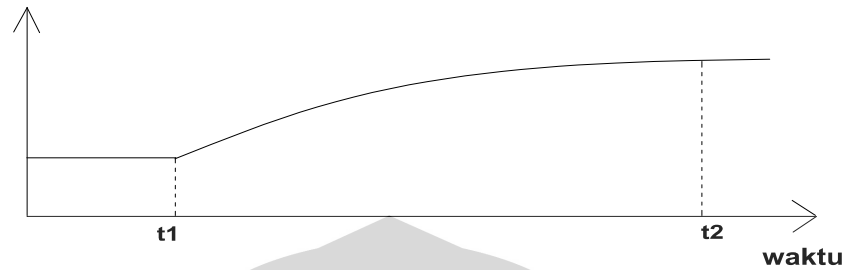
$$\tau_{ff} = \sigma'_{eff} \cdot \tan \phi' + c \quad (2.17)$$

Akibat peristiwa ini, pada saat $t =$ tak hingga, secara teori seluruh kelebihan tekanan air pori akan hilang dari tanah lempung, $0u = 0u =$, dan seluruh penambahan tegangan dipikul oleh butiran tanah, $s = s =$, sehingga kuat geser tanah akan meningkat. Terjadinya perubahan tekanan air pori dan kuat geser tanah, maka terjadi juga proses perubahan angka keamanan dari timbunan seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah :



Gambar 2.8 Perubahan Faktor Keamanan Pada Kurun Waktu Tertentu Akibat Adanya Embankment (Lee,1996)

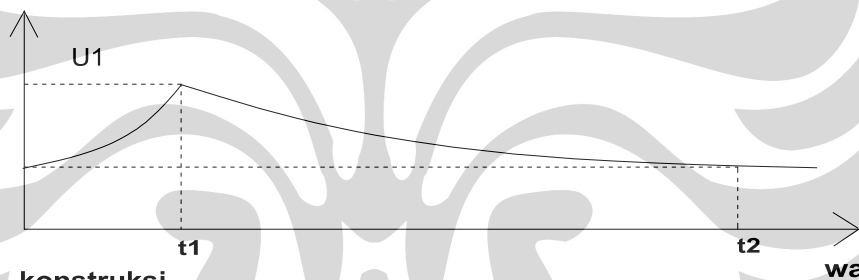
kekuatan geser tanah



konstruksi

Gambar 2.9 Perubahan Kuat Geser Tanah Pada Kurun Waktu Tertentu Akibat Adanya *Embankment* (Lee,1996)

tekanan air pori



konstruksi

Gambar 2.10 Perubahan Tekanan Pada Kurun Waktu Tertentu Akibat *Embankment* (Lee,1996)

Dari gambar-gambar diatas dapat kita lihat kondisi kritis terjadi karena timbulnya *excess pore pressure* pada waktu *end of construction* yang disebabkan karena penambahan tegangan lebih cepat dibandingkan terdisipasinya air pori. Kondisi ini bisa disebut *Undrained condition*, sehingga untuk menganalisa timbunan ini harus dilakukan *Undrained analysis*.

2.3.6 Analisis *Undrained* dan *Drained*

Analisis *Drained* utamanya digunakan untuk tanah bergranular, seperti *sandy soil* dan *gravel soil*. Tetapi dapat digunakan juga untuk perilaku jangka panjang dari *clayey soil*. Pada kondisi *drained*, mengasumsikan bahwa tekanan air pori telah terdisipasi seluruhnya ($u_e = 0$), dan dengan demikian volume tanah pun berubah.

Kekuatan geser dalam keadaan *Drained* dinyatakan dengan tegangan total, dengan parameter-parameter kekuatan gesernya dinotasikan sebagai c_u dan ϕ_u .

Kekuatan geser dalam keadaan *Undrained* dinyatakan dalam parameter-parameter tegangan efektif c' dan ϕ' (Craig R.F). Analisis pada kondisi *Undrained* dapat dilakukan dalam bentuk analisa tegangan efektif, tetapi tegangan air pori yang terjadi (u) akibat perubahan tegangan harus diketahui. Kondisi *Undrained* berhubungan dengan kasus stabilitas jangka pendek terutama untuk tanah yang memiliki permeabilitas kecil seperti pada tanah lempung. Untuk tanah yang berbutir kasar (*granular*), dengan permeabilitas besar, ketika diberi perubahan tegangan kondisi pendek dan jangka panjang bisa dianggap sama karena u yang cepat.

Selain itu untuk menganalisis kondisi *Undrained* dapat juga dilakukan dengan analisis tegangan total dengan menggunakan parameter kekuatan tanah *Undrained*. Pada analisa tegangan total ini maka distribusi tekanan air pori sepanjang bidang keruntuhan tidak diperlukan. Metode ini dapat dibuat menjadi lebih sederhana lagi dalam analisis dengan mengambil nilai $\phi = 0$, tetapi untuk tegangan total, kita tidak dapat mengamati dan menganalisa besarnya konsolidasi setiap waktu selama konsolidasi berlangsung akibat tidak dapat diamatinya perubahan tegangan air pori yang terjadi.

2.4 TEORI PENURUNAN

Bila suatu lapisan tanah mengalami pembebanan akibat beban di atasnya (misalnya akibat pondasi atau akibat lapisan tanah di atasnya), maka pada tanah akan mengalami penambahan tegangan, sehingga pada tanah terjadi penurunan (*settlement*). Keluarnya air dari dalam pori selalu disertai dengan berkurangnya volume tanah. Berkurangnya volume tanah ini menyebabkan penurunan lapisan tanah tersebut.

Untuk tanah lunak, air pori ini memerlukan waktu yang cukup lama untuk mengalir keluar karena permeabilitasnya yang rendah (koefisien rembesan lempung sangat kecil dibandingkan dengan pasir). Pada umumnya proses konsolidasi hanya akan berlangsung dalam satu arah saja yaitu arah vertikal.

Secara umum, jenis penurunan yang terjadi akibat pembebanan dapat dibagi dalam 3 tahap, yaitu :

1. Penurunan seketika (*immediate*), terjadi selama proses konstruksi dilakukan. Penurunan ini terjadi akibat dari deformasi tanah kering atau basah, dan jenuh air. Umumnya penurunan ini diturunkan dari teori elastisitas. Parameter yang dibutuhkan adalah *Undrained modulus* dengan uji coba yang dianjurkan yaitu : SPT, Sondir, Dilameter test, dan Pressuremeter test.
2. Penurunan Konsolidasi primer (*primary consolidation settlement*), adalah hasil penurunan yang disebabkan oleh perubahan volume yang berlangsung selama periode keluarnya air yang menempati pori-pori tanah.
3. Penurunan konsolidasi sekunder (*secondary consolidation settlement*), adalah penurunan tanah yang terjadi setelah tekanan air pori hilang seluruhnya yang merupakan proses pemampatan yang disebabkan oleh penyesuaian yang bersifat plastis dari butir-butir tanah biasanya hal ini dikenal juga dengan istilah *creep*.

2.4.1 Penurunan Elastik

Penurunan elastik terjadi dalam kondisi *Undrained* (tidak ada perubahan volume) dari proses penurunan ini terjadi dalam waktu yang sangat singkat setelah diberi pembebanan saat itu juga. Besarnya penurunan elastik, tergantung dari besarnya modulus elastik kekakuan tanah dan besarnya beban timbunan yang diberikan.

Besarnya penurunan elastik menurut Janbu, Bjerrum, dan Kjarensli (1926) dapat diperkirakan dengan persamaan berikut :

$$S_c = A_1 A_2 \frac{q_o B}{E_s} \quad (2.18)$$

Dimana :

q_o = beban timbunan, kN/m²

A_1 = Konstanta yang dipengaruhi H/B dan L/B

A_2 = Konstanta yang dipengaruhi D_f/B

H = Tebal lapisan

B = Lebar timbunan

L = Panjang timbunan

D_f = Dalamnya penggalian (untuk kasus timbunan maka $D_f = 0$)

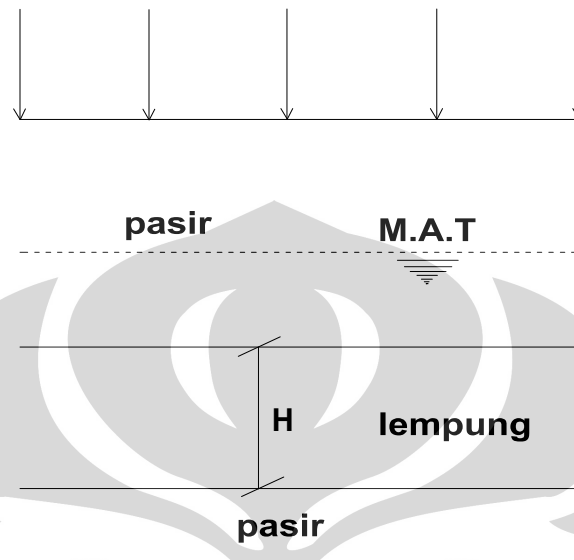
2.4.2 Konsolidasi Primer

Pada tanah lempung jenuh air, penambahan total tegangan akan diteruskan ke air pori dan butiran tanah. Hal ini berarti penambahan tegangan total, $\Delta\sigma$, akan terbagi sebagian ke tegangan efektif dan sebagian lagi ke tekanan air pori. Dari prinsip tegangan efektif, maka :

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta u \quad (2.19)$$

Dimana : $\Delta\sigma'$ = penambahan tegangan efektif

Δu = penambahan tekanan pori.



Gambar 2.11 Lapisan Lempung yang Mengalir ke Atas dan ke Bawah
(M. Das. B, 1985)

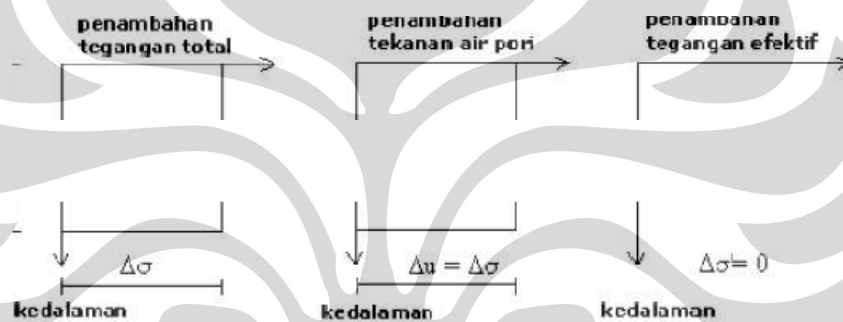
Karena lempung mempunyai daya rembes yang sangat rendah dan air adalah tidak termampatkan (*incompressible*) dibandingkan butiran tanah, maka pada saat $t = 0$, seluruh penambahan tegangan, $s?$, akan dipikul oleh air ($u? =? s$) pada seluruh kedalaman lapisan tanah. Penambahan tegangan tersebut tidak dipikul oleh butiran tanah ($0'=? s$). Sesaat setelah pemberian penambahan tegangan, $s?$, pada lapisan lempung, air dalam pori mulai tertekan dan akan mengalir keluar. Dengan proses ini, tekanan air pori pada tiap-tiap kedalaman pada lapisan lempung akan berkurang secara perlahan-lahan, dan tegangan yang dipikul oleh butiran tanah (tegangan efektif) akan bertambah. Jadi pada saat, $0 < t < 8$, $\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta u$ ($\Delta\sigma' = 0$ dan $\Delta u < \Delta\sigma$).

Tetapi, besarnya $s?$ dan $u?$ pada tiap-tiap kedalaman tidak sama, tergantung pada jarak minimum yang harus ditempuh oleh air pori untuk

mengalir ke luar lapisan pasir yang berada di atas atau dibawah lapisan lempung.

Pada saat $t = 0$, seluruh kelebihan air pori sudah hilang dari lapisan tanah lempung, jadi $u = 0$. Sekarang penambahan tegangan total, Δs , akan dipikul oleh butiran tanah/struktur tanah, maka $\Delta s = \Delta \sigma'$.

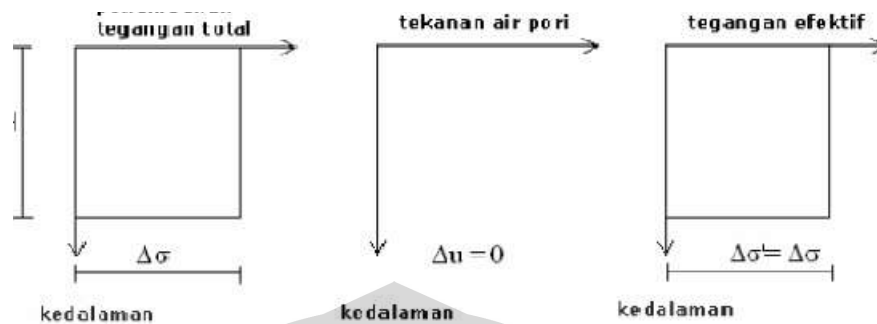
Berikut ini adalah variasi tegangan total, tekanan air pori, dan tegangan efektif pada suatu lapisan lempung dimana air dapat mengalir ke atas dan kebawah sebagai akibat dari penambahan tegangan, Δs yang ditunjukkan oleh Gambar 2.12, 2.13, dan 2.14.



Gambar 2.12 Kondisi Tegangan pada saat $t = 0$ (M. Das, B, 1985)



Gambar 2.13 Kondisi Tegangan pada saat $0 < t < 8$ (M. Das, B, 1985)



Gambar 2.14 Kondisi Tegangan Pada Saat $t = 8$ (M. Das, B, 1985)

Proses terdisipasinya air dalam pori-pori tanah secara perlahan-lahan, sebagai akibat adanya penambahan beban yang disertai dengan pemindahan kelebihan tekanan air pori ke tegangan efektif, akan menyebabkan terjadinya penurunan yang merupakan fungsi dari waktu (*time-dependent settlement*) pada lapisan tanah lempung. Suatu tanah di lapangan pada suatu kedalaman tertentu telah mengalami "tekanan efektif maksimum" akibat berat tanah di atasnya (*maximum effective overburden pressure*) dalam sejarah geologisnya. Tekanan efektif maksimum ini mungkin sama atau lebih kecil dari tekanan *overburden* yang ada pada saat pengambilan contoh tanah.

Berkurangnya tekanan di lapangan tersebut mungkin disebabkan oleh beban hidup. Pada saat diambil, contoh tanah tersebut terlepas dari *overburden* yang membebani selama ini; sebagai akibatnya tanah tersebut akan mengembang. Pada saat dilakukan uji konsolidasi pada contoh tanah tersebut, suatu pemampatan yang kecil (yaitu perubahan angka pori yang kecil) akan terjadi bila beban total yang diberikan pada saat percobaan adalah lebih kecil dari tekanan efektif *overburden* maksimum yang pernah dialami sebelumnya oleh tanah yang bersangkutan.

Apabila, beban total yang dialami pada saat percobaan adalah lebih besar dari tekanan efektif *overburden* maksimum yang pernah dialami sebelumnya, maka perubahan angka pori yang terjadi lebih besar. Ada tiga

definisi dasar yang didasarkan pada riwayat geologis dan sejarah tegangannya, yaitu :

1. Terkonsolidasi secara normal (*normally consolidated*), dimana tekanan efektif *overburden* pada saat ini merupakan tekanan maksimum yang pernah dialami oleh tanah tersebut.
2. *overconsolidated*, dimana tekanan efektif *overburden* saat ini lebih kecil dari tekanan yang pernah dialami oleh tanah tersebut sebelumnya. Tekanan efektif *overburden* maksimum yang pernah dialami sebelumnya dinamakan tekanan prakonsolidasi (*preconsolidation pressure, pc*).
3. *Under consolidated*, dimana tekanan efektif *overburden* saat ini belum mencapai maksimum sehingga peristiwa konsolidasi masih berlangsung.

Pada saat ini, besarnya penurunan yang akan terjadi di suatu lapisan tanah di lapangan akibat terjadi penambahan beban (*settlement*) dapat diperkirakan nilainya dengan menggunakan beberapa literatur yang berkaitan dengan kasus konsolidasi. Dalam beberapa kejadian lain, perkiraan penurunan ternyata jauh menyimpang dari penurunan yang terjadi sebenarnya di lapangan. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain :

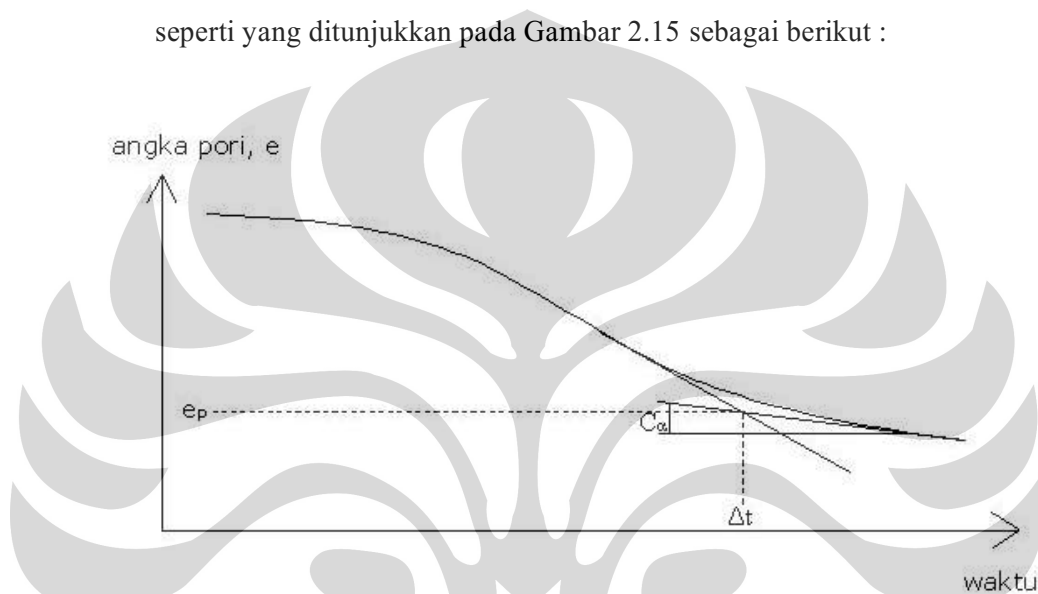
- Evaluasi sifat – sifat tanah yang dilakukan kurang benar
- Lapisan tanah ternyata tidak homogen dan tidak teratur
- Kesalahan dalam mengevaluasi penambahan tegangan bersih terhadap kedalaman, yang ternyata sangat mempengaruhi besarnya penurunan.

Dua hal yang penting mengenai penurunan ialah :

- Besarnya penurunan yang terjadi.
- Kecepatan penurunan tersebut.

2.4.3 Konsolidasi Sekunder

Pada akhir konsolidasi primer (yaitu setelah tekanan air pori = 0), penurunan masih tetap terjadi sebagai akibat dari penyesuaian plastis butiran tanah. Tahap konsolidasi ini dinamakan konsolidasi sekunder. Variasi dari angka pori dan waktu untuk penambahan beban akan sam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15 sebagai berikut :



Gambar 2.15 Variasi e Versus $\log t$, Untuk Indeks Konsolidasi Sekunder (M. Das, B, 2007)

Besarnya konsolidasi sekunder dapat dihitung sebagai berikut :

$$S_s = C'_a H \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (2.20)$$

Dimana :

$$C_a = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta e}{\log(t_2/t_1)} \quad (2.21)$$

C_a = indeks pemampatan sekunder

Δe = perubahan angka pori

t = waktu

$$C'_a = \frac{C_a}{1 + e_p} \quad (2.22)$$

E_p = angka pori pada akhir konsolidasi primer

H = tebal lapisan primer , m

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

2.5 PENURUNAN KONSOLIDASI

Konsolidasi adalah proses pemampatan pada suatu lapisan tanah akibat adanya penambahan beban di atas permukaan tanah. Pemampatan tersebut terjadi karena beberapa hal, misalnya keluarnya air pori atau udara dari dalam pori tanah, deformasi partikel tanah, relokasi partikel, dan lain – lain. Proses konsolidasi ini berlangsung terus sampai kelebihan tekanan air pori yang disebabkan oleh kenaikan tegangan total benar – benar hilang.

Dalam menghitung besarnya penurunan dan lamanya penurunan suatu lapisan tanah, maka perlu diketahui dahulu salah satu dari parameter kompresibilitasnya. Parameter-parameter tersebut didapat dari percobaan laboratorium :

1. Koefisien Perubahan volume (*Coefficient of Volume Change*)

Adalah perubahan volume persatuan tegangan. Perubahan volume dapat dinyatakan dengan perubahan angka pori maupun perubahan tebal contoh tanah. Koefisien ini dinotasikan dengan m_v . Hubungan antara m_v dan koefisien konsolidasi dapat dilihat pada rumus :

$$m_v = \frac{k}{\gamma_w \cdot C_v} \quad (2.23)$$

Tabel 2.5 Koefisien Permeabilitas ((M. Das, B, 1985)

| Soil Type | k | |
|--------------|-----------------|----------------|
| | cm/sec | ft/min |
| Clean gravel | 100 - 1.0 | 200 - 2.0 |
| Coarse sand | 1.0 - 0.01 | 1.0 - 0.02 |
| Fine sand | 0.01 - 0.001 | 0.02 - 0.002 |
| Silty clay | 0.001 - 0.00001 | 0.02 - 0.00002 |
| Clay | <0.000001 | <0.000002 |

2. Koefisien Kemampu-mampatan (*Coefficient Compressibility*)

Adalah perbandingan antara perubahan angka pori dengan perubahan tegangan. Dinyatakan dalam notasi a_v .

3. Indeks Kompresi (*Compression Index*)

Adalah kemiringan pada bagian linier dari kurva e -logs'. Dinyatakan dalam notasi C_c .

4. Koefisien Konsolidasi

Adalah koefisien yang menentukan kecepatan proses konsolidasi. Dinyatakan dalam dengan notasi C_v .

Ada dua metode yang digunakan untuk memperoleh koefisien konsolidasi yaitu metoda logaritma waktu (Casagrande dan Fedum, 1940) dan metoda akar waktu (Taylor, 1942). Untuk kedua metode tersebut, parameter C_v dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut :

$$C_v = \frac{T_v \cdot H_{dr}^2}{t} \quad (2.24)$$

Dimana : H_{dr} = Panjang aliran rata-rata yang harus ditempuh air pori selama konsolidasi.

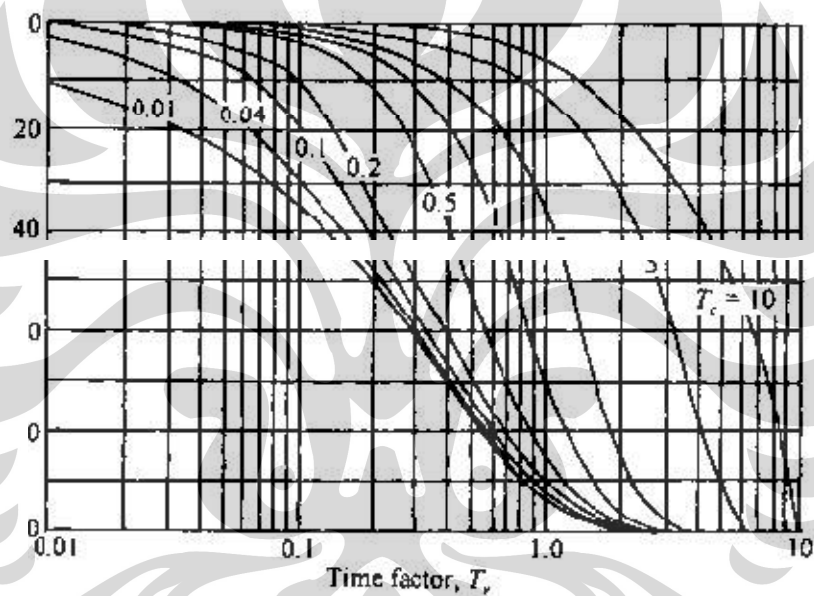
T_v = Faktor waktu

t = Waktu

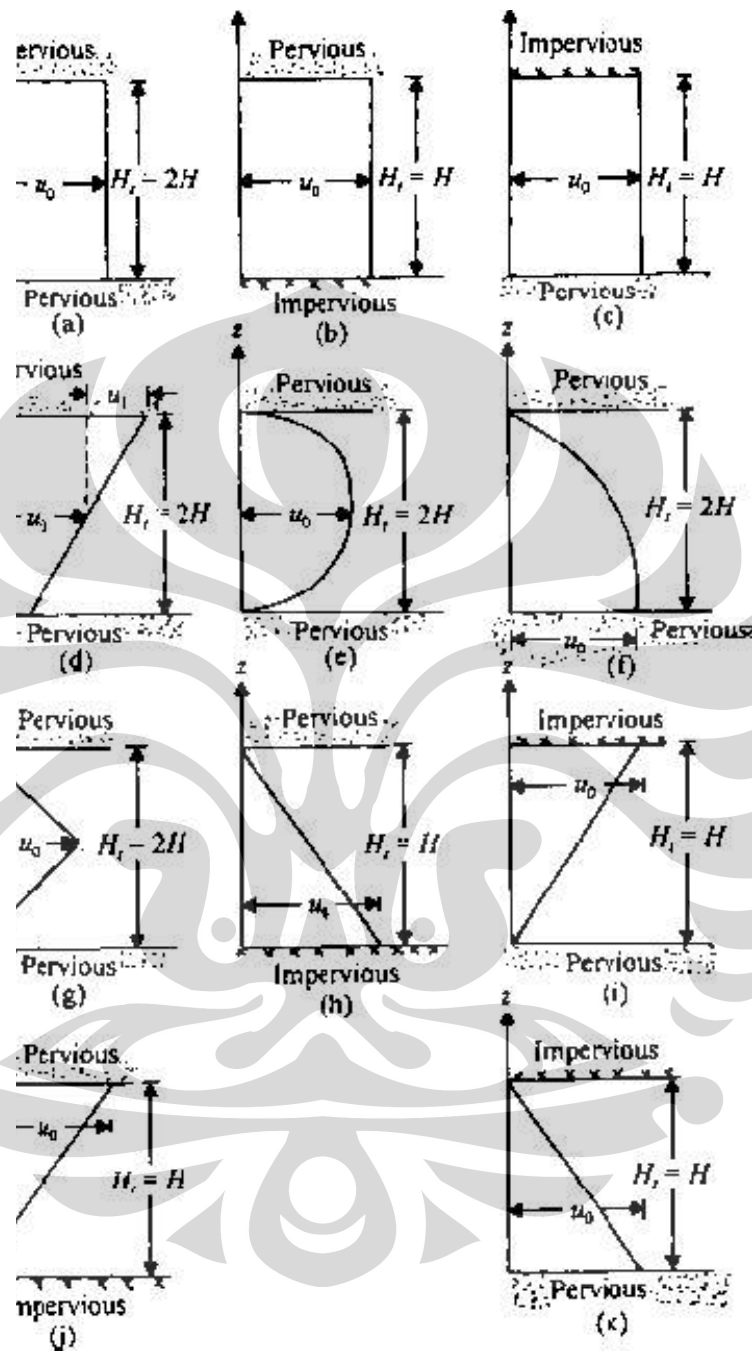
C_v = Koefisien konsolidasi vertikal

Metode *Time-Rate Consolidation* pertama kali dikemukakan oleh Terzaghi (1925), dengan asumsi :

- Lapisan lempung homogen.
- Lapisan lempung tersaturasi.
- Hanya terjadi perubahan volume akibat keluarnya air dari pori – pori tanah, saat tanah terkompres.
- Hukum Darcy berlaku
- Koefisien konsolidasi tetap selama proses konsolidasi.



Gambar 2.16 Grafik Time Factor One Dimensional Consolidation (after Olson, 1977)



Gambar 2.17 Variasi Nilai U terhadap Kedalaman (M. Das, B, 2007)

Untuk tanah yang terkonsolidasi normal besarnya penurunan dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$\Delta e = C_c [\log(p_o + \Delta p)] - \log p_o \quad (2.25)$$

$$S = \sum \left[\frac{c_c H}{1+e_o} \log \left(\frac{p_{oi} + \Delta p_i}{p_{oi}} \right) \right] \quad (2.26)$$

Untuk tanah yang *overconsolidated* dengan jumlah tegangan efektif *overburden* dan penambahan tegangan efektif (akibat beban) lebih kecil dari tegangan prakonsolidasinya : $(p_{oi} + \Delta p_i) \leq p_c$

$$\Delta e = C_s [\log(p_o + \Delta p)] - \log p_o \quad (2.27)$$

$$S = \sum \left[\frac{C_s H}{1+e_o} \log \left(\frac{p_o + \Delta p_o}{p_o} \right) \right] \quad (2.28)$$

Sedangkan bila jumlah tegangan efektif *overburden* dengan penambahan tegangan efektif (akibat beban) lebih besar dari tegangan prakonsolidasi :

$$(p_{oi} + \Delta p_i) > p_c$$

$$S = \sum \left[\frac{C_s H_f}{1+e_o} \log \left(\frac{p_c}{p_{oi}} \right) \right] + \sum \left[\frac{C_c H_f}{1+e_o} \log \left(\frac{p_{oi} + \Delta p_i}{p_{ci}} \right) \right] \quad (2.29)$$

Dimana :

C_c = kemiringan kurva = indeks pemampatan

C_s = indeks pemuaian

$p_{o(i)}$ = *overburden pressure* untuk sub-lapisan i

$\Delta p_{(i)}$ = kenaikan *overburden pressure* untuk sub-lapisan i

e_o = angka pori awal pada saat volume tanah sama dengan V_o

Δe = perubahan angka pori

Berikut ini adalah hasil empirik untuk C_c (Skempton, 1951) :

- untuk lempung yang struktur tanahnya tak terganggu (*undisturbed*)
 $C_c = 0.009 (LL-10)$

- untuk lempung yang terbentuk kembali (*remolded*)
 $C_c = 0.007 (LL-10)$

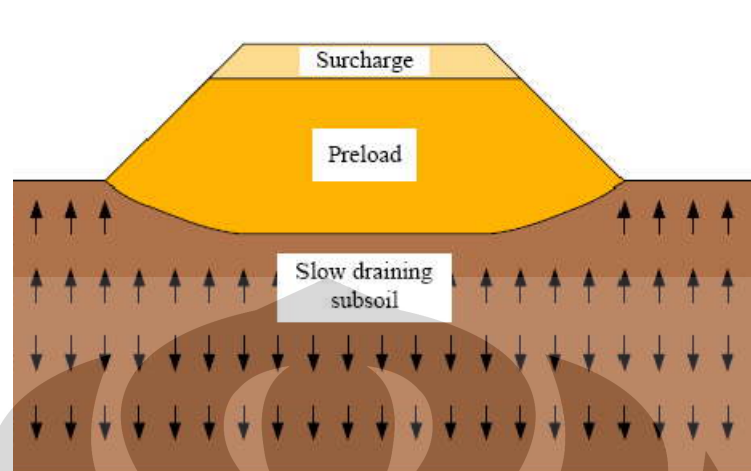
2.6 TIMBUNAN DI ATAS TANAH LUNAK

Pada tanah lempung yang dibebani, air yang berada dalam rongga tanah akan susah untuk berdisipasi keluar karena permeabilitas tanah lempung yang rendah. Oleh karena itu untuk tanah lempung dibutuhkan waktu yang lama agar tegangan air pori yang berlebih dapat berdisipasi. Hal ini berimplikasi pada pentingnya peranan waktu dalam menganalisa lapisan lempung tersebut.

Angka keamanan untuk stabilitas timbunan tanah lempung berubah seiring dengan waktu. Hal ini disebabkan perubahan parameter efektif kuat geser tanah seiring terjadinya proses disipasi tegangan air pori berlebih.

2.7 DRAINASE VERTIKAL

Konsolidasi primer biasanya memakan waktu yang sangat lama, bahkan bisa memakan waktu bertahun-tahun untuk jenis tanah lempung yang memiliki permeabilitas kecil. Tentu saja waktu yang lama ini sering kali menjadi masalah yang merepotkan dalam pekerjaan geoteknik. Oleh karena itu diperlukan solusi yang dapat mempercepat keluarnya air pori dari dalam tanah dengan menggunakan drainase vertikal. Drainase Vertikal didesain sebagai jalur drainase yang dimasukkan ke dalam.



Gambar 2.18 Drainase Vertikal di Bawah Timbunan (Chu et al., 2004)

2.7.1 Kapasitas Pengaliran

Tujuan penggunaan Drainase Vertikal adalah untuk mengurangi tekanan air pori di dalam tanah dan mengalirkannya ke luar. Untuk kapasitas pengeluaran air yang besar dari Drainase Vertikal sangat berkaitan dengan desain Drainase Vertikal yang optimum. Faktor – faktor yang mempengaruhi performa dari Drainase Vertikal adalah :

- Tegangan Konsolidasi
Besarnya kapasitas pengeluaran air oleh Drainase Vertikal akan berkurang dengan meningkatnya tegangan konsolidasi. Hal ini sangat didominasi oleh reduksi pada area perpotongan permukaan Drainase Vertikal dan penetrasi filter pada Drainase Vertikal. (Broms et al., 1994).
- Deformasi Drainase Vertikal
Dengan terjadinya konsolidasi tanah, maka Drainase Vertikal akan mengalami tekuk, geser, lengkung, atau terdeformasi ke dalam tanah disekitarnya. Kapasitas pengaliran akan berkurang jika terjadi tekuk pada pipa drainase vertikal. (Chu and Choa, 1995).

Universitas Indonesia

- Waktu
- Kemiringan Hidrolik
Kapasitas pengaliran semakin berkurang apabila kemiringan hidrolik semakin besar.
- Suhu
Temperatur yang tinggi akan meningkatkan laju aliran dan kapasitas pengaliran Drainase Vertikal.

Tabel 2.6 Tipe Drainase Vertikal (Holtz et al. 1991)

| Drain type | Installation method | Drain diameter [m] | Typical spacing [m] | Maximum length [m] |
|---|---|----------------------------------|---------------------|--------------------|
| Sand drain | Driven or vibratory closed-end mandrel (displacement type) | 0,15 - 0,6 | 1 - 5 | ≤ 30 |
| Sand drain | Hollow stem continuous-flight auger (low displacement) | 0,3 - 0,5 | 2 - 5 | ≤ 35 |
| Sand drain | Jetted (non-displacement) | 0,2 - 0,3 | 2 - 5 | ≤ 30 |
| Prefabricated sand drains ("sandwicks") | Driven or vibratory closed-end mandrel; flight auger; rotary wash boring (displacement or non-displacement) | 0,06 - 0,15 | 1,2 - 4 | ≤ 30 |
| Prefabricated band-shaped drains | Driven or vibratory closed-end mandrel (displacement or low displacement) | 0,05 - 0,1 (equivalent diameter) | 1,2 - 3,5 | ≤ 60 |

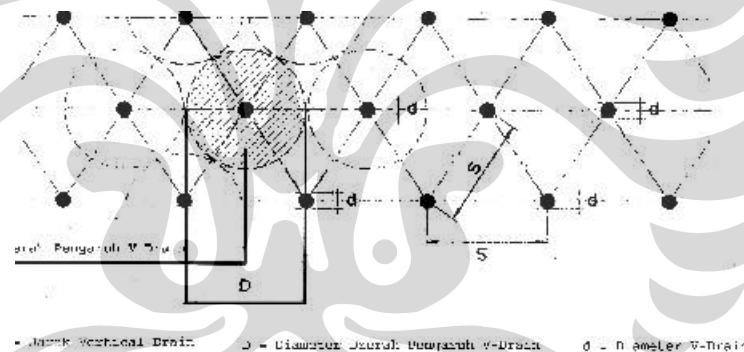
2.7.2 Konsolidasi Dengan Drainase Vertikal

Yang dimaksud dengan drainase vertikal disini adalah suatu sistem drainase yang terdiri dari bahan yang mempunyai permeabilitas tinggi yang ditanam dalam tanah lunak yang hendak diperbaiki, dapat berupa kolom pasir ataupun bahan buatan pabrik yang terdiri dari suatu bahan pelindung sintetis yang dapat menutupi lubang-lubang atau saluran plastik. Bahan pelindung sintetis itu terdiri dari bahan *non-woven polypropylene geotextile* atau kertas sintetis. Bahan ini berfungsi sebagai pembatas agar

partikel tanah lunak tidak masuk ke dalam saluran plastik sehingga dapat menyebabkan penyumbatan mengalirnya air. Sedangkan lubang-lubang atau saluran plastik berfungsi untuk menyediakan lintasan aliran.

Adapun dalam perencanaan drainase vertikal ini ada 2 hal yang perlu diperhatikan, yaitu :

- Pengaruh jarak drainase vertikal terhadap percepatan proses konsolidasi. Jarak antar drainase vertikal ini memberikan pengaruh terhadap lintasan drainase dari air pori tanah secara horisontal. Semakin jauh jarak antar drainase vertikal ini mengakibatkan semakin jauh pula jarak yang harus ditempuh air untuk keluar sehingga semakin lamanya proses konsolidasi.



Gambar 2.19 Jarak Pengaruh Drainase Vertikal pada Pola Segitiga (T.Stapelfeldt)

- Pengaruh panjang drainase vertikal terhadap percepatan proses konsolidasi, ditunjukkan pada gambar 2.18. Pada proses konsolidasi ini maka drainase vertikal hanya mempercepat proses konsolidasi pada daerah sepanjang vertikal drain saja. Drainase vertikal hanya mampu memperpendek jarak aliran drainase pada arah sepanjang aliran drainase vertikal, sedangkan untuk daerah di bawahnya hanya akan mengalami konsolidasi biasa.

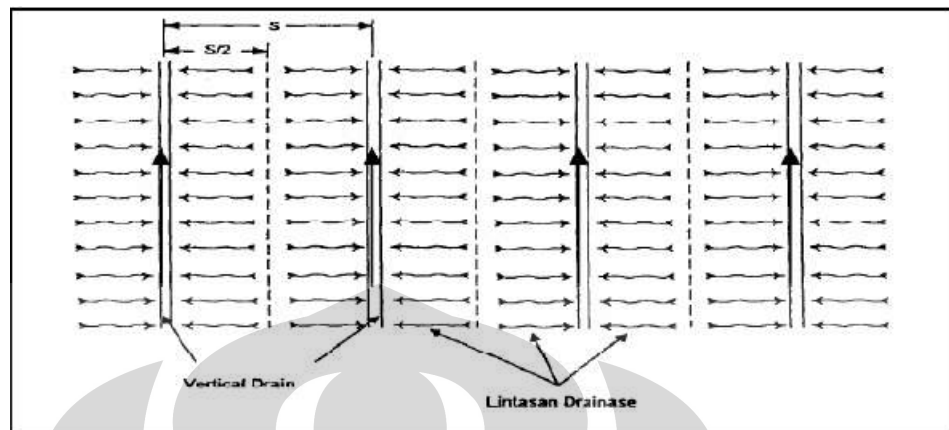
- Nilai permeabilitas dari filter drainase vertikal harus besar, yaitu :

$$k_f \geq 10 k_s \text{ (Chu et al., 2004)}$$

Dimana k_f adalah permeabilitas dari filter drainase vertikal dan k_s adalah permeabilitas tanah.

Tabel 2.7 Ratio Kh/Kv (Federal Highway Federation, 1986)

| | Kh/Kv |
|--|----------|
| No evidence of layering (partially dried clay has completely uniform appearance) | 1.2±0.2 |
| No or only slightly developed macrofabric (e.g. sedimentary clays with discontinuous lenses and layers of more permeable soil) | 1 to 1.5 |
| Slight layering (e.g. sedimentary clays with occasional silt dustings to random silty lenses) | 2 to 5 |
| Fairly well to well developed macrofabric (e.g. sedimentary clays with discontinuous lenses and layers of more permeable material) | 2 to 4 |
| Varved clays in Northeastern US | 10±5 |
| Varved clays and other deposits containing embedded and more or less continuous permeable layers | 3 to 15 |



Gambar 2.20 Pengaruh Panjang dan Jarak Drainase Vertikal Terhadap Waktu Konsolidasi (Fitrianingsih, Eliyana, 2005)

Persamaan diffrensial untuk proses konsolidasi radial diturunkan sebagai berikut:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial u}{r \cdot \partial r} \right) \quad (2.30)$$

Dimana :

u = tegangan air pori rata-rata akibat pembebanan pada sembarang titik

t = waktu setelah tanah mengalami pembebanan

r = jarak radial dari pusat drainase ke titik yang dipertimbangkan

c_h = koefisien konsolidasi horizontal

Sedangkan untuk konsolidasi regangan vertikal sepadan (*equal vertical strain*) dan ideal (tidak terdapat efek *smear* dan tahanan sumur), persamaannya sebagai berikut :

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F(n)}\right) \quad (2.31)$$

Dimana :

$$T_h = \frac{C_h t}{D_e^2} \quad (2.32)$$

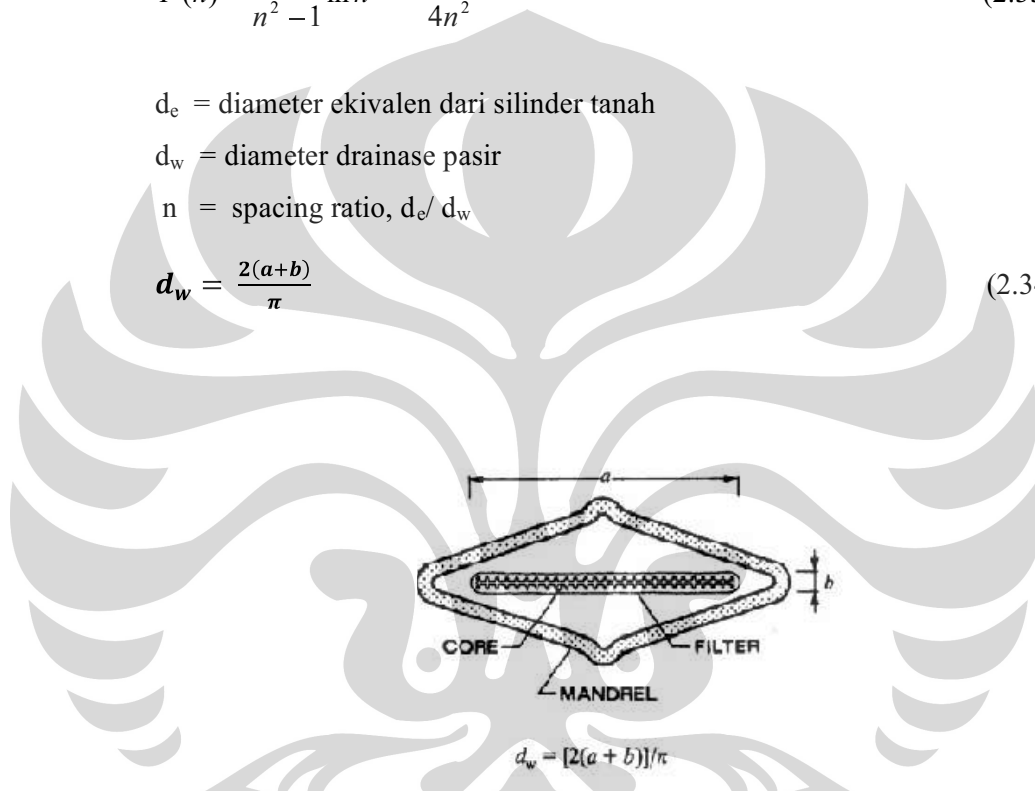
$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln n - \frac{(3n^2 - 1)}{4n^2} \quad (2.33)$$

d_e = diameter ekuivalen dari silinder tanah

d_w = diameter drainase pasir

n = spacing ratio, d_e / d_w

$$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi} \quad (2.34)$$



Gambar 2.21 A Typical Cross-Section of a Band-Shaped Drain (Holtz et al., 1991)

2.7.3 Efek Smear dan Gangguan

Meskipun terdapat banyak variasi dalam pemasangan drainase vertikal, namun selalu terdapat masalah pada pemasangan itu sendiri. Pemasangan drainase vertikal ternyata dapat menimbulkan gangguan pada tanah sekelilingnya. Gangguan ini tergantung pada ukuran dan bentuk mandrel, struktur mikro dari tanah dan prosedur pemasangan. Solusi yang mungkin

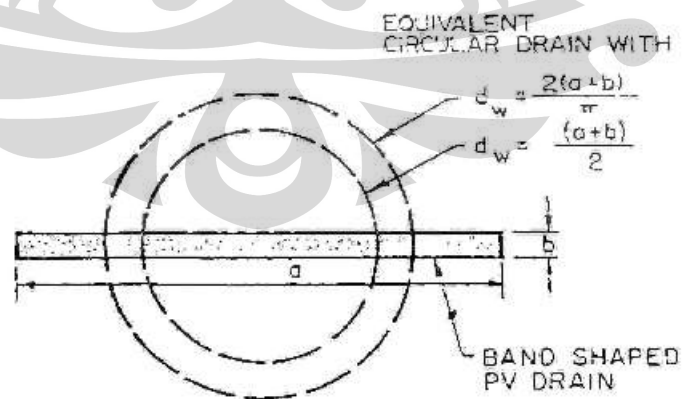
adalah dengan memperkecil luas penampang mandrel, namun dengan demikian kekakuannya harus dipertahankan dan korelasi untuk menentukan besarnya daerah smear adalah:

$$d_s = \frac{(5-6)d_m}{2} \quad (2.35)$$

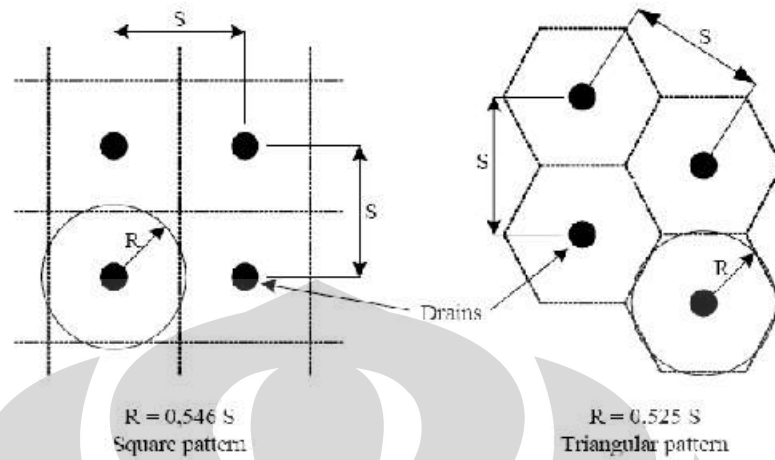
Dimana : d_s = diameter daerah smear
 d_m = luas mandrel

2.7.4 Pemilihan Tipe Drainase Vertikal

Dalam pemilihan tipe drainase vertikal perlu diperhatikan diameter ekivalennya, kapasitas pembuangannya, fleksibilitas dan ketahanannya. Rixner (1986) menyarankan agar diameter ekuivalen yang digunakan kurang dari 50 mm. Kapasitas pembuangan yang umum digunakan adalah sama atau lebih dari 100 m³/tahun. Pemilihan *filter* atau jaket pelindung harus sedemikian rupa sehingga permeabilitas yang besar dapat diperoleh, namun dapat menghindarkan partikel tanah yang kecil yang dapat masuk melewati *filter* tersebut.



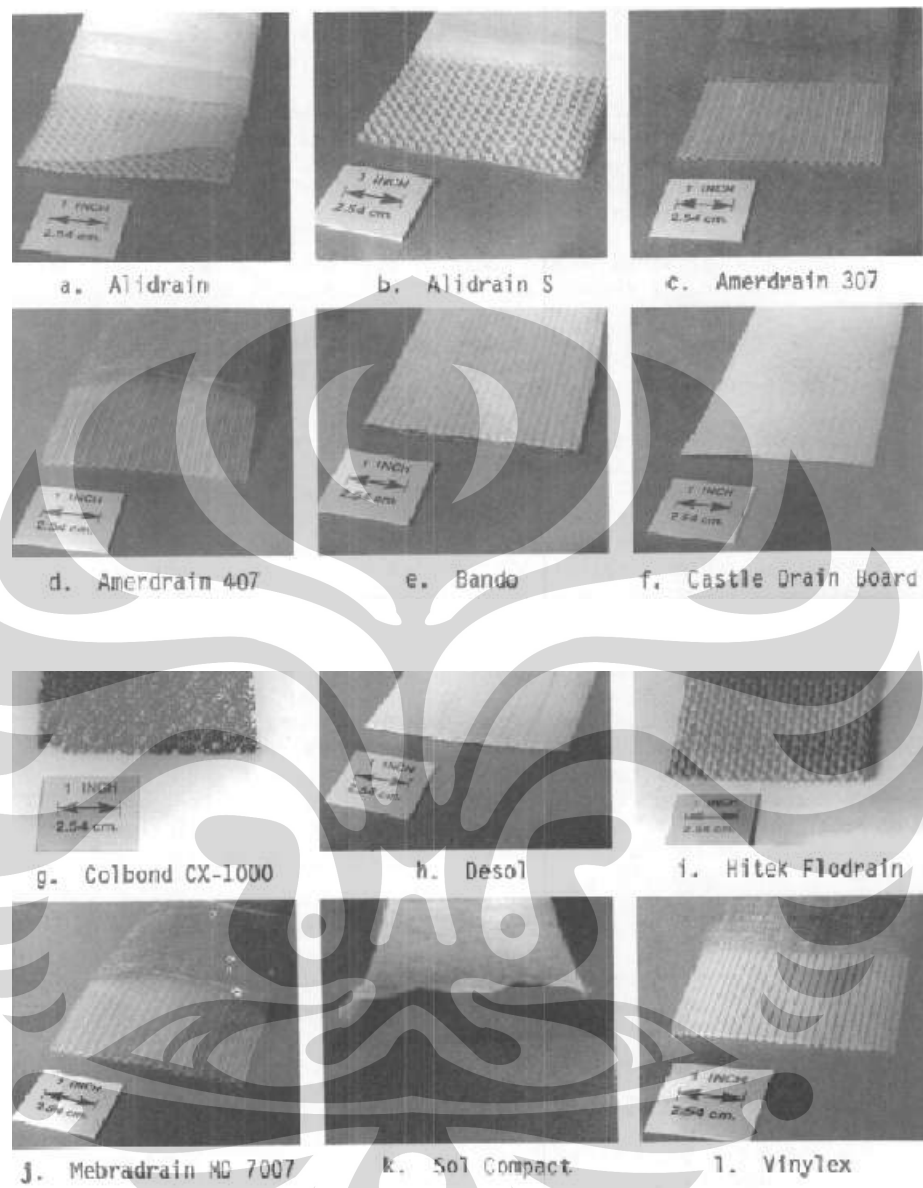
Gambar 2.22 Diameter Ekuivalen Drainase Vertikal (Federal Highway Federation, 1986)



Gambar 2.23 Pola Pemasangan Tipe Drainase Vertikal (Holtz et al., 1991)

Tabel 2.8 Spek Drainase Vertikal Pabrik (Federal Highway Administration, 1986)

| Drain | Core/Jacket | Connection | Polymer | Trade name | Jacket | | Core | |
|------------------|-------------|------------|---------|--------------|----------------|------------------|------|--------------------|
| | | | | | Thickness (mm) | Perforation (mm) | | |
| drain | none | none | P | Chicopee | 3.5 | 3 | PE | studded both sides |
| drain S | none | none | P | Chicopee | 3.5 | 3 | PE | studded one side |
| ndrain 307 | none | bonded | PP | DuPont Typar | 3 | 300 | PP | channels |
| ndrain 407 | none | bonded | PP | DuPont Typar | 4 | 200 | PP | channels |
| do | none | bonded | * | * | * | * | * | channels |
| tile Drain Board | none | bonded | R | * | * | 200 | PO | channels |
| board CX-1000 | none | none | P | Colbend | 5.8 | 1,000 | P | filaments |
| al | none | none | - | No Jacket | - | - | PO | channels |
| ek Floodrain | none | none | PP | DuPont Typar | 4 | 200 | PE | dimpled channels |
| ndrain MD7007 | none | none | PP | DuPont Typar | 4 | 500 | PP | channels |
| Compact | none | none | * | DuPont Typar | * | * | * | channels |
| yltex | none | none | PP | or Bidim | 4 | 200 | PE | continuous ribs |



Gambar 2.24 Produk Tipikal Prefabricated Vertical Drain (Federal Highway Administration, 1986)

2.7.5 Pemasangan (*Installation*)

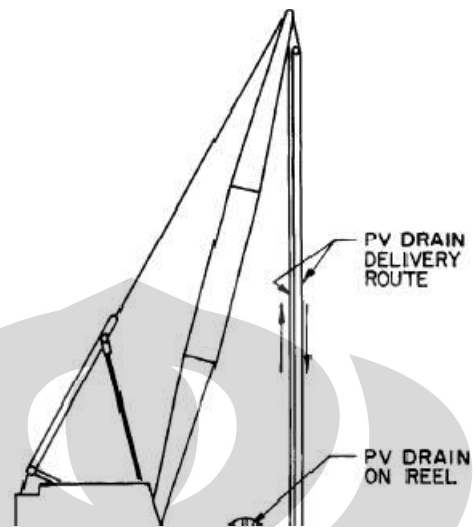
Drainase vertikal dipasang pada lapisan tanah lunak dengan menggunakan mandrel (selongsong baja dengan penampang tubular). Mandrel tersebut

Universitas Indonesia

dipasang pada alat pengarah atau *leader* pada suatu *crane*. Drainase vertikal yang berada di dalam mandrel kemudian ditanamkan ke lapisan lunak sampai kedalaman tanah keras. Ujung dari drainase vertikal kemudian dijepit pada lapisan tanah keras dan mandrel kemudian diangkat ke permukaan lapisan tanah dengan meninggalkan drainase vertikal pada lapisan tanah lunak.

Pertimbangan – pertimbangan yang diperhatikan dalam instalasi alat drainase vertikal adalah :

- Pemilihan tipe rig drainase vertikal (Bo et al., 2003) :
 - ✓ *Static rig* : kondisi tanah normal
 - ✓ *Static rig with water balancing system* : tanah sangat lunak
 - ✓ *Vibratory rig* : tanah kaku
- Faktor – faktor dalam penentuan rig drainase vertikal :
 - ✓ Daya dukung dari Platform
 - ✓ Kedalaman pemasangan
 - ✓ Jenis tanah
 - ✓ Kapasitas produksi dari rig



Gambar 2.25 Rig Drainase Vertikal

Gambar 2.26 Urutan Pemasangan Drainase Vertikal

2.8 METODE ELEMEN HINGGA

Metode Elemen Hingga merupakan cara numerik dalam menyelesaikan masalah dalam ilmu rekayasa dan matematika fisik. Cakupan penyelesaian dari kedua masalah ini berupa analisis struktur, transfer panas, aliran fluida, transportasi massa, dan potensial elektromagnetik.

Solusi persamaan elastik benda pejal bagi geometri yang rumit pembebanan, dan sifat material tertentu, umumnya tidak mungkin diperoleh dengan penyelesaian analisis matematik dari persamaan diferensial penentunya. Penyelesaian analitik yang diperoleh menetapkan parameter yang dicari bagi sistem struktur dari persamaan diferensial penentu sangat terbatas pada kondisi tertentu beban, geometri, dan sifat bahan. Dengan demikian, salah satu cara numerik (metode elemen hingga) merupakan solusi yang digunakan untuk memperoleh penyelesaian bagi sistem dengan geometri, beban, dan material yang kompleks.

Formulasi Metode Elemen Hingga dari kajian sistem adalah persamaan simultan aljabar, yang berbeda dengan penyelesaian persamaan diferensial penentu. Cara numeric ini memberikan nilai pendekatan dari parameter yang tidak diketahui di sejumlah titik – titik nodal di sistem diskrit struktur. Dengan demikian, proses pemodelan sistem struktur dari sistem yang ekuivalen unit badan bebas atau unit elemen hingga yang disambung pada titik – titik nodal disebut diskretisasi.

Berbeda dengan penyelesaian seluruh sistem struktur pada solusi persamaan diferensial, metode elemen hingga menjabarkan persamaan untuk setiap elemen hingga, yang kemudian dirakit dalam sistem struktur guna diperoleh solusi sistem struktur.

BAB 3

METODE ANALISIS PLAXIS

3.1 PENDAHULUAN

Analisis studi kasus pada tugas akhir ini menggunakan software PLAXIS 7.2. PLAXIS adalah program elemen hingga (*finite element*) untuk aplikasi geoteknik dimana permodelan tanah digunakan untuk melakukan simulasi terhadap perilaku tanah. Program ini dapat menganalisis untuk perhitungan kondisi *plane-strain* maupun *axisymmetric*. *Plane-strain* digunakan untuk menganalisis struktur yang memiliki potongan melintang dengan pembebanan dan kondisi tegangan yang seragam, dan perpindahan/deformasi pada arah ini dianggap nol. Sedangkan *axisymmetric* digunakan untuk analisis struktur lingkaran (*circular structures*) yang memiliki potongan radial dan pembebanan seragam terhadap pusat, dengan deformasi dan tegangan yang dianggap sama pada arah radialnya.

Walaupun program PLAXIS dan model – model tanah di dalamnya telah dikembangkan dengan seksama serta telah banyak dilakukan pengujian dan validasi, tapi tetap tidak dapat dijamin bahwa program PLAXIS adalah bebas dari kesalahan. Simulasi permasalahan geoteknik dengan menggunakan metode elemen hingga sendiri telah secara implisit melibatkan kesalahan permodelan dan kesalahan numerik yang tidak dapat dihindarkan. Akurasi dari keadaan sebenarnya diperkirakan sangat bergantung pada keahlian dari pengguna terhadap permodelan permasalahan, pemahaman, terhadap model – model tanah serta keterbatasannya, penentuan parameter – parameter model, dan kemampuan untuk melakukan interpretasi dari hasil komputasi.

3.2 PROGRAM PLAXIS SECARA UMUM

3.2.1 Beberapa Tampilan Dalam PLAXIS

Ringkasan mengenai beberapa tampilan dalam PLAXIS yang digunakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

Pembuatan model geometri secara grafis : Masukan berupa pelapisan tanah, elemen-elemen struktur, tahapan konstruksi, pembebanan serta kondisi-kondisi batas dilakukan dengan menggunakan prosedur grafis yang mudah dengan bantuan komputer, yang memungkinkan pembuatan model geometri berupa penampang melintang yang mendetil. Dari model geometri ini jaring elemen hingga 2D dapat dengan mudah dibentuk.

Pembentukan jaring elemen secara otomatis/mesh : PLAXIS secara otomatis akan membentuk jaring elemen hingga 2D yang acak dengan pilihan untuk memperhalus jaring elemen secara global maupun lokal. Program penyusun jaring elemen hingga 2D merupakan versi khusus dari program Triangle yang dikembangkan oleh Sepral.

Elemen ordo tinggi : Tersedia elemen segitiga kuadratik dengan 6 buah titik nodal dan elemen segitiga ordo keempat dengan 15 buah titik nodal untuk memodelkan deformasi dan kondisi tegangan dalam tanah.

Model Mohr-Coulomb : Model yang sederhana namun handal ini didasarkan pada parameter-parameter tanah yang telah dikenal baik dalam praktek rekayasa teknik sipil. Walaupun demikian, tidak semua fitur non-linier tercakup dalam model ini. Model Mohr- Coulomb dapat digunakan untuk menghitung tegangan pendukung yang realistis pada muka terowongan, beban ultimit pada pondasi dan lain-

lain. Model ini juga dapat digunakan untuk menghitung faktor keamanan dengan menggunakan pendekatan '*Reduksi phi-c*'.

Pemodelan tanah tingkat lanjut : Disamping model Mohr-Coulomb, PLAXIS menawarkan berbagai pemodelan tanah yang lebih maju. Tersedia sebuah model ordo kedua yang umum, yaitu model elastoplastis dari model hiperbolik, yang disebut sebagai 'model *Hardening Soil*'. Untuk dapat memodelkan dengan akurat perilaku yang tergantung waktu serta perilaku kompresi logaritmik dari tanah-tanah lunak yang terkonsolidasi normal, sebuah model yang dapat menganalisis perilaku rangkak atau *creep* dari tanah tersedia dalam program ini, yaitu 'model *Soft Soil Creep*'. Selain modelmodel ini, sebuah model khusus juga tersedia untuk dapat melakukan analisis perilaku anisotropis dari batuan yang mempunyai kekar atau *joint*. Pembahasan yang lebih dalam mengenai model-model ini diberikan dalam Modul Model Material.

Tekanan air pori hidrostatik : Distribusi tekanan air pori yang kompleks dapat dihitung berdasarkan elevasi dari garis freatik atau masukan langsung berupa nilai-nilai tekanan air. Sebagai alternatif, perhitungan aliran air laminer dalam tanah dapat dilakukan untuk memperoleh distribusi tekanan air pori pada masalah-masalah aliran laminer atau rembesan.

Tekanan air pori berlebih (ekses) : PLAXIS membedakan antara tanah yang bersifat *Drained (drained)* dan tak *Drained (Undrained)* untuk memodelkan tanah pasiran yang permeabel serta tanah lempungan yang hampir bersifat impermeabel atau kedap air. Tekanan air pori akan dihitung dalam proses perhitungan plastis saat suatu lapisan tanah yang tak *Drained* menerima pembebanan. Kondisi pembebanan tak *Drained (Undrained)* seringkali menjadi penentu dalam stabilitas struktur-struktur geoteknik.

Peningkatan beban otomatis : Program PLAXIS dapat dipilih untuk dijalankan pada modus ukuran rentang beban otomatis maupun pada ukuran rentang waktu otomatis. Hal ini menghindarkan pengguna untuk memilih peningkatan beban yang cocok untuk perhitungan plastis dan menjamin proses perhitungan yang efisien dan handal.

Pengaturan panjang busur : Fitur ini memungkinkan suatu perhitungan yang akurat dari beban runtuh dan mekanisme keruntuhan dapat dilakukan. Dalam perhitungan beban terkontrol konvensional, prosedur iterasi akan menjadi divergen saat beban ditingkatkan melebihi beban puncak. Dengan pengaturan panjang busur, beban yang diberikan tidak diaplikasikan seluruhnya, tetapi diterapkan dengan skala yang lebih rendah untuk dapat menghitung beban puncak maupun beban residual.

Tahapan konstruksi : Fitur yang sangat berguna dalam PLAXIS ini memungkinkan simulasi yang realistis dari suatu proses konstruksi ataupun penggalian, yaitu dengan cara mengaktifkan atau menonaktifkan elemen klaster atau beban, mengubah elevasi muka air, dan sebagainya. Prosedur ini memungkinkan prediksi tegangan dan deformasi yang terjadi dengan realistis, misalnya pada saat penggalian tanah dalam suatu konstruksi bawah tanah.

Analisis konsolidasi : Semakin berkurangnya tekanan air pori eksek terhadap waktu dapat dihitung dengan menggunakan sebuah analisis konsolidasi. Suatu perhitungan konsolidasi membutuhkan masukan berupa koefisien permeabilitas tanah untuk tiap lapisan tanah. Penggunaan prosedur peningkatan langkah waktu secara otomatis akan membuat analisis menjadi mudah dilakukan namun tetap handal.

Faktor keamanan : Faktor keamanan umumnya didefinisikan sebagai perbandingan dari beban runtuh terhadap beban kerja. Definisi ini tepat untuk pondasi, tetapi tidak tepat untuk turap

Universitas Indonesia

maupun timbunan. Untuk struktur-struktur semacam ini, akan lebih tepat untuk menggunakan definisi faktor keamanan dalam mekanika tanah, yaitu perbandingan antara kuat geser yang tersedia terhadap kuat geser yang dibutuhkan untuk mencapai ekuilibrium. PLAXIS dapat digunakan untuk menghitung faktor keamanan ini dengan menggunakan prosedur '*Reduksi phi-c*'.

Analisis Lagrange yang diperbaharui : Dengan menggunakan pilihan ini, jarring elemen hingga akan selalu diperbaharui selama proses perhitungan. Pada kondisi-kondisi tertentu, analisis konvensional berdasarkan regangan yang kecil akan menghasilkan perubahan yang signifikan pada geometri dari model. Untuk kondisi-kondisi seperti ini, disarankan untuk melakukan perhitungan yang lebih akurat dengan analisis Lagrange yang diperbaharui, yang disebut sebagai *Jaring elemen yang diperbaharui* dalam PLAXIS. Pilihan ini tersedia untuk semua jenis perhitungan.

Tampilan dari keluaran : Program PLAXIS memiliki fitur-fitur grafis yang sangat baik untuk menampilkan hasil-hasil dari perhitungan. Nilai-nilai perpindahan, tegangan, regangan dan gaya-gaya dalam dari elemen struktural dapat diperoleh dari table keluaran. Keluaran berbentuk grafis maupun tabel dapat langsung dicetak, disimpan ke media penyimpanan ataupun ke langsung ke dalam memori *clipboard* dari Windows untuk dapat digunakan dalam perangkat lunak lain.

Lintasan tegangan : Sebuah pilihan khusus tersedia untuk menggambarkan kurva beban terhadap perpindahan, lintasan tegangan atau jalur tegangan, lintasan regangan, kurva tegangan-regangan serta kurva penurunan terhadap waktu. Visualisasi dari lintasan tegangan akan memberikan informasi yang berharga terhadap perilaku tanah secara local dan memungkinkan analisis yang mendetil terhadap hasil dari perhitungan dengan PLAXIS.

Universitas Indonesia

3.3 MODEL MATERIAL

3.3.1 Analisis *Undrained* dengan Parameter Efektif

Dalam PLAXIS, perilaku tak *Drained* dapat dilakukan dalam suatu analisis tegangan efektif dengan menggunakan parameter efektif dari model. Hal ini dapat dicapai dengan mengatur jenis perilaku material (*Material Type*) dari lapisan tanah menjadi *Undrained*.

Adanya tekanan air pori dalam massa tanah, umumnya diakibatkan oleh air, ikut menentukan besarnya tegangan total. Menurut prinsip Terzaghi, tegangan total s dapat dibedakan menjadi tegangan efektif s' dan tekanan air pori, s_w . Walaupun demikian air dianggap tidak dapat menerima tegangan geser, sehingga tegangan geser efektif akan sama dengan tegangan geser total :

$$s_{xx} = s'_{xx} + s_w \quad (3.1)$$

$$s_{yy} = s'_{yy} + s_w \quad (3.2)$$

$$s_{zz} = s'_{zz} + s_w \quad (3.3)$$

$$s_{xy} = s'_{xy} \quad (3.4)$$

$$s_{yz} = s'_{yz} \quad (3.5)$$

$$s_{zx} = s'_{zx} \quad (3.6)$$

Perhatikan bahwa serupa dengan komponen tegangan total dan efektif, s_w dianggap bernilai negatif untuk tegangan tekan.

Pembedaan lebih jauh adalah antara tekanan air pori hidrostatik atau tekanan air pori dalam kondisi stabil, p_{steady} , dan tekanan air pori eksess, p_{excess} :

$$s_w = p_{steady} + p_{excess} \quad (3.7)$$

Tekanan air pori dalam kondisi stabil dianggap sebagai data masukan, yaitu dibentuk berdasarkan garis freatik atau aliran air dalam tanah.

Tekanan air pori eksess dibentuk dalam perhitungan plastis untuk kasus perilaku material yang tak *Drained*. Perilaku material yang tak *Drained* dan perhitungan tekanan air pori eksess yang bersangkutan dijelaskan berikut ini.

Karena turunan waktu dari komponen dalam kondisi stabil adalah nol, maka :

$$\dot{\sigma}_w = \dot{p}_{excess}$$

Hukum Hooke dapat dibalik (invers) untuk memperoleh :

$$\begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_{xx}^e \\ \dot{\varepsilon}_{yy}^e \\ \dot{\varepsilon}_{zz}^e \\ \dot{\gamma}_{xy}^e \\ \dot{\gamma}_{yz}^e \\ \dot{\gamma}_{zx}^e \end{bmatrix} = \frac{1}{E'} \begin{bmatrix} 1 & -\nu' & -\nu' & 0 & 0 & 0 \\ -\nu' & 1 & -\nu' & 0 & 0 & 0 \\ -\nu' & -\nu' & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 + 2\nu' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 + 2\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 + 2\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\sigma}'_{xx} \\ \dot{\sigma}'_{yy} \\ \dot{\sigma}'_{zz} \\ \dot{\sigma}'_{xy} \\ \dot{\sigma}'_{yz} \\ \dot{\sigma}'_{zx} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Dengan memasukkan persamaan pertama akan didapat :

$$\begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_{xx}^e \\ \dot{\varepsilon}_{yy}^e \\ \dot{\varepsilon}_{zz}^e \\ \dot{\gamma}_{xy}^e \\ \dot{\gamma}_{yz}^e \\ \dot{\gamma}_{zx}^e \end{bmatrix} = \frac{1}{E'} \begin{bmatrix} 1 & -\nu' & -\nu' & 0 & 0 & 0 \\ -\nu' & 1 & -\nu' & 0 & 0 & 0 \\ -\nu' & -\nu' & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 + 2\nu' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 + 2\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 + 2\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\sigma}'_{xx} - \dot{\sigma}_w \\ \dot{\sigma}'_{yy} - \dot{\sigma}_w \\ \dot{\sigma}'_{zz} - \dot{\sigma}_w \\ \dot{\sigma}'_{xy} \\ \dot{\sigma}'_{yz} \\ \dot{\sigma}'_{zx} \end{bmatrix}$$

Dengan menganggap bahwa air dapat sedikit terkompresi, maka perubahan tekanan air pori dapat dinyatakan sebagai :

$$\dot{\sigma}_w = \frac{K_w}{n} \cdot (\dot{\varepsilon}_{xx}^e + \dot{\varepsilon}_{yy}^e + \dot{\varepsilon}_{zz}^e) \quad (3.9)$$

dimana K_w adalah modulus bulk dari air dan n adalah porositas tanah.

Bentuk invers dari hukum Hooke dapat dituliskan dalam kondisi perubahan tegangan total dan parameter tak *Drained* E_u dan ν_u :

$$\begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_{xx}^e \\ \dot{\epsilon}_{yy}^e \\ \dot{\epsilon}_{zz}^e \\ \dot{\gamma}_{xy}^e \\ \dot{\gamma}_{yz}^e \\ \dot{\gamma}_{zx}^e \end{bmatrix} = \frac{1}{E_u} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\nu_u & -\nu_u & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_u & 1 & -\nu_u & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_u & -\nu_u & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 + 2 \cdot \nu_u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 + 2 \cdot \nu_u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 + 2 \cdot \nu_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\sigma}'_{xx} \\ \dot{\sigma}'_{yy} \\ \dot{\sigma}'_{zz} \\ \dot{\sigma}'_{xy} \\ \dot{\sigma}'_{yz} \\ \dot{\sigma}'_{zx} \end{bmatrix}$$

dimana :

$$E_u = 2 \cdot G \cdot (1 + \nu_u) \quad (3.10)$$

$$\nu_u = \frac{\nu' + \mu \cdot (1 + \nu')}{1 + 2 \cdot \mu \cdot (1 + \nu')} \quad (3.11)$$

$$\mu = \frac{1}{3 \cdot n} \cdot \frac{K_w}{K'}$$

$$K' = \frac{E'}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu')}$$

Karena itu, pilihan khusus untuk perilaku tak *Drained* dalam PLAXIS adalah sedemikian rupa sehingga parameter G dan ν diubah menjadi E_u dan ν_u . Perhatikan bahwa indeks u digunakan untuk menunjukkan sifat parameter untuk tanah yang *Undrained*. Parameter E_u dan ν_u berbeda dengan parameter E_{ur} dan ν_{ur} yang digunakan untuk menyatakan pengurangan beban dan pembebanan kembali.

Perilaku yang sama sekali tidak kompresibel diperoleh dengan menggunakan $\nu_u = 0.5$. Namun penggunaan $\nu_u = 0.5$ akan menghasilkan matriks kekakuan yang singular. Pada kenyataannya, air memiliki kompresibilitas yang sangat rendah, tetapi nilai modulus bulk yang realistis dari air adalah sangat besar. Untuk menghindari masalah numerik yang diakibatkan oleh kompresibilitas yang sangat rendah, secara pra-pilih nilai ν_u ditentukan sebesar 0.495, yang mengakibatkan massa tanah yang *Undrained* bersifat sedikit kompresibel. Untuk memperoleh hasil perhitungan yang realistis, modulus bulk dari air harus tinggi dibandingkan dengan modulus bulk dari butiran tanah, yaitu agar $K_w \gg n \cdot K'$. Kondisi ini dapat dipastikan tercapai dengan menggunakan nilai $\nu' = 0.35$. Peringatan

akan muncul jika rasio Poisson > 0.35 digunakan pada material dengan perilaku yang *Undrained*.

Dengan demikian, modulus bulk dari air akan secara otomatis ditambahkan pada matriks kekakuan dari tanah untuk perilaku material yang tak *Drained*. Nilai modulus bulk adalah sebesar :

$$\frac{K_w}{n} = \frac{3.(v_u - v')}{(1 - 2.v_u).(1 + v')} \cdot K' = 300 \cdot \frac{0.495 - v'}{1 + v'} \cdot K' > 30 \cdot K' \quad (3.12)$$

setidaknya untuk $v' = 0.35$. Untuk retrospeksi, cukup berharga untuk melakukan tinjauan ulang terhadap nilai-B dari Skempton.

Nilai-B Skempton :

Saat *Material Type* (jenis dari perilaku material) diatur ke *Undrained*, PLAXIS secara otomatis mengasumsikan sebuah modulus bulk *Undrained* secara implisit, K_u , untuk tanah secara keseluruhan (butiran tanah + air) dan membedakan antara tegangan total, tegangan efektif, dan tekanan air pori eksese :

$$\text{Tegangan total} \quad : \Delta p = K_u \cdot \Delta \varepsilon_v \quad (3.13)$$

$$\text{Tegangan efektif} \quad : \Delta p' = (1 - B) \cdot \Delta p = K' \cdot \Delta \varepsilon_v \quad (3.14)$$

$$\text{Tekanan air pori eksese} \quad : \Delta p_w = B \cdot \Delta p = \frac{K_w}{n} \cdot \Delta \varepsilon_v \quad (3.15)$$

Perhatikan bahwa parameter efektif dari model harus dimasukkan dalam set data material, yaitu E' , v' , c' , f' dan bukan E_u , v_u , c_u (s_u), f_u . Modulus bulk *Undrained* secara otomatis dihitung oleh PLAXIS dengan menggunakan hukum elastisitas Hooke :

$$K_u = \frac{2.G.(1 + v_u)}{3.(1 - 2.v_u)} \quad (3.16)$$

dimana :

$$G = \frac{E'}{2.(1+\nu')} \quad (3.17)$$

dan $\nu_u = 0.495$

(saat menggunakan Pengaturan standar) atau

$$\nu_u = \frac{3.\nu' + B.(1-2.\nu')}{3-B.(1-2.\nu')} \quad (3.18)$$

(saat menggunakan Pengaturan manual)

Nilai dari rasio Poisson *Undrained*, ν_u , menyatakan suatu hubungan dengan kekakuan bulk dari air pori, $K_{w,ref} / n$:

$$\frac{K_{w,ref}}{n} = K_u - K' \quad (3.19)$$

dimana,

$$K' = \frac{E'}{3.(1-2.\nu')}$$

Nilai $K_{w,ref} / n$ ini umumnya sangat kecil jika dibandingkan dengan kekakuan bulk yang sesungguhnya dari air, $K_w 0 (= 2 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2)$.

Jika nilai-*B* dari Skempton tidak diketahui, namun derajat kejenuhan, *S*, dan porositas tanah, *n*, diketahui, maka nilai kekakuan bulk dari air pori dan diperkirakan dari :

$$\frac{K_w}{n} = \frac{K_w^0 \cdot K_{air}}{S \cdot K_{air} + (1-S) \cdot K_w^0} \cdot \frac{1}{n} \quad (3.20)$$

dimana :

$$K' = \frac{E'}{3.(1-2.\nu')}$$

dimana $K_{air} = 200 \text{ kN/m}^2$ (kekakuan udara atau "air") untuk udara pada kondisi di bawah tekanan atmosfer. Nilai-*B* dari Skempton sekarang dapat dihitung dari rasio kekakuan bulk butiran tanah dan air pori :

$$B = \frac{1}{1 + \left(\frac{n \cdot K'}{K_w}\right)} \quad (3.21)$$

Perubahan tekanan air pori eksese dihitung dari perubahan regangan volumetrik (yang kecil) menurut :

$$\dot{\sigma}_w = \frac{K_w}{n} \cdot \dot{\epsilon}_v \quad (3.22)$$

Jenis elemen yang digunakan dalam PLAXIS telah mencukupi untuk menghindari terjadinya efek terkuncinya jaring elemen (*mesh locking effect*) untuk material yang hampir tidak kompresibel.

Pilihan khusus untuk memodelkan perilaku material *Undrained* yang didasarkan pada parameter efektif dari model ini tersedia untuk seluruh model material dalam program PLAXIS. Dengan pilihan ini maka perhitungan *Undrained* dapat dilakukan dengan menggunakan masukan berupa parameter efektif, dengan perbedaan secara eksplisit antara tegangan efektif dan tekanan air pori eksese.

Analisis seperti ini memerlukan parameter efektif dari tanah sehingga akan sangat baik dan tepat jika parameter efektif tersebut tersedia. Untuk proyek tanah lunak, data berupa parameter efektif yang akurat tidak selalu tersedia, tetapi uji *in situ* atau uji laboratorium mungkin telah dilakukan untuk memperoleh parameter tanah yang *Undrained*. Dalam situasi seperti ini maka modulus Young *Undrained* yang terukur dapat dengan mudah dikonversikan menjadi modulus Young *Drained* dengan :

$$E' = \frac{2 \cdot (1 + \nu')}{3} \cdot E_u \quad (3.24)$$

Namun demikian, kuat geser *Undrained* tidak dapat dengan mudah digunakan untuk menentukan parameter kuat geser efektif f' dan c' . Untuk proyek semacam ini PLAXIS menawarkan kemungkinan untuk melakukan analisis *Undrained* dengan masukan berupa parameter kuat geser *Undrained* (c_u atau s_u) dan $f = f_u = 0^\circ$.

Universitas Indonesia

ini hanya tersedia untuk model Mohr-Coulomb dan model *Hardening Soil*, tetapi tidak tersedia untuk model *Soft Soil (Creep)*. Perhatikan bahwa saat *Material Type* diatur ke *Undrained*, maka nilai-nilai efektiflah yang harus dimasukkan untuk parameter elastisitas E dan ν .

3.3.2 Analisis *Undrained* dengan Parameter Total

Jika untuk suatu alasan tertentu diinginkan untuk menggunakan pilihan *Undrained* dalam PLAXIS untuk melakukan suatu analisis yang *Undrained*, dapat digunakan pilihan *Non-Porous* dan secara langsung memasukkan parameter – parameter elastisitas *Undrained* $E = E_u$ dan $\nu = \nu_u = 0.495$ serta parameter kuat geser *Undrained* $c = c_u$ dan $f = f_u$

$u = 0^\circ$. Dalam kasus ini analisis tegangan total dilakukan tanpa membedakan tegangan efektif dengan tekanan air pori. Karena itu, seluruh keluaran yang dinyatakan sebagai tegangan efektif harus diinterpretasikan sebagai tegangan total dan seluruh tekanan air adalah nol. Dalam keluaran grafis untuk tegangan, tegangan dalam klaster yang *Non-Porous* tidak akan ditampilkan. Jika kondisi tegangan ingin ditampilkan, maka jenis material yang harus dipilih adalah *Drained* dan bukan *Non-Porous*, serta pastikan tidak ada tekanan air pori yang terbentuk dalam klaster-klaster ini. Perhatikan bahwa pendekatan ini tidak dapat dilakukan saat menggunakan model *Soft Soil Creep*. Secara umum, analisis tegangan efektif dengan menggunakan pilihan *Undrained* di dalam PLAXIS untuk memodelkan perilaku *Undrained* lebih baik dibandingkan dengan analisis tegangan total.

3.4 TEORI KONSOLIDASI PADA PLAXIS

3.4.1 Persamaan Dasar Konsolidasi Pada PLAXIS

Persamaan pengatur (*governing equation*) dari konsolidasi yang digunakan dalam PLAXIS mengikuti teori Biot (Biot, 1956). Hukum Darcy untuk aliran fluida dan perilaku elastis dari butiran tanah juga digunakan dalam asumsi. Formulasi didasarkan pada teori regangan kecil. Menurut prinsip dari Terzaghi, tegangan dibedakan menjadi tegangan efektif dan tekanan air pori :

$$\underline{\sigma} = \underline{\sigma}' + \underline{m} \cdot (P_{steady} + P_{excess})$$

dimana :

$$\underline{\sigma} = (\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{zz} \quad \sigma_{xy} \quad \sigma_{yz} \quad \sigma_{zx})^T \text{ dan}$$

$$\underline{m} = (1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T$$

$\underline{\sigma}$ adalah vektor tegangan total, $\underline{\sigma}'$ memuat tegangan efektif, P_{excess} adalah tekanan air pori eksese dan \underline{m} adalah vektor yang berisi nilai satu untuk komponen tegangan normal dan nol untuk komponen tegangan geser. Solusi laminer (*steady state solution*) pada akhir dari proses konsolidasi dinotasikan sebagai P_{steady} . Di dalam PLAXIS, P_{steady} didefinisikan sebagai:

$$P_{steady} = SM_{weight} \cdot P_{input} \quad (3.24)$$

dimana P_{input} adalah tekanan air pori yang dihitung dalam program masukan berdasarkan garis freatik atau berdasarkan perhitungan aliran air tanah. Perhatikan bahwa di dalam PLAXIS tegangan yang bersifat kompresif atau tekan dianggap negatif, dan berlaku juga terhadap tegangan efektif maupun tekanan air pori. Pada kenyataannya, akan lebih tepat untuk menggolongkan P_{excess} dan P_{steady} sebagai tegangan pori daripada tekanan. Namun demikian, istilah tekanan air pori tetap digunakan, walaupun akan mempunyai

Universitas Indonesia

nilai positif untuk tegangan tarik. Persamaan konstitutif dituliskan dalam bentuk peningkatan. Dengan menotasikan peningkatan tegangan efektif sebagai s' dan peningkatan regangan sebagai e , maka persamaan konstitutif adalah :

$$\underline{\sigma}' = \underline{M} \cdot \underline{\epsilon} \quad (3.25)$$

dimana $\underline{\epsilon} = (\epsilon_{xx} \ \epsilon_{yy} \ \epsilon_{zz} \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx})^T$ dan M menyatakan matriks kekakuan material.

3.4.2 Konsolidasi Elastoplastis Pada PLAXIS

Pada umumnya, saat model material yang non-linier digunakan, diperlukan iterasi untuk mendapatkan solusi yang benar. Akibat terjadinya plastisitas atau perilaku kekakuan yang bergantung pada tegangan, persamaan ekuilibrium tidak perlu dipenuhi dengan menggunakan teknik yang dijelaskan sebelumnya. Karena itu, persamaan ekuilibrium diperiksa disini. Persamaan ekuilibrium tidak digunakan, melainkan dituliskan dalam bentuk sub-peningkatan (*sub-incremental form*) berikut :

$$\underline{K} \cdot \delta \underline{v} + \underline{L} \cdot \underline{p}_n = \underline{r}_n \quad (3.26)$$

dimana r_n adalah vektor gaya residual. Peningkatan perpindahan total v adalah bentuk akhir dari sub-peningkatan dv dari seluruh iterasi dalam langkah saat ini :

$$r_n = \int \underline{N}^T \underline{f} dV + \int \underline{N}^T \underline{t} dS - \int \underline{B}^T \underline{\sigma} dV \quad (3.27)$$

dengan :

$$\underline{f} = \underline{f}_0 + \Delta \underline{f}$$

$$\text{dan: } \underline{t} = \underline{t}_0 + \Delta \underline{t}$$

Dalam integrasi pertama dianggap bahwa $s = s_0$, yaitu tegangan pada awal mulainya suatu langkah. Iterasi selanjutnya digunakan berdasarkan tegangan saat ini yang dihitung dari model konstitutif yang digunakan.

3.5 MODEL MOHR COULOMB PADA PLAXIS

Model Mohr-Coulomb adalah model elastis-plastis yang terdiri dari lima buah parameter, yaitu E dan ν untuk memodelkan elastisitas tanah; f dan c untuk memodelkan plastisitas tanah dan ϕ sebagai sudut dilatasi. Model Mohr-Coulomb merupakan suatu pendekatan "ordo pertama" dari perilaku tanah atau batuan. Model ini disarankan untuk digunakan dalam analisis awal dari masalah yang dihadapi. Setiap lapisan dengan model ini akan mempunyai sebuah nilai kekakuan rata-rata yang konstan. Karena kekakuan yang konstan, maka perhitungan cenderung cepat dan dapat diperoleh bentuk deformasi dari model. Disamping kelima parameter dari model tersebut, kondisi tegangan awal dari tanah memegang peranan yang penting dalam hampir seluruh masalah deformasi tanah. Tegangan horisontal awal tanah harus dibentuk terlebih dahulu dengan menentukan nilai K_0 yang tepat.

Plastisitas dihubungkan dengan terbentuknya regangan yang tidak dapat kembali seperti semula. Untuk mengevaluasi apakah telah terjadi plastisitas terjadi dalam perhitungan, sebuah fungsi leleh (*yield function*), f , dinyatakan sebagai fungsi dari tegangan dan regangan. Sebuah fungsi leleh umumnya dapat dinyatakan sebagai suatu bidang dalam ruang tegangan utama. Sebuah model plastis-sempurna merupakan suatu model konstitutif dengan bidang leleh tertentu, yaitu bidang leleh yang sepenuhnya didefinisikan oleh parameter model dan tidak dipengaruhi oleh peregangan (plastis).

Untuk kondisi tegangan yang dinyatakan oleh titik-titik yang berada di bawah bidang leleh, perilaku dari titik-titik tersebut akan sepenuhnya elastis dan seluruh regangan dapat kembali seperti semula.

3.5.1 Perilaku Elastis Plastis-Sempurna Pada PLAXIS

Prinsip dasar dari model elastis-plastis adalah bahwa regangan dan perubahan regangan dibedakan menjadi bagian yang elastis dan bagian yang plastis :

$$\begin{aligned}\underline{\varepsilon} &= \underline{\varepsilon}^e + \underline{\varepsilon}^p \\ \underline{\dot{\varepsilon}} &= \underline{\dot{\varepsilon}}^e + \underline{\dot{\varepsilon}}^p\end{aligned}\quad (3.28)$$

Hukum Hooke digunakan untuk menghubungkan perubahan tegangan dan perubahan regangan elastis. Substitusi menghasilkan :

$$\underline{\dot{\sigma}}' = \underline{D}^e \cdot \underline{\dot{\varepsilon}}^e = \underline{D}^e \cdot (\underline{\dot{\varepsilon}} - \underline{\dot{\varepsilon}}^p)$$

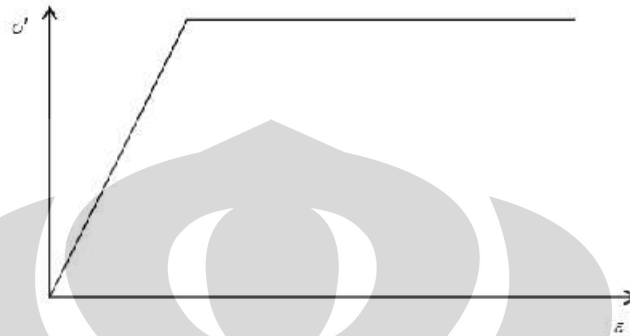
Menurut teori plastisitas klasik (Hill, 1950), perubahan regangan plastis adalah proporsional terhadap turunan fungsi leleh terhadap tegangan. Hal ini berarti bahwa perubahan regangan plastis dapat dinyatakan sebagai vektor yang tegak lurus terhadap bidang leleh. Bentuk klasik dari teori plastisitas ini disebut sebagai plastisitas terasosiasi (*associated plasticity*). Namun, untuk fungsi leleh Mohr-Coulomb, teori plastisitas terasosiasi akan menghasilkan prediksi dilatasi yang berlebihan. Karena itu, selain fungsi leleh (*yield function*), f , digunakan juga sebuah fungsi potensi plastis (*plastic potential function*), g . Kasus dimana $g \neq f$, disebut sebagai plastisitas yang tidak terasosiasi (*non-associated plasticity*). Secara umum, perubahan regangan plastis dituliskan sebagai :

$$\underline{\dot{\varepsilon}}^p = \lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \quad (3.29)$$

dimana λ adalah faktor pengali plastis. Untuk perilaku elastis murni $\lambda = 0$, dimana dalam kasus perilaku plastis $\lambda > 0$ adalah positif :

$\dot{\sigma}' = 0$ untuk $f < 0$ atau $\frac{\partial f^T}{\partial \sigma'} \cdot \underline{D}^e \cdot \underline{\dot{\epsilon}} \leq 0$ (Elastisitas)

$\dot{\sigma}' = 0$ untuk $f = 0$ atau $\frac{\partial f^T}{\partial \sigma'} \cdot \underline{D}^e \cdot \underline{\dot{\epsilon}} \geq 0$ (Plastisitas)



Gambar 3.1 Ide Dasar dari Suatu Model Elastis Plastis-Sempurna (B. J. Brinkgeve, R., 2005)

Persamaan-persamaan ini dapat digunakan untuk memperoleh hubungan antara perubahan tegangan efektif dan perubahan regangan untuk model elastis-plastis (Smith & Griffith, 1982; Vermeer & de Borst, 1984) :

$$\underline{\dot{\sigma}'} = \left(\underline{D}^e - \frac{\alpha}{d} \cdot \underline{D}^e \cdot \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \sigma'} \cdot \frac{\partial f^T}{\partial \sigma'} \cdot \underline{D}^e \right) \cdot \underline{\dot{\epsilon}} \quad (3.30)$$

dimana :

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \sigma'} \underline{D}^e \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \sigma'}$$

Parameter α digunakan sebagai suatu "switch". Jika perilaku material adalah elastis, nilai α akan sama dengan nol, sedangkan untuk perilaku plastis nilai α akan sama dengan satu. Teori plastisitas di atas terbatas untuk bidang leleh yang menerus dan mulus, dan tidak meliputi beberapa kontur bidang leleh seperti pada model Mohr-Coulomb. Untuk bidang leleh seperti ini, teori plastisitas telah dikembangkan oleh Koiter (1960) dan beberapa peneliti lain untuk

memperhitungkan *flow vertices* yang melibatkan dua atau lebih fungsi potensi plastis :

$$\underline{\dot{\epsilon}}^p = \lambda_1 \cdot \frac{\partial g_1}{\partial \underline{\sigma}'} + \lambda_2 \cdot \frac{\partial g_2}{\partial \underline{\sigma}'} + \dots \quad (3.31)$$

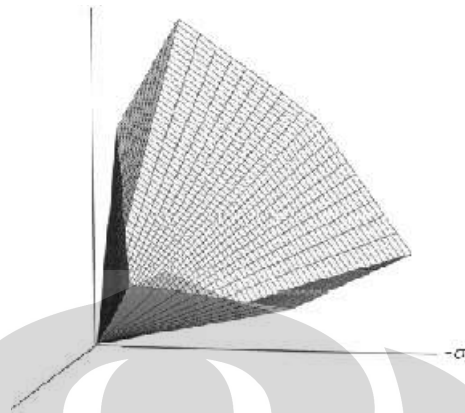
Serupa dengan persamaan di atas, beberapa fungsi leleh yang bersifat *quasi-independent* (f_1, f_2, \dots) digunakan untuk menentukan besarnya nilai faktor pengali ($\lambda_1, \lambda_2, \dots$).

3.5.2 Formulasi Model Mohr-Coulomb

Kondisi leleh Mohr-Coulomb merupakan pengembangan hukum friksi dari Coulomb ke kondisi tegangan secara umum. Faktanya, kondisi ini memastikan bahwa hukum friksi Coulomb diterapkan dalam tiap bidang di dalam elemen. Kondisi leleh Mohr-Coulomb secara penuh terdiri dari enam buah fungsi leleh saat diformulasikan dalam konteks tegangan utama (sebagai contoh lihat Smith & Griffith, 1982) :

$$\begin{aligned} f_{1a} &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 + \sigma'_3) \cdot \sin \phi - c \cdot \cos \phi \leq 0 & (3.32) \\ f_{1b} &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 + \sigma'_2) \cdot \sin \phi - c \cdot \cos \phi \leq 0 \\ f_{2a} &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 + \sigma'_1) \cdot \sin \phi - c \cdot \cos \phi \leq 0 \\ f_{2b} &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_3) \cdot \sin \phi - c \cdot \cos \phi \leq 0 \\ f_{3a} &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_2) \cdot \sin \phi - c \cdot \cos \phi \leq 0 \\ f_{3b} &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 + \sigma'_1) \cdot \sin \phi - c \cdot \cos \phi \leq 0 \end{aligned}$$

Dua buah parameter plastis dari model yang muncul dalam fungsi leleh adalah sudut geser ϕ dan kohesi c yang telah dikenal luas. Fungsi-fungsi leleh ini secara bersamaan membentuk konus heksagonal dalam ruang tegangan utama seperti ditunjukkan oleh Gambar.



Gambar 3.2 Bidang Leleh Mohr-Coulomb dalam Ruang Tegangan Utama ($c = 0$) (B. J. Brinkgeve, R., 2005)

Selain fungsi leleh, didefinisikan enam buah fungsi potensi plastis untuk model Mohr-Coulomb :

$$g_{1a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 + \sigma'_3) \cdot \sin \Psi \quad (3.33)$$

$$g_{1b} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 + \sigma'_2) \cdot \sin \Psi$$

$$g_{2a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 + \sigma'_1) \cdot \sin \Psi$$

$$g_{2b} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_3) \cdot \sin \Psi$$

$$g_{3a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_2) \cdot \sin \Psi$$

$$g_{3b} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 + \sigma'_1) \cdot \sin \Psi$$

Fungsi potensi plastis memuat parameter plastisitas ketiga, yaitu sudut dilatansi Ψ . Parameter ini dibutuhkan untuk memodelkan peningkatan regangan volumetrik plastis positif (dilatansi) seperti secara aktual terjadi pada tanah yang padat.

Saat menerapkan model Mohr-Coulomb untuk kondisi tegangan secara umum, penanganan khusus diperlukan untuk perpotongan dari dua buah bidang leleh. Beberapa program menggunakan transisi yang mulus dari bidang leleh yang satu ke yang lain, yaitu dengan melengkungkan bagian sudut.

Namun bentuk eksak dari model Mohr-Coulomb secara penuh akan digunakan di dalam PLAXIS, dengan menggunakan transisi yang tajam dari bidang leleh yang satu ke bidang leleh yang lain.

Untuk $c > 0$, kriteria Mohr-Coulomb standar mengizinkan adanya tegangan tarik. Pada faktanya, tegangan tarik ijin akan semakin meningkat dengan meningkatnya kohesi. Tetapi dalam realitas, tanah hanya dapat menahan tegangan tarik yang kecil atau tidak sama sekali. Perilaku ini dapat dimodelkan dalam PLAXIS dengan menggunakan pembatasan tegangan tarik. Dalam kasus ini, lingkaran Mohr dengan tegangan utama positif (menyatakan tegangan tarik) tidak diijinkan. Pembatasan tegangan tarik mengikutsertakan tiga buah fungsi leleh tambahan, yang didefinisikan sebagai :

$$f_4 = \sigma'_1 - \sigma_t \leq 0$$

$$f_5 = \sigma'_2 - \sigma_t \leq 0$$

$$f_6 = \sigma'_3 - \sigma_t \leq 0$$

Saat digunakan prosedur pembatasan tegangan tarik, tegangan tarik yang diijinkan, s_t , secara pra-pilih ditentukan sebesar nol. Untuk ketiga fungsi leleh ini, digunakan sebuah fungsi alir (*flow rule*) yang terasosiasi. Untuk kondisi tegangan yang berada di bawah bidang leleh, perilaku adalah elastis dan mengikuti hukum Hooke untuk elastisitas yang linier elastis. Karena itu, disamping parameter plastisitas, c , f dan ϕ , diperlukan masukan berupa modulus elastisitas Young, E , dan rasio Poisson, ν .

3.5.3 Parameter Dasar Model Mohr-Coulomb

Model Mohr-Coulomb membutuhkan total lima buah parameter, yang umum digunakan oleh para praktisi geoteknik dan dapat diperoleh dari uji-uji yang umum dilakukan di laboratorium. Parameter-parameter tersebut bersama satuan dasarnya adalah sebagai berikut :

Universitas Indonesia

E : Modulus Young [kN/m²]

ν : Rasio Poisson [-]

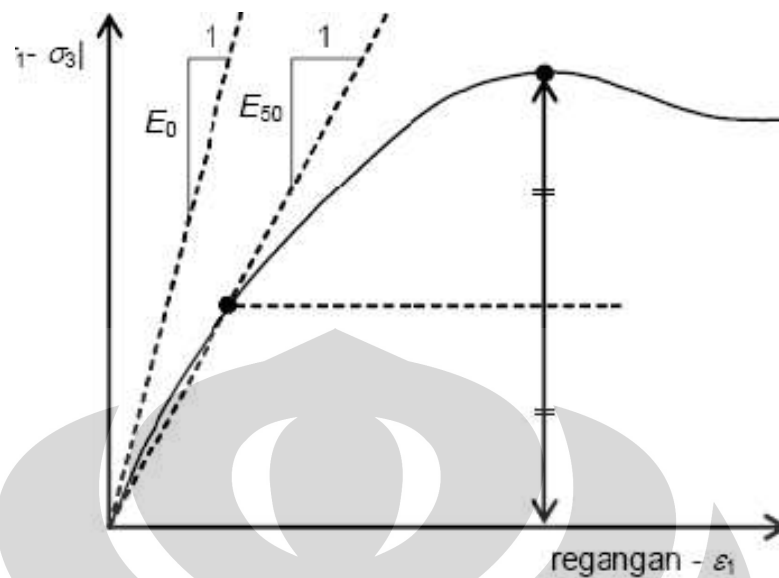
ϕ : Sudut geser [°]

c : Kohesi [kN/m²]

δ : Sudut dilatasi [°]

Modulus Young (E)

PLAXIS menggunakan modulus Young sebagai modulus kekakuan dasar dalam model elastis dan model Mohr-Coulomb, tetapi beberapa modulus alternatif juga ditampilkan. Modulus kekakuan mempunyai dimensi sama dengan dimensi tegangan. Nilai dari parameter kekakuan yang digunakan dalam suatu perhitungan memerlukan perhatian khusus karena kebanyakan material tanah menunjukkan perilaku yang non-linier dari awal pembebanan. Dalam mekanika tanah, kemiringan awal dari kurva tegangan-regangan umumnya dinotasikan sebagai E_0 dan modulus sekan pada 50% kekuatan dinotasikan sebagai E_{50} . Untuk material dengan rentang elastisitas linier yang lebar maka penggunaan E_0 adalah realistis, tetapi untuk masalah pembebanan pada tanah, umumnya digunakan E_{50} . Pada pengurangan beban, seperti pada kasus terowongan dan galian, perlu digunakan E_{ur} dan bukan E_{50} .



Gambar 3.3 Definisi E_0 Dan E_{50} untuk Hasil Uji Triaksial *Drained* Standar (B. J. Brinkgeve, R., 2005)

Untuk tanah, modulus pengurangan beban E_{ur} dan modulus pembebanan E_{50} cenderung semakin meningkat terhadap peningkatan tegangan keliling yang bekerja. Karena itu, lapisan tanah yang dalam cenderung mempunyai kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan dengan lapisan tanah yang dangkal. Terlebih lagi, kekakuan dari tanah bergantung pada lintasan tegangan yang dilalui. Kekakuan akan jauh lebih tinggi untuk kasus pengurangan beban dibandingkan dengan kasus peningkatan pembebanan. Selain itu, kekakuan tanah yang dinyatakan dengan modulus Young dapat lebih rendah pada kasus pembebanan (*Drained*) dibandingkan pada kasus penggeseran. Karena itu, saat menggunakan modulus kekakuan yang konstan untuk menyatakan perilaku tanah perlu ditentukan sebuah nilai yang konsisten terhadap tingkat tegangan dan lintasan tegangan yang dilalui. Perhatikan bahwa beberapa perilaku tanah yang tergantung dari tegangan yang bekerja telah diikutsertakan dalam model tingkat lanjut dalam PLAXIS. Untuk model Mohr-Coulomb, PLAXIS menawarkan sebuah pilihan khusus untuk memasukkan nilai kekakuan yang meningkat terhadap kedalaman.

Rasio Poisson (?)

Uji triaksial *Drained* standar dapat menghasilkan perubahan volume yang signifikan pada awal pemberian beban aksial, yang menghasilkan konsekuensi berupa nilai rasio Poisson awal (ν_0) yang rendah. Pada beberapa kasus, khususnya pada masalah pengurangan beban, mungkin realistis untuk menggunakan nilai awal yang rendah, tetapi secara umum saat menggunakan model Mohr-Coulomb, Penentuan rasio Poisson cukup sederhana jika model elastis atau model Mohr-Coulomb digunakan untuk pembebanan gravitasi (dengan meningkatkan SM_{weight} dari 0 ke 1 pada perhitungan plastis). Untuk pembebanan seperti ini PLAXIS harus memberikan rasio yang realistis dari $K_0 = s_h / s_v$. Karena kedua model tersebut akan menghasilkan nilai rasio dari $s_h / s_v = \nu / (1 - \nu)$ untuk kompresi satu dimensi, maka penentuan rasio Poisson yang menghasilkan nilai K_0 yang realistis dapat dengan mudah dilakukan.

Karena itu nilai ν dievaluasi dengan mencocokkan nilai K_0 . Dalam banyak kasus akan diperoleh nilai ν yang berkisar antara 0.3 dan 0.4. Umumnya, nilai tersebut tidak hanya digunakan pada kompresi satu dimensi, tetapi juga dapat digunakan untuk kondisi pembebanan lainnya. Namun untuk kasus pengurangan beban, lebih umum untuk menggunakan nilai antara 0.15 dan 0.25.

Kohesi (c)

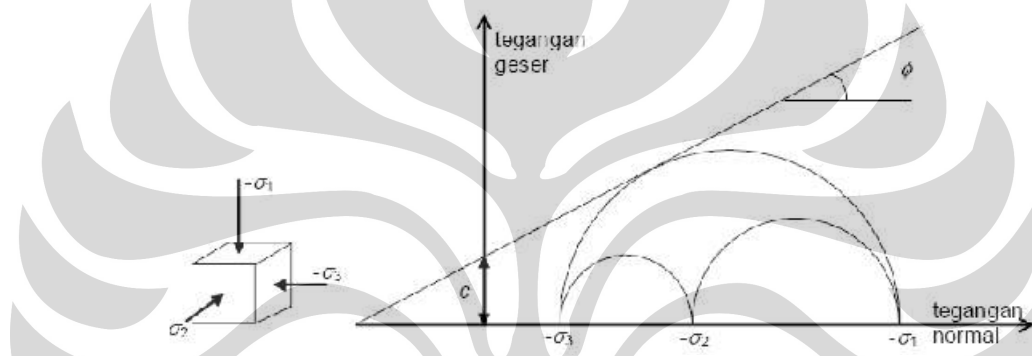
Kekuatan berupa kohesi mempunyai satuan tegangan. PLAXIS dapat menangani pasir non-kohesif ($c = 0$), tetapi beberapa pilihan akan berjalan kurang baik. Untuk menghindari hal ini, pengguna yang belum berpengalaman disarankan untuk memasukkan nilai yang kecil untuk kohesi (gunakan $c > 0,2$ kPa). PLAXIS juga memiliki pilihan

Universitas Indonesia

khusus untuk masukan suatu lapisan tanah dimana nilai kohesi meningkat terhadap kedalaman.

Sudut geser (f)

Nilai sudut geser, f (phi), dimasukkan dalam satuan derajat. Sudut geser yang tinggi, seperti pada pasir padat, akan mengakibatkan peningkatan beban komputasi plastis.



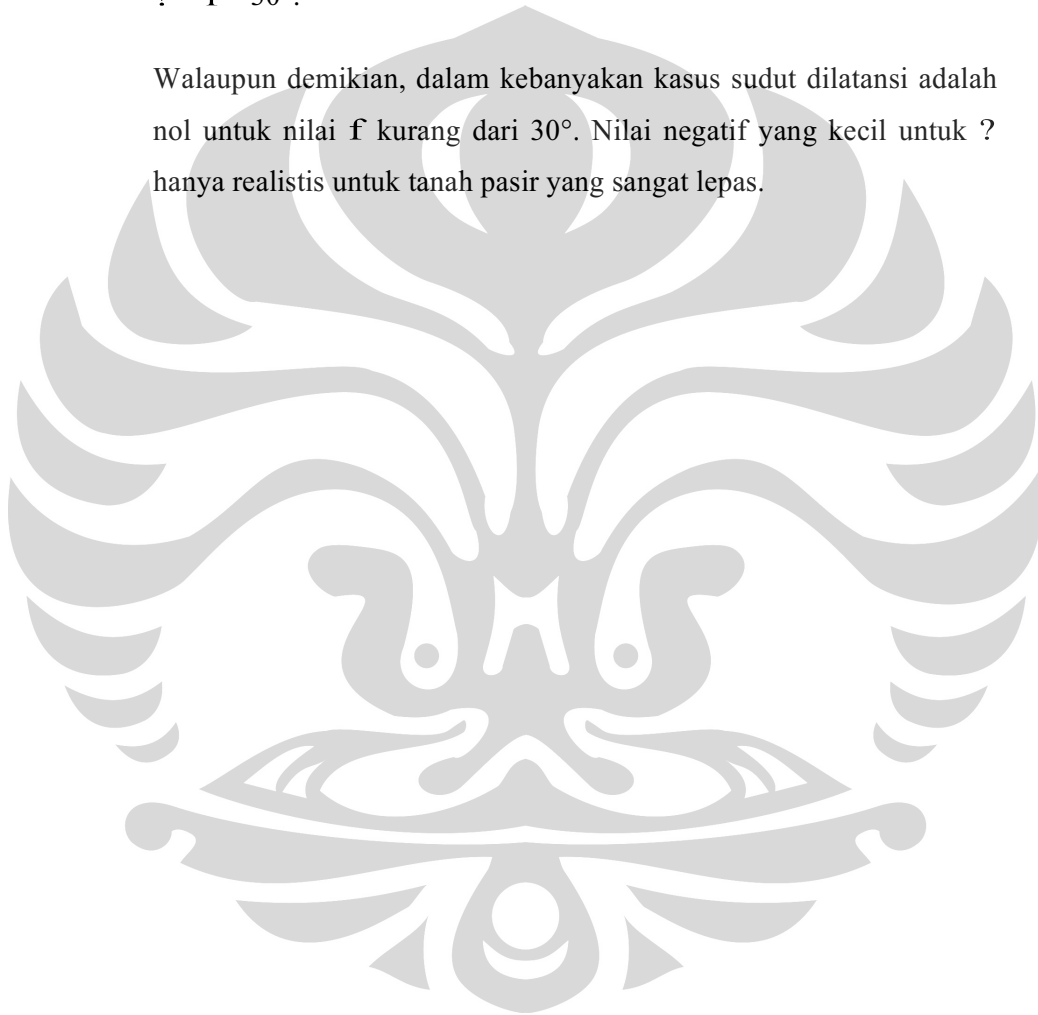
Gambar 3.4 Lingkaran-Lingkaran Tegangan Saat Mengalami Leleh; Satu Lingkaran Menyentuh Garis Keruntuhan Coulomb (B. J. Brinkgeve, R., 2005)

Waktu komputasi akan meningkat kurang-lebih secara ekponensial terhadap sudut geser. Karena itu, sudut geser yang tinggi sebaiknya dihindari saat melakukan perhitungan awal untuk suatu proyek tertentu. Sudut geser akan menentukan kuat geser dengan menggunakan lingkaran tegangan Mohr. Representasi dari kriteria leleh yang lebih. Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb telah terbukti lebih baik untuk menyatakan perilaku tanah dibandingkan dengan aproksimasi dari Drucker-Prager, dimana bidang runtuh dari model Drucker-Prager cenderung tidak akurat untuk konfigurasi aksial-simetri.

Sudut dilatasi (ϕ)

Sudut dilatasi, ϕ (*psi*), dinyatakan dalam derajat. Selain tanah lempung yang terkonsolidasi sangat berlebih, tanah lempung cenderung tidak menunjukkan dilatasi sama sekali (yaitu $\phi = 0$). Dilatasi dari tanah pasir bergantung pada kepadatan serta sudut gesernya. Untuk pasir kwarsa besarnya dilatasi kurang lebih adalah $\phi \sim f - 30^\circ$.

Walaupun demikian, dalam kebanyakan kasus sudut dilatasi adalah nol untuk nilai f kurang dari 30° . Nilai negatif yang kecil untuk ϕ hanya realistis untuk tanah pasir yang sangat lepas.



BAB 4

PERBANDINGAN PARAMETER *DRAINED* DAN *UNDRAINED* PADA PERMODELAN KASUS TIMBUNAN

4.1 PENDAHULUAN

Pada bab ini akan menjabarkan hasil analisis dari permodelan tanah melalui piranti lunak, PLAXIS dengan membuat dua permodelan tanah kondisi *consolidated undrained*, yaitu dengan membedakan input parameter masing – masing model, satu menggunakan parameter *drained* (c' dan f') dan satu lagi menggunakan parameter *undrained* (c_u dan f_u). Dalam analisis ini menggunakan CU karena pada uji CU didapatkan parameter *undrained* dan *drained*.

Korelasi antara tegangan, regangan dan air pori tanah dari input parameter yang berbeda tersebut akan dibandingkan. Secara teoretis, korelasi antara tegangan-regangan dan tekanan air pori-regangan pada suatu tanah adalah sama, baik apabila di analisis dengan input parameter *Drained* maupun dengan parameter *Undrained*.

Tipe analisis untuk kasus timbunan adalah analisis regangan bidang (*plane strain analysis*). Analisis penurunan tanah akibat timbunan yang dilakukan terdiri dari :

1. penurunan tanah dengan teori 1-D Terzaghi, dan
2. penurunan tanah dengan drainase vertikal

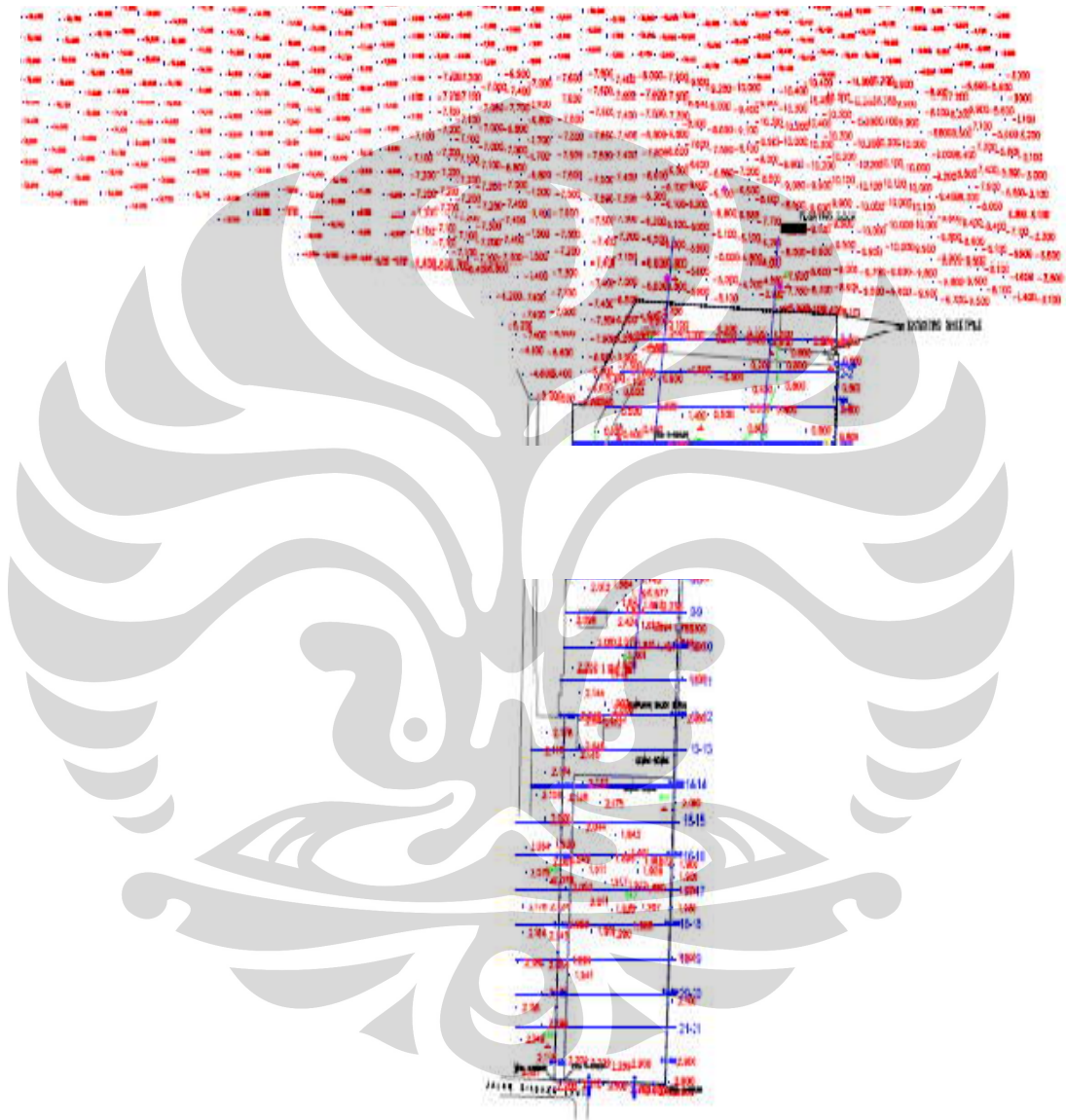
4.2 DATA PROYEK

4.2.1 Parameter Pile Dermaga

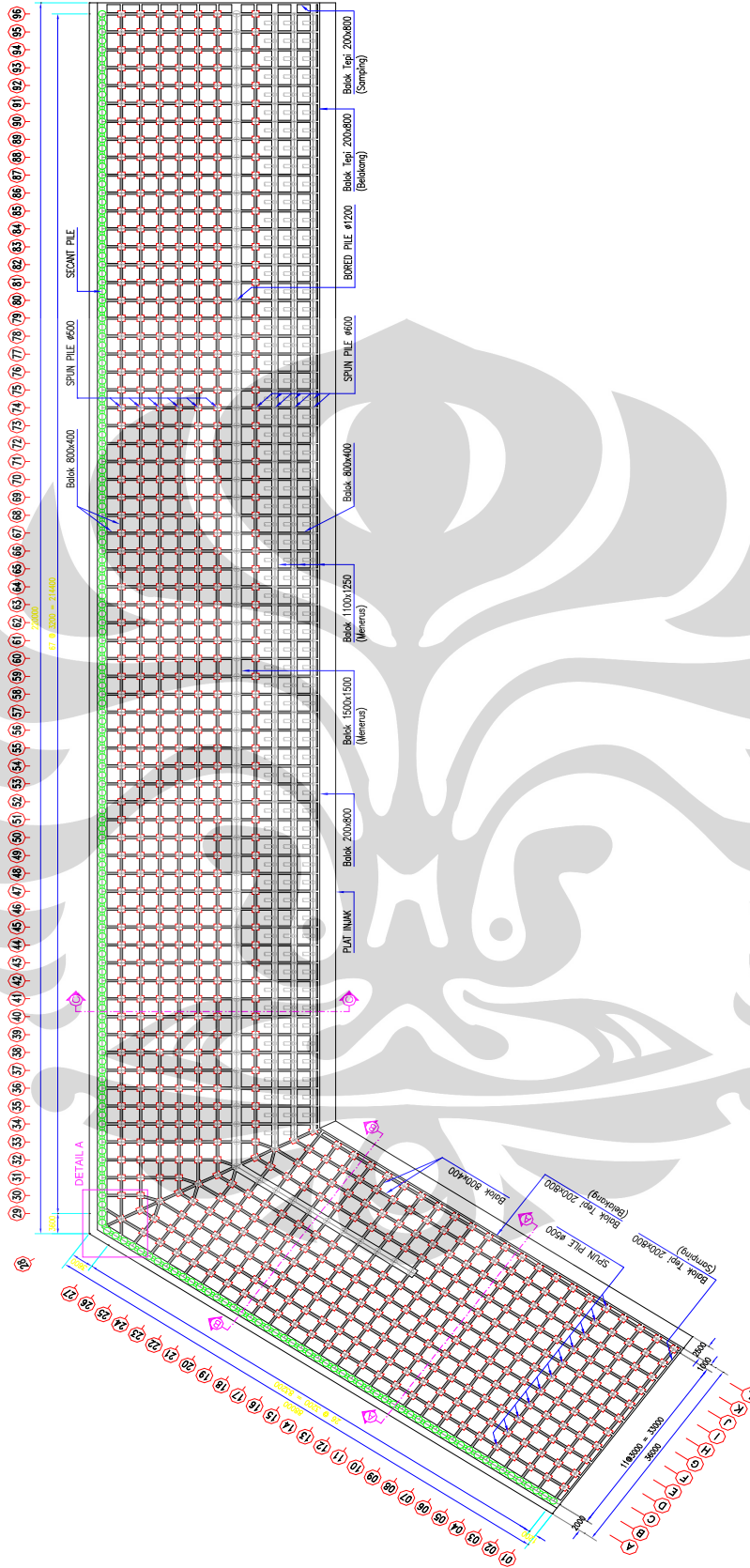
Pada awal pembangunan dermaga Car Terminal telah terpasang *sheet pile* eksisting yang telah dianalisis keamanannya untuk dapat menahan timbunan awal setinggi +2m pada dermaga yang ditunjukkan pada

Universitas Indonesia

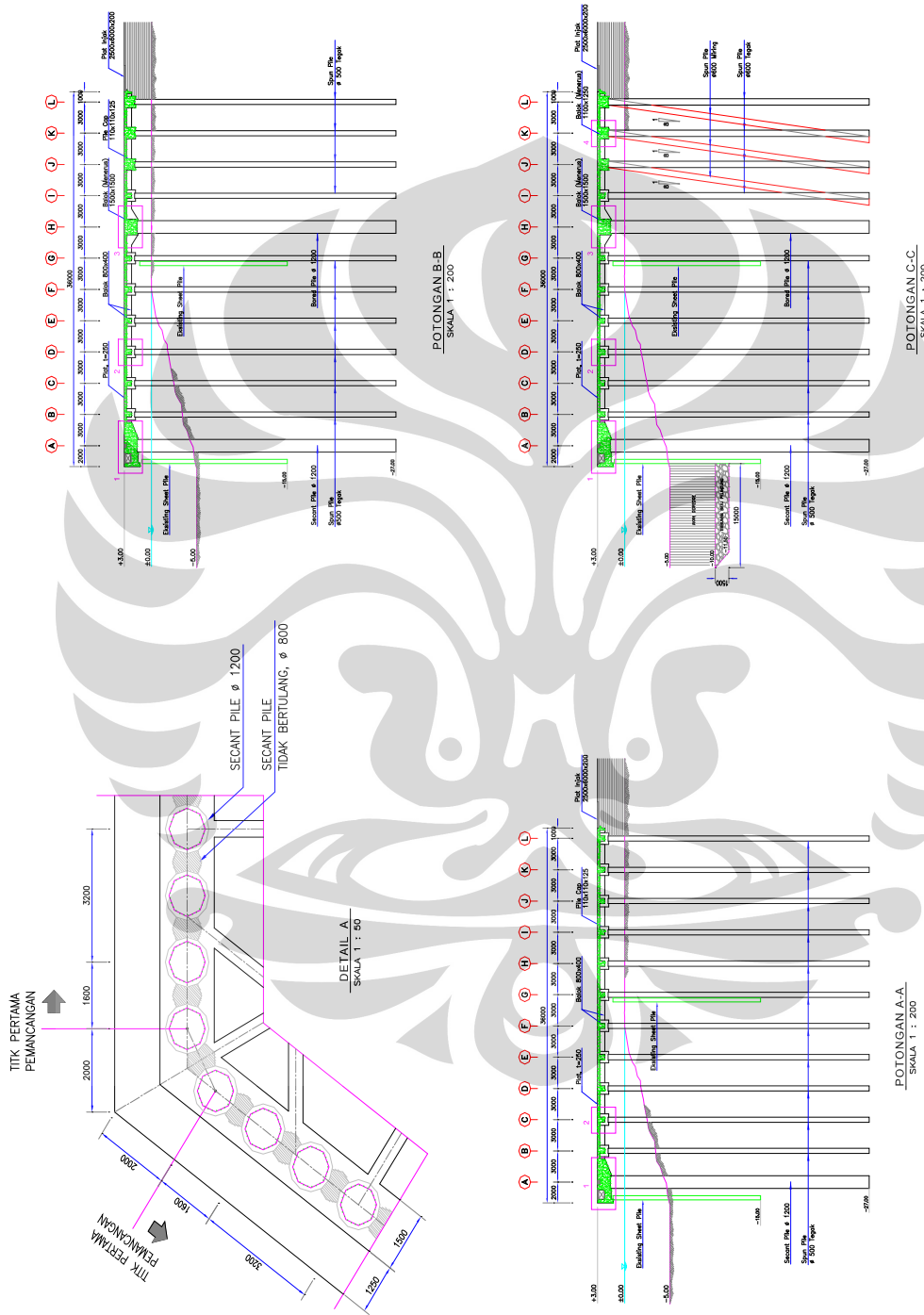
Gambar 4.4. Setelah timbunan dermaga selesai, dilanjutkan dengan pemasangan pile-pile untuk perkuatan konstruksi dermaga di atasnya. Data proyek dapat dilihat pada Gambar 4.1 hingga 4.3.



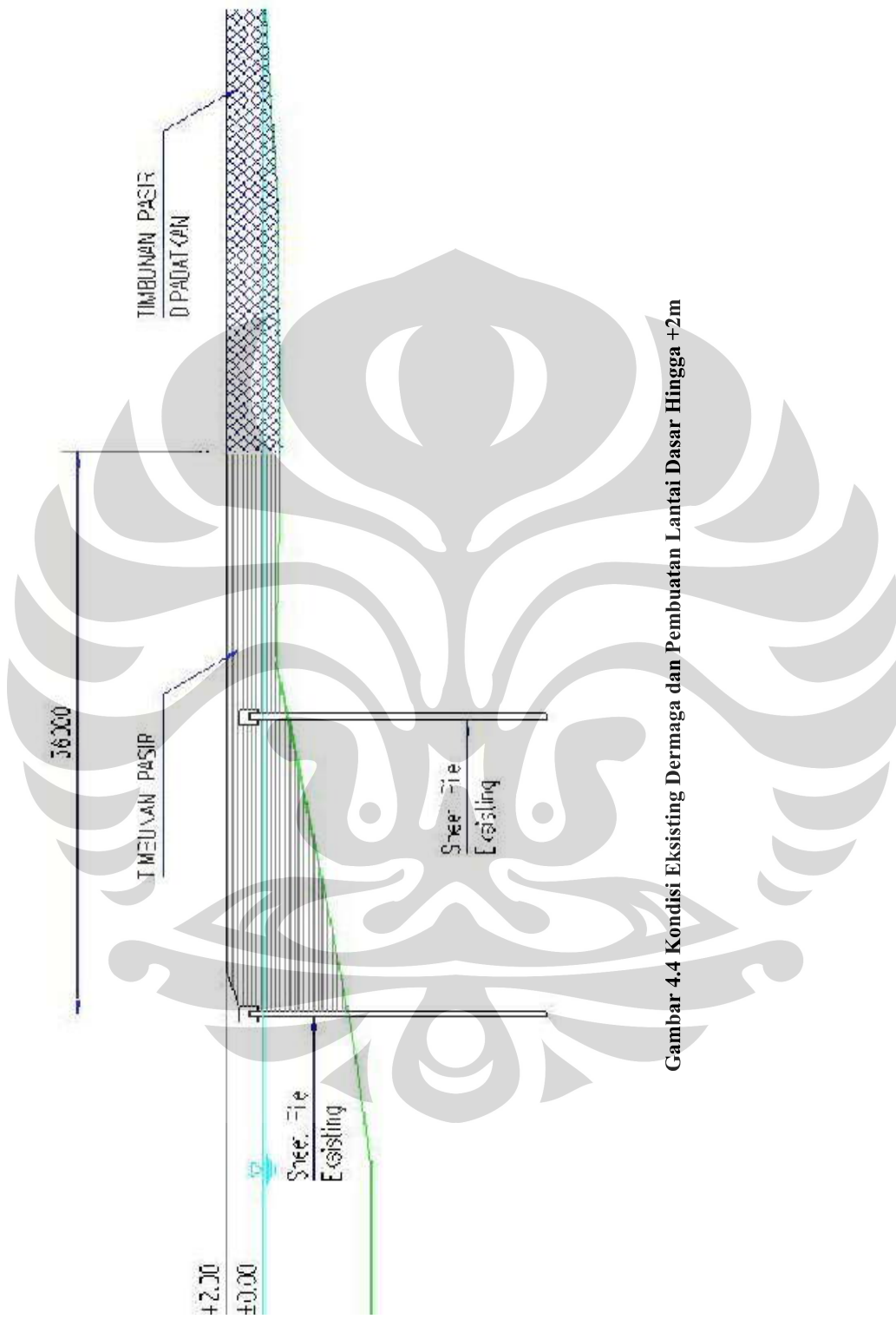
Gambar 4.1 Topografi dan Bathimetri Dermaga



Gambar 4.2 Denah Balok dan Pile Cap Dermaga



Gambar 4.3 Potongan Melintang Dermaga dan Detail Secant Pile

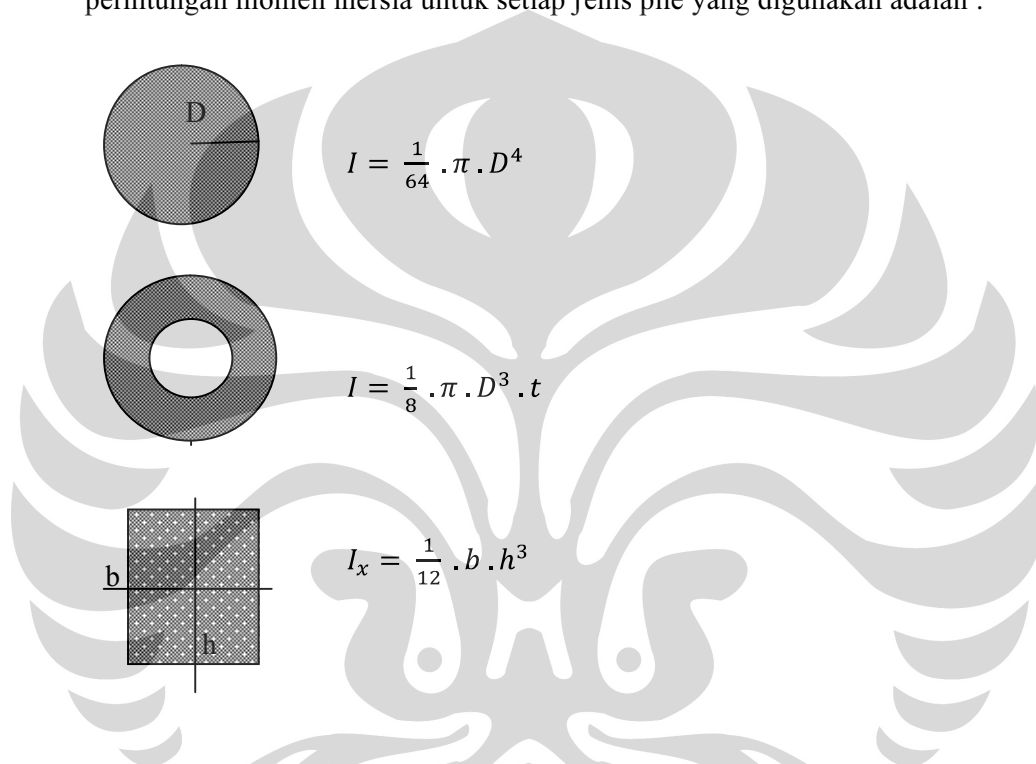


Gambar 4.4 Kondisi Eksisting Dermaga dan Pembuatan Lantai Dasar Hingga +2m



Gambar 4.5 Dredging dan Penimbunan Hingga Elevasi Terakhir (+4.4m)

Dermaga menggunakan 6 jenis pile yang berbeda dengan fungsinya masing – masing. Perlu diketahui bahwa dalam menghitung parameter – parameter pile, harus dipahami cara kerja dan bagaimana PLAXIS memodelkan masalah. Untuk memodelkan masalah dalam PLAXIS 2D ini, penulis menggunakan model *Planestrain*. Artinya, model diartikan sama setiap satu meter tegak lurus ke arah dalam bidang model. Adapun dalam penghitungan parameter – parameter pile, perhitungan momen inersia untuk setiap jenis pile yang digunakan adalah :



Tabel 4.1 Parameter Pile Dermaga

| PILE | Type | EA (kN/m) | EI (kN/m) | w (kN/m/m) | v | M _p (kNm/m) | N _p (kNm/m) |
|---------------------|---------|--------------|--------------|---------------|------|---------------------------|---------------------------|
| Steel Sheet Pile | Elastik | 3.86E+06 | 3.36E+04 | 1.5 | 0.18 | N/A | N/A |
| Pile Cap | Elastik | 2.00E+07 | 1.67E+06 | 24 | 0.15 | N/A | N/A |
| Concrete Sheet pile | Elastik | 2.64E+06 | 2.70E+04 | 3.298 | 0.15 | N/A | N/A |
| Secant Pile | Elastik | 1.41E+07 | 1.27E+05 | 16.96 | 0.15 | N/A | N/A |
| Bored Pile | Elastik | 7.06E+06 | 6.36E+05 | 16.96 | 0.15 | N/A | N/A |
| Spun Pile | Elastik | 8.25E+06 | 2.68E+04 | 0.94 | 0.15 | N/A | N/A |

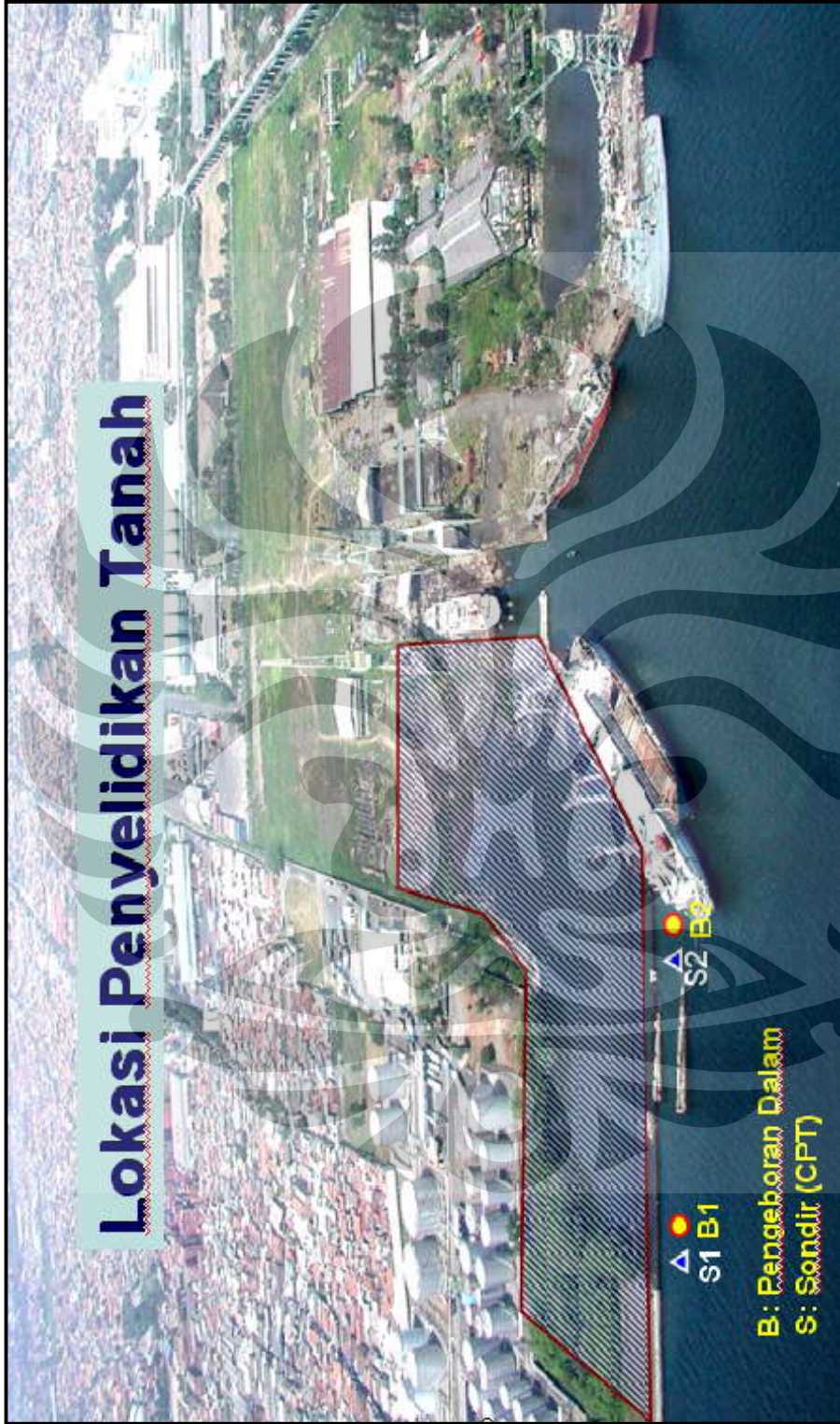
4.2.2 Penyelidikan dan Penentuan Parameter Lapisan Tanah

Penyelidikan tanah yang dilakukan meliputi penyelidikan lapangan dan penyelidikan laboratorium. Untuk penyelidikan lapangan meliputi *Deep Boring Standard* (SPT) dan *Sondir* (DCPT). Sedangkan untuk penyelidikan laboratoriumnya meliputi uji kadar air, berat jenis, derajat kejenuhan, uji konsolidasi, uji triaksial dan uji permeabilitas.

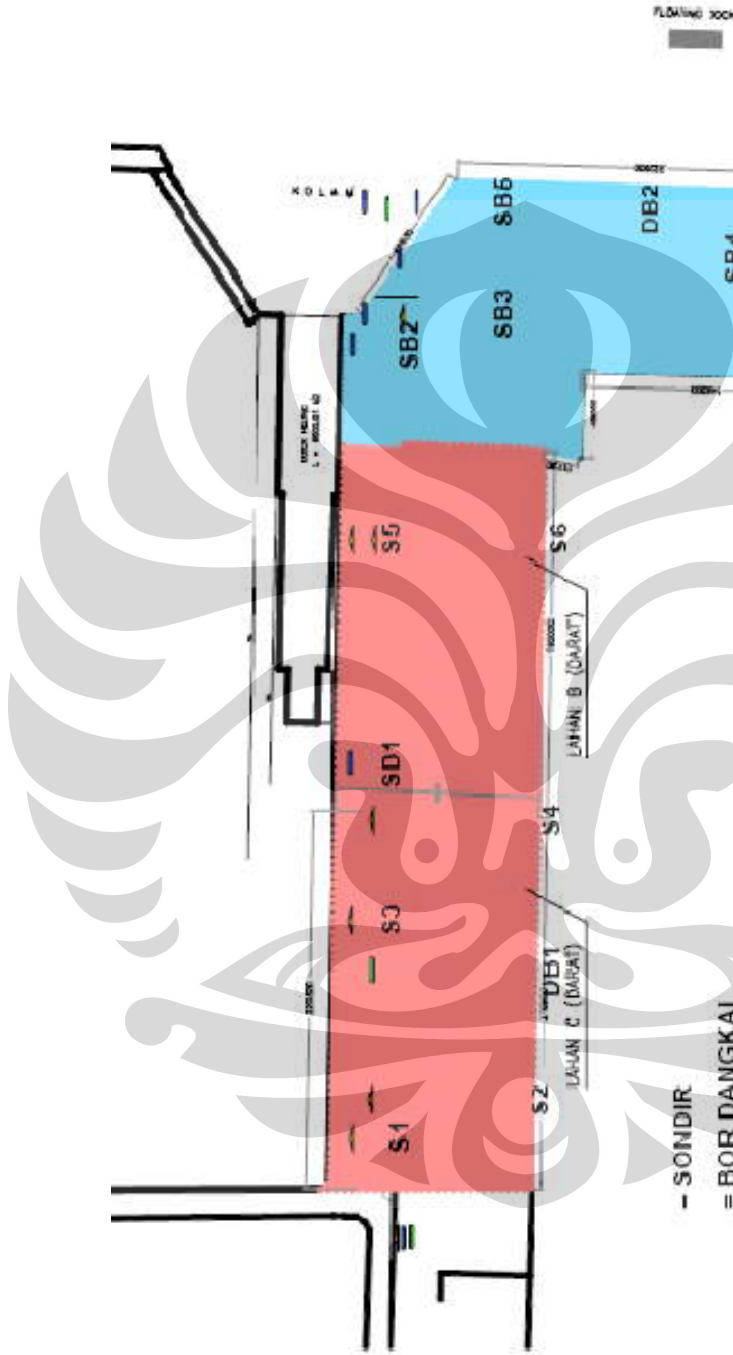
Untuk input data pada program PLAXIS dibutuhkan beberapa data tanah yaitu berat isi kering, berat isi, permeabilitas tanah, kohesi, sudut geser dalam, sudut dilatansi. Lapisan tanah terdiri dari :

1. *Very Soft Clay*
2. *Medium Dense Sand*
3. *Cadas*
4. *Very Stiff Clay*
5. *Hard Clay*

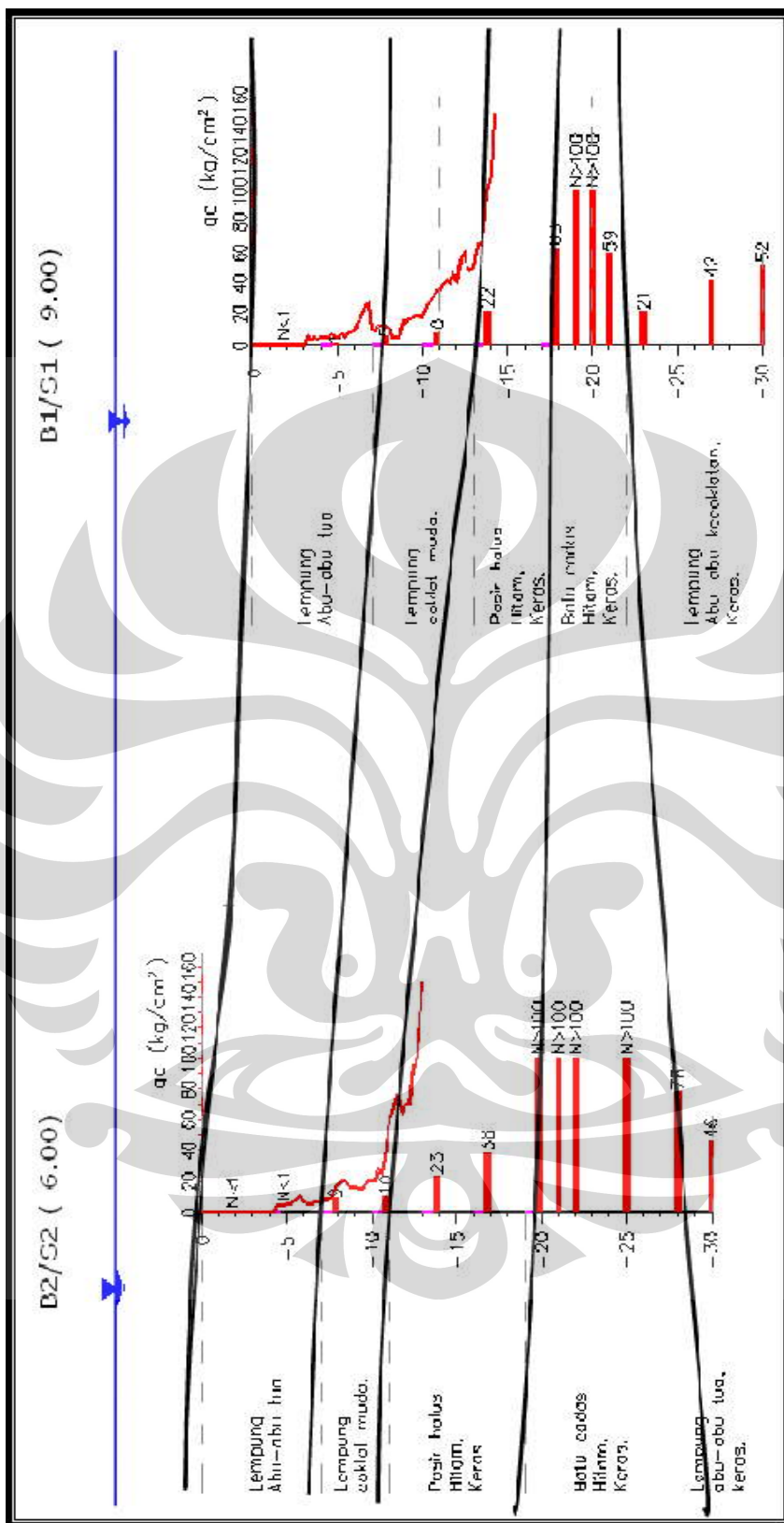
Adapun lokasi penyelidikan tanah dan profil lapisan tanah tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.6, 4.7, dan 4.8.



Gambar 4.6 Lokasi Penyelidikan Tanah



Gambar 4.7 Detail Lokasi Titik Bor dan Sondir



Gambar 4.8 Profil Lapisan Tanah

Beberapa parameter yang didapatkan merupakan hasil dari uji Triaksial *Undrained Unconsolidated* , dan juga korelasi SPT.

1. Korelasi N-SPT terhadap nilai C_u

Untuk nilai C_u dapat diperoleh dengan menggunakan korelasi Stroud :

$$C_u = (3.5-6.5) \cdot N\text{-SPT (KN/m}^2\text{)}$$

Pada tugas akhir ini digunakan nilai 6.

2. Korelasi N-SPT terhadap nilai ϕ

Nilai ϕ diperoleh dari grafik hubungan antara Sudut Geser Dalam dan nilai (Osaki).

$$\phi \text{ (deg)} = \sqrt{20 \cdot N} + 15$$

3. Korelasi N-SPT terhadap nilai modulus elastisitas tanah *Schmertmann* (1970), Modulus elastisitas tanah dapat diperoleh dengan menggunakan korelasi dari data N-SPT.

Tanah Pasir

$$E_s \text{ (kN/m}^2\text{)} = 766 N \quad ; N = N\text{-SPT}$$

$$E_s = 2q_c$$

Tanah Lempung

Nilai modulus elastisitas pada tanah lempung sangat tergantung pada riwayat pembebanannya.

Tanah Lempung NC

$$E_s = 250 C_u - 500 C_u$$

Tanah Lempung OC

$$E_s = 750 C_u - 1000 C_u \quad ; C_u = \text{Undrained cohesion of clayey soil}$$

Tabel 4.2 Parameter Elastik untuk Berbagai Jenis Tanah (M. Das, B, 1985)

| Type of soil | Young's modulus, E_s | | 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 | 0.20-0.40 |
| Sand and Gravel | 69.00-172.50 | 10000-25000 | 0.15-0.35 |
| Soft clay | 2.07-5.18 | 300-750 | 0.20-0.50 |
| Medium clay | 5.18-10.35 | 750-1500 | |
| Stiff Clay | 10.35-24.15 | 1500-3500 | |

4.3 ANALISIS TIMBUNAN

4.3.1 Tinggi Tahapan Timbunan

Dalam pelaksanaan konstruksi timbunan harus diperhatikan elevasi dari timbunan yang akan dilaksanakan. Bila konstruksi timbunan direncanakan untuk mencapai elevasi tertentu maka konstruksi dilakukan bertahap agar tidak terjadi kegagalan konstruksi berupa amblesnya timbunan.

$$q_o = \gamma \cdot h$$

$$q_o = [1 \times (17 - 10)] + (2 \times 16) = 39 \text{ KN/m}^2$$

$$S_U = 6 + (0.22 \times 39) = 14.58 \text{ KN/m}^2$$

$$H_{cr} = \frac{5.14 \cdot S_U}{\gamma \cdot SF}$$

Dimana nilai 5.14 adalah N_c Terzaghi untuk *Saturated Clay* ($S_r = 100\%$) dan nilai sudut geser dalam (ϕ) = 0° , maka tinggi timbunan kritis yang bisa dilakukan untuk tahap awal adalah :

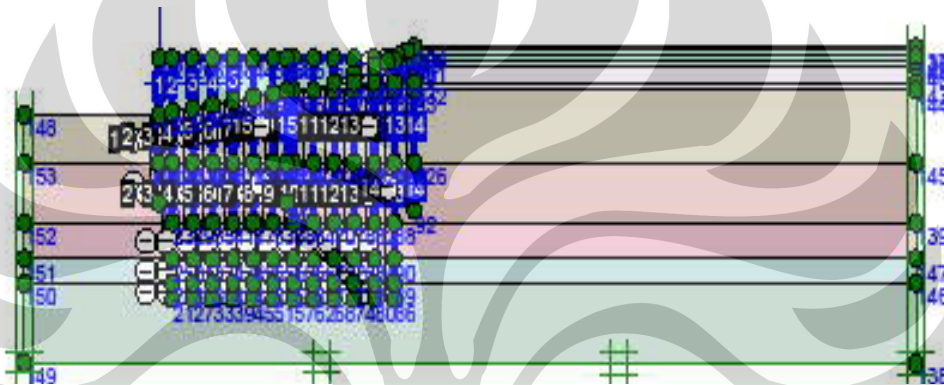
$$q_1 = \frac{5.14 \cdot S_U}{H_{cr} \cdot SF} = \frac{5.14 \times 14.58}{1.25} = 59 \text{ KN/m}^2$$

$$H_{cr} = \frac{59 - 39}{16 \times 1.3} = 0.96 \text{ m}$$

Karena kebutuhan dan keadaan di lapangan untuk mencapai elevasi +3.00 maka tinggi timbunan awal yang dilakukan adalah 3 m. Hal ini dianggap

tidak apa – apa melebihi ketinggian kritisnya karena pada lokasi sudah lebih dulu dipasang eksisting sheet pile untuk menahan dan apabila terjadi longsor tidak akan membahayakan karena konstruksi dermaga belum dibangun. Sedangkan, tinggi timbunan total yang direncanakan adalah 5.4 m.0.65 cm, dimana lapisan tanah berada pada 1 m dibawah permukaan air laut (0,0)

4.3.2 Permodelan Timbunan dengan PLAXIS



Gambar 4.9 Model Geometri Tanah Timbunan

Kedalaman tanah di bawah timbunan yang ditinjau adalah ± 30 meter, tetapi pada PLAXIS dimodelkan sampai 50 meter dibawah muka air tanah agar lebih dapat melihat pengaruh dari tanah yang paling dasar. Berdasarkan hasil *boring log* CPT yang didapat dari Laboratorium Tanah Fakultas Sipil ITB, lapisan tanah dapat dibagi menjadi lima lapisan, yaitu :

Tabel 4.3 Kedalaman Tanah

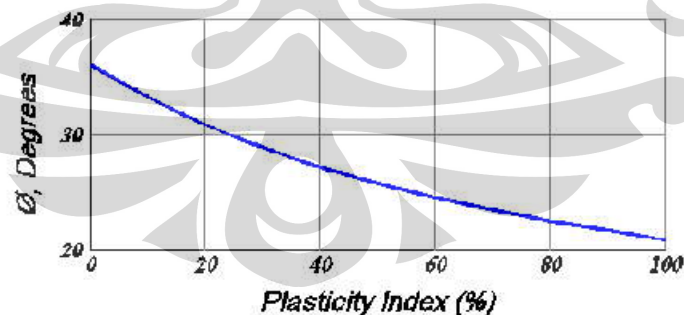
| Kedalaman (m) | Jenis Tanah |
|---------------|-------------------|
| 1 – 10 | Very Soft Clay |
| 10 – 17.5 | Medium Dense Sand |
| 17.5 – 22 | Cadas |
| 22 - 25 | Very Stiff Clay |
| 25 – 30 | Hard Clay |

Semua lapisan tanah berada di bawah permukaan air laut (0,0).

Pemodelan pada PLAXIS menggunakan material model Mohr-Coulomb karena dengan model ini sudah cukup untuk melakukan pendekatan awal terhadap perilaku tanah secara umum. Di dalam model Mohr-Coulomb, terdapat lima parameter penting yang berpengaruh, yaitu E (modulus Young), ν (rasio Poisson), f (sudut geser), c (kohesi), dan ϕ (sudut dilatasi). Parameter yang dimasukkan adalah parameter *drained* dan *undrained*.

Untuk penggunaan parameter *undrained* pada pemodelan PLAXIS, parameter yang dimasukkan adalah nilai-nilai yang didapat dari uji triaksial *unconsolidated undrained* untuk tiap-tiap kedalaman lapisan tanah.

Untuk penggunaan parameter *drained*, nilai f' diperoleh dari korelasi Grafik Terzaghi antara ϕ dan Indeks Plastisitas, dan nilai c' adalah sangat kecil, yaitu 1 KPa.



Relation between ϕ and plasticity index for clays of moderate to low sensitivity under drained conditions

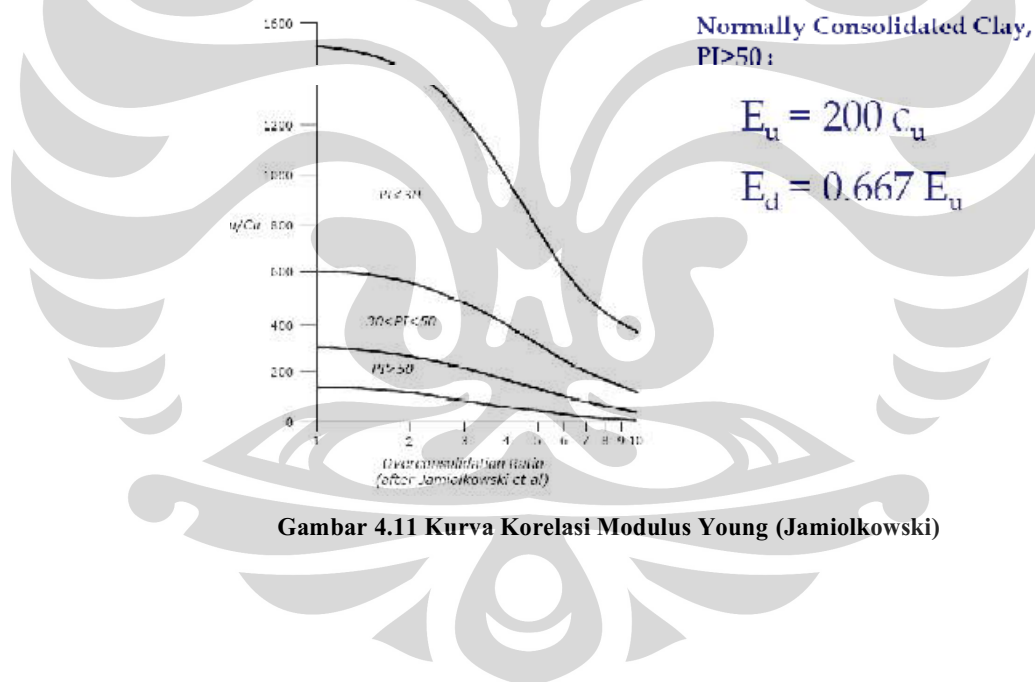
Gambar 4.10 Grafik Korelasi antara ϕ dan *Plasticity Index*

Universitas Indonesia

(sumber : Soil Mechanics in Engineering Practise. K.Terzaghi)

Untuk rasio Poisson diambil nilai 0,35, karena secara umum nilai tersebut tidak hanya digunakan pada konsolidasi satu dimensi, tetapi juga juga dapat digunakan untuk kondisi pembebanan lainnya. Nilai ν (sudut dilatasi), pada tanah lempung cenderung tidak menunjukkan dilatasi sama sekali ($\nu = 0$), kecuali untuk tanah lempung yang terkonsolidasi berlebih. Sedangkan dilatasi dari tanah pasir bergantung pada kepadatan serta sudut gesernya. Untuk pasir kwarsa besarnya dilatasi kurang lebih adalah $\nu \sim \phi - 30^\circ$.

Korelasi nilai modulus Young dengan c_u dapat dilihat pada grafik berikut :



Gambar 4.11 Kurva Korelasi Modulus Young (Jamiolkowski)

Tabel 4.4 Parameter Tanah Undrained

| Identifikasi | Lapisan 1 | Lapisan 2 | Lapisan 3 | Lapisan 4 | Lapisan 5 | Lapisan 6 |
|-------------------------------------|----------------|-------------------|-----------|-----------------|-----------|-----------|
| | Very Soft Clay | Medium Dense Sand | Cadas | Very Stiff Clay | Hard Clay | Timbunan |
| γ_{dry} (kN/m ³) | 15 | 15 | 16 | 16 | 17 | 16 |
| γ_{wet} (kN/m ³) | 16,5 | 17,5 | 18 | 18 | 18,5 | 17 |
| k_x (cm/sec) | 1.16E-07 | 0,8 | 1.16E-07 | 1.16E-07 | 1.16E-07 | 1 |
| k_y (cm/sec) | 1.16E-07 | 0,8 | 1.16E-07 | 1.16E-07 | 1.16E-07 | 1 |
| v | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0.3 |
| E_{ref} (kN/m ²) | 900 | 23000 | 100000 | 50000 | 90000 | 16000 |
| c (kN/m ²) | 6 | 5 | 400 | 167 | 300 | 1 |
| ϕ | 0 | 32 | 30 | 0 | 0 | 30 |
| φ | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabel 4.5 Parameter Tanah Drained

| Identifikasi | Lapisan 1 | Lapisan 2 | Lapisan 3 | Lapisan 4 | Lapisan 5 | Lapisan 6 |
|-------------------------------------|----------------|-------------------|-----------|-----------------|-----------|-----------|
| | Very Soft Clay | Medium Dense Sand | Cadas | Very Stiff Clay | Hard Clay | Timbunan |
| γ_{dry} (kN/m ³) | 15 | 15 | 16 | 16 | 17 | 16 |
| γ_{wet} (kN/m ³) | 16,5 | 17,5 | 18 | 18 | 18,5 | 17 |
| k_x (cm/sec) | 1.16E-07 | 0,8 | 1.16E-07 | 1.16E-07 | 1.16E-07 | 1 |
| k_y (cm/sec) | 1.16E-07 | 0,8 | 1.16E-07 | 1.16E-07 | 1.16E-07 | 1 |
| v | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0.3 |
| E_{ref} (kN/m ²) | 810 | 23000 | 100000 | 33350 | 60030 | 16000 |
| c (kN/m ²) | 1 | 5 | 400 | 167 | 300 | 1 |
| ϕ | 27.2 | 32 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| φ | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 |

Universitas Indonesia

4.3.3 Penurunan Konsolidasi

Untuk tanah yang terkonsolidasi normal besarnya penurunan dapat dihitung dengan persamaan 2.45 pada bab sebelumnya.

Tabel-tabel berikut ini menunjukkan penurunan konsolidasi yang terjadi tiap lapisan tanah lunak :

Tabel 4.6 Penurunan Konsolidasi One Dimensional Consolidation ($C_c = 0.425$)

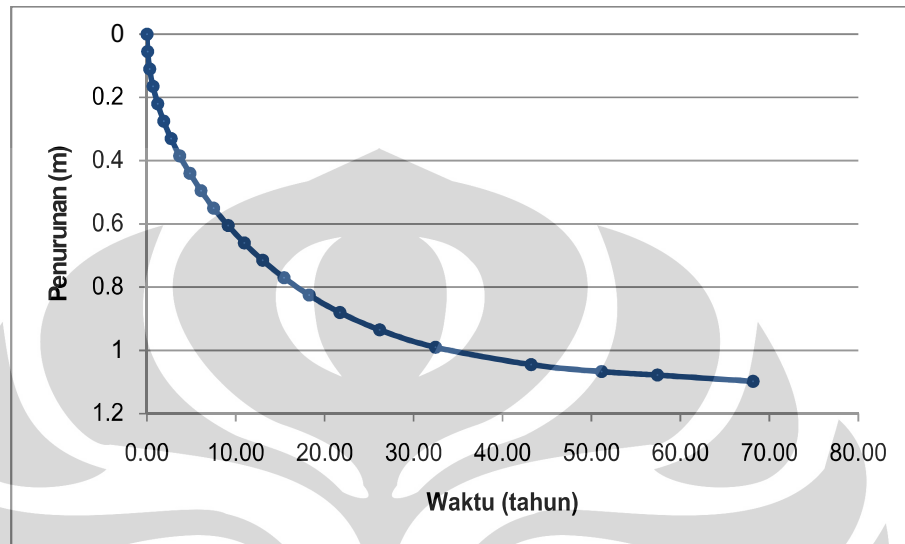
| Tahap | Tinggi Timbunan (m) | $p_{o(i)} + \Delta p_{(i)}$ | $p_{o(i)}$ | e_o | $\log\left(\frac{p_{o(i)} + \Delta p_{(i)}}{p_{o(i)}}\right)$ | Penurunan (m) |
|-------|---------------------|-----------------------------|------------|-------|---|---------------|
| awal | 3 | 71.5 | 32.5 | 1.04 | 0.342422681 | 0.71 |
| 1 | 3.65 | 81.9 | 32.5 | 1.04 | 0.401400541 | 0.84 |
| 2 | 4.3 | 92.3 | 32.5 | 1.04 | 0.45331834 | 0.95 |
| 3 | 4.95 | 102.7 | 32.5 | 1.04 | 0.499687083 | 1.04 |
| 4 | 5.4 | 109.9 | 32.5 | 1.04 | 0.529114331 | 1.10 |

Mengingat bahwa dibawah lapisan lempung yang mengalami konsolidasi dijumpai adanya lapisan pasir yang permeable maka tekanan air pori akan terdisipasi dalam dua arah yaitu keatas dan kebawah lapisan lempung tersebut. Dengan demikian maka drainase yang terjadi adalah double drainage, sehingga panjang lintasan drainase yang digunakan dalam perhitungan adalah $0.5 H$.

Tabel 4.7 Vertical Degree of Consolidation

| t (hari) | t (tahun) | Tv | Cv (m/hari) | Hdr ² | Uav (%) | Sc (m) |
|----------|-----------|---------|-------------|------------------|---------|--------|
| 0 | 0.00 | 0 | 0.003024 | 25 | 0 | 0 |
| 27.38426 | 0.08 | 0.00196 | 0.003024 | 25 | 0.05 | 0.06 |
| 109.6768 | 0.30 | 0.00785 | 0.003024 | 25 | 0.1 | 0.11 |
| 247.2966 | 0.68 | 0.0177 | 0.003024 | 25 | 0.15 | 0.17 |
| 438.707 | 1.20 | 0.0314 | 0.003024 | 25 | 0.2 | 0.22 |
| 686.0036 | 1.88 | 0.0491 | 0.003024 | 25 | 0.25 | 0.28 |
| 987.7894 | 2.71 | 0.0707 | 0.003024 | 25 | 0.3 | 0.33 |
| 1344.064 | 3.68 | 0.0962 | 0.003024 | 25 | 0.35 | 0.39 |
| 1760.417 | 4.82 | 0.126 | 0.003024 | 25 | 0.4 | 0.44 |
| 2221.478 | 6.09 | 0.159 | 0.003024 | 25 | 0.45 | 0.50 |
| 2738.426 | 7.50 | 0.196 | 0.003024 | 25 | 0.5 | 0.55 |
| 3339.203 | 9.15 | 0.239 | 0.003024 | 25 | 0.55 | 0.61 |
| 3995.866 | 10.95 | 0.286 | 0.003024 | 25 | 0.6 | 0.66 |
| 4750.331 | 13.01 | 0.34 | 0.003024 | 25 | 0.65 | 0.72 |
| 5630.539 | 15.43 | 0.403 | 0.003024 | 25 | 0.7 | 0.77 |
| 6664.435 | 18.26 | 0.477 | 0.003024 | 25 | 0.75 | 0.83 |
| 7921.875 | 21.70 | 0.567 | 0.003024 | 25 | 0.8 | 0.88 |
| 9556.548 | 26.18 | 0.684 | 0.003024 | 25 | 0.85 | 0.94 |
| 11847.88 | 32.46 | 0.848 | 0.003024 | 25 | 0.9 | 0.99 |
| 15773.89 | 43.22 | 1.129 | 0.003024 | 25 | 0.95 | 1.05 |
| 18666.01 | 51.14 | 1.336 | 0.003024 | 25 | 0.97 | 1.07 |
| 20957.34 | 57.42 | 1.5 | 0.003024 | 25 | 0.98 | 1.08 |
| 24883.35 | 68.17 | 1.781 | 0.003024 | 25 | 0.998 | 1.10 |

Dalam bentuk grafik bisa di plot kurva penurunan konsolidasi terhadap waktu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12 dibawah ini :



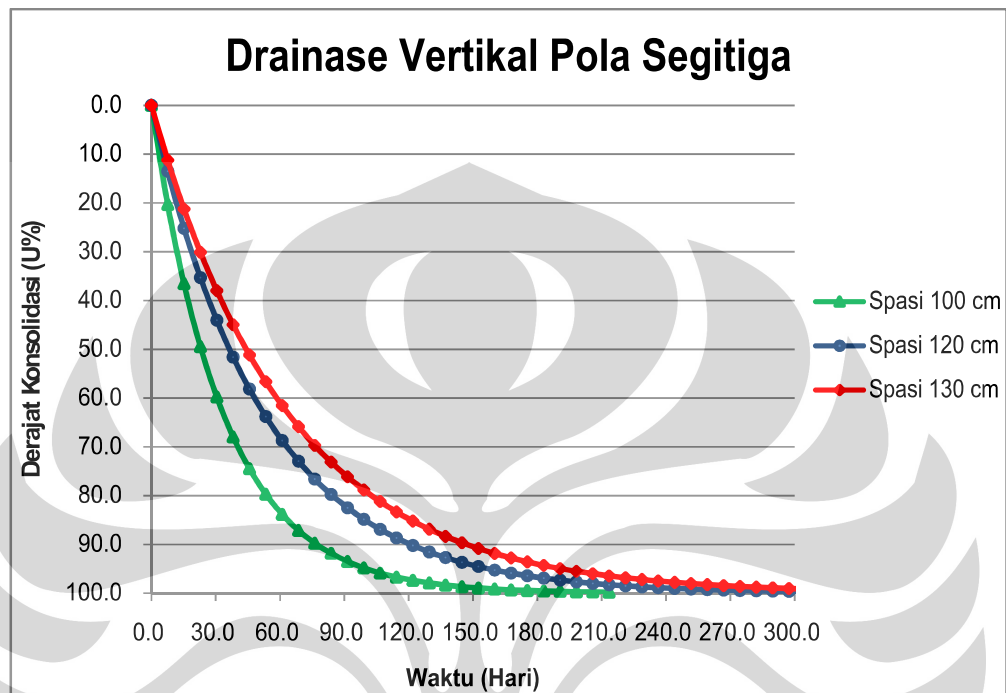
Gambar 4.12 Grafik Penurunan Konsolidasi vs Waktu (Hari)

Dari grafik yang ditunjukkan di atas penurunan terjadi dalam waktu yang relative lama yaitu kurang lebih 70 tahun. Untuk itu perlu dilakukan rekayasa geoteknik untuk mempercepat proses terjadinya konsolidasi. Adapun salah satu cara yang dapat diterapkan untuk percepatan waktu penurunan konsolidasi adalah dengan menggunakan drainase vertikal.

4.4 PERBAIKAN TANAH DENGAN DRAINASE VERTIKAL

Pemilihan alternatif perbaikan tanah menggunakan drainase vertikal dengan surcharge dikarenakan alasan efektifitas baik dari sisi teknis maupun biaya. Dengan menggunakan drainase vertikal yang disertai *surcharging* maka besarnya *settlement* pasca konstruksi dapat diperkecil, waktu konsolidasi dipercepat dan daya dukung tanah dasar diperbesar.

Berdasarkan pola konfigurasi drainase vertikal serta jarak antar titik drainase vertikal maka hubungan antara waktu dengan derajat konsolidasi dapat dilihat sebagai berikut :



Gambar 4.13 Hubungan Antara Derajat Konsolidasi dan Waktu untuk Berbagai Jarak Drainase Vertikal dengan Konfigurasi Segitiga

Berdasarkan hubungan yang ditunjukkan pada pada Gambar 4.13, terlihat bahwa derajat konsolidasi sebesar 90% dalam waktu 4 bulan dapat dicapai jika konfigurasi drainase vertikal yang digunakan adalah dalam bentuk grid segitiga dengan spasi 1.2 m. Dengan demikian maka konfigurasi yang digunakan dalam analisis selanjutnya adalah drainase vertikal dengan bentuk grid segitiga dan memiliki jarak antar titik sebesar 1.2 m, dan perbandingan nilai $C_v/C_h = (0.5-2.0)$ → digunakan nilai perbandingan 1.2.

Tabel 4.8 Hubungan Waktu Tunggu Tahapan Timbunan dan Derajat Konsolidasi

| Tahapan Timbunan | Tinggi Timbunan Initial (m) | U% | | Waktu Tunggu (Bulan) | |
|------------------|-----------------------------|------|------|----------------------|-----|
| Awal | 3 | 0.62 | 0.43 | 1.7 | 1 |
| 1 | 3.65 | | 0.75 | | 3.1 |
| 2 | 4.3 | 0.83 | | 0.9 | |
| 3 | 4.95 | | | | |
| 4 | 5.4 | | | | |

4.4.1 Permodelan Drainase Vertikal dengan PLAXIS

Oleh karena tidak tersedianya pilihan material Drainase Vertikal pada PLAXIS version 7.2, maka drainase vertikal akan dimodelkan dengan geometri tanah. Untuk itu, dibutuhkan ekuivalensi terlebih dahulu untuk nilai E dan k baik untuk tanah eksisting itu sendiri dan juga untuk tanah sebagai Drainase Vertikalnya.

Adapun langkah yang dilakukan dalam analisis tersebut terdiri dari:

1. Menentukan parameter modulus elastisitas tanah ekuivalen, E, yang sesuai. Hal ini dilakukan dengan cara analisis balik (*back analysis*) yaitu membandingkan besarnya penurunan berdasarkan metoda elemen hingga dan berdasarkan teori 1-D dari Terzaghi.
2. Menentukan parameter *permeability* tanah ekuivalen yang sesuai untuk pemodelan vertical drain. Hal ini juga dilakukan dengan cara analisis balik (*back analysis*) yaitu dengan membandingkan kecepatan penurunan antara hasil perhitungan berdasarkan metoda elemen hingga dan perhitungan manual.
3. Melakukan analisis terhadap waktu tunggu konsolidasi yang diperlukan (*time rate analysis*) sehingga dimungkinkan untuk melakukan penambahan tinggi timbunan hingga mencapai timbunan final (Hpreloading) dengan aman.

Universitas Indonesia

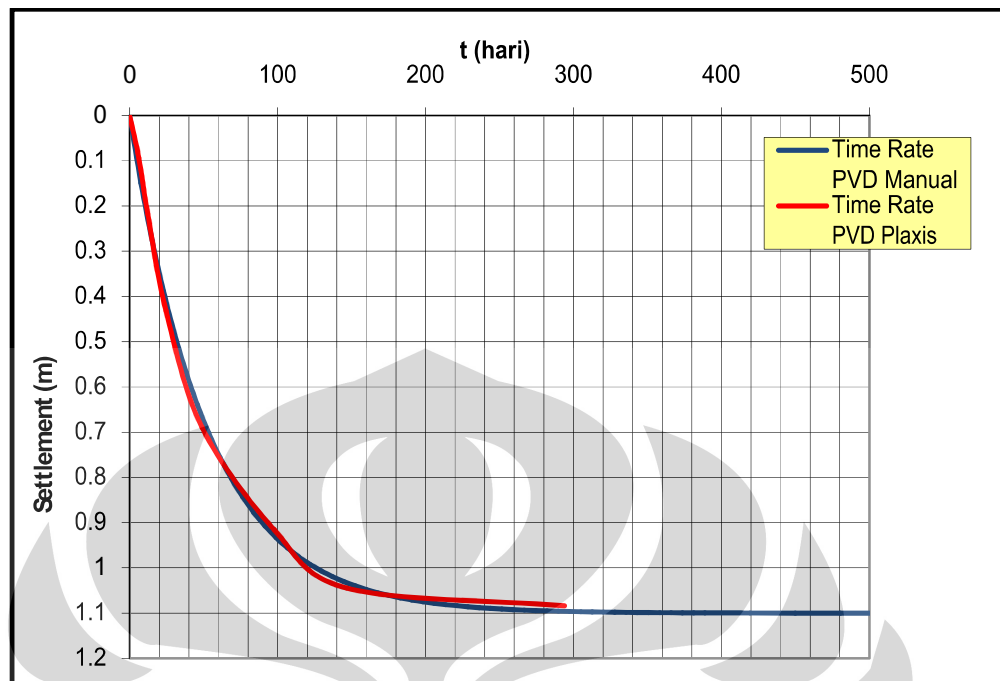
4. Analisis terhadap waktu tunggu penimbunan akhir yang diperlukan hingga penurunan pada tanah dasar akibat beban operasional rencana diperkirakan sudah terlampaui.

Penimbunan dilakukan hingga timbunan final mencapai ketinggian +4.4m. Timbunan direncanakan diberikan dalam 5 tahap yang terdiri dari:

- Timbunan Awal = +2 m
- Timbunan Tahap-1 = +2.65 m
- Timbunan Tahap-2 = +3.3 m
- Timbunan Tahap-3 = +3.95 m
- Timbunan Tahap-4 = +4.4 m

Untuk setiap tahap penimbunan, akan terjadi penurunan tersendiri. Ekuivalensi tanah akan dilakukan setiap penurunan akibat penambahan tinggi timbunan

Penentuan parameter ekuivalen untuk keperluan analisis menggunakan metoda elemen hingga dilakukan baik untuk parameter modulus elastisitas maupun permeabilitas tanah dasar dengan cara melakukan analisis balik.



Gambar 4.14 Perbandingan Time Rate Hasil Analisis Ekuivalensi Parameter Eksisting Tanah Dasar Akibat Beban Timbunan Setinggi 5.4 meter Menggunakan Teori Konsolidasi 1-D Terzaghi dengan Teori Elemen Hingga

Parameter ekuivalen hasil analisis balik dengan langkah seperti yang diuraikan diatas dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 4.9 Parameter Ekuivalen untuk Analisis Menggunakan Metoda Elemen Hingga

| Tinggi Timbunan (m) | Penurunan (m) | Modulus Elastisitas (KN/m ²) | Permeabilitas (cm/sec) |
|---------------------|---------------|--|------------------------|
| 5.4 (tanah) | 1.1 | 382 | 6.94E-07 |
| 5.4 (PVD) | 1.1 | 650 | 2.31E-04 |

4.4.2 Kenaikan Kuat Geser Tiap Tahapan Timbunan (*Gain Strength*)

Pada setiap penambahan timbunan akan terjadi kenaikan tegangan air pori pada tanah lunak yang secara perlahan-lahan akan berkurang diikuti dengan meningkatnya tegangan efektif. Meningkatnya tegangan efektif maka daya dukung tanah lunak tersebut juga akan bertambah. Oleh karena

Universitas Indonesia

itu pada pekerjaan penimbunan bertahap, kecepatan pekerjaan penimbunan ditentukan oleh kecepatan meningkatnya daya dukung tanah lunak akibat pekerjaan penimbunan pada tanah lunak pada tahap sebelumnya.

Untuk tanah kohesif kenaikan kekuatan tanah adalah :

$$C = 0.22 \cdot s'$$

Sebelum ada timbunan atau pembebanan :

$$C_0 = C_{\text{tanah asli}}$$

Setelah timbunan awal (tahap 1) :

$$C = C_0 + 0.22 \cdot s'_1$$

Setelah timbunan berikutnya (tahap 2) :

$$C = C_0 + 0.22 \cdot s'_1 + 0.22 \cdot s'_2$$

Dan begitu selanjutnya sampai dengan tahap terakhir.

(sumber : An Introduction to Geotechnical Engineering Robert D.Holtz, William D.Kovacs)

Timbunan Awal (3 m)

- Penurunan yang terjadi : 0.71 m
- Gain of Strength : $S_u = c + \sigma' \cdot \tan \phi'$
- Jika terdisipasinya tegangan air pori 100% maka :
 $S_{u1} = 6 + 0.22 [(16 \times 2) + ((17-10) \times 1)] = 14.58 \text{ KN/m}^2$.

Timbunan 1 (3,65 m)

- Penurunan yang terjadi : 0.84 m
- Gain of Strength : $S_u = c + \sigma' \cdot \tan \phi'$
- $S_{u2} = c_1 + 0.22 \cdot s_2$
 Jika terdisipasinya tegangan air pori 100% maka :
 $S_{u2} = 14.58 + [0.22 (16 \times 0,65) \times (0.62/0.9)] = 16.16 \text{ KN/m}^2$

$$H_{cr} = \frac{5.14 \cdot S_U}{\gamma \cdot SF}$$

$$= \frac{5.14 \cdot 16.16}{16.1.3} = 3.9 \text{ m}$$

Maka, tinggi timbunan kritis tahap 1 adalah $3.9 \text{ m} - 3 \text{ m} = 0.9 \text{ m}$.
Penimbunan yang dilakukan pada tahap ini adalah 0.65 m .

Timbunan 2 (4,3 m)

- Penurunan yang terjadi : 0.95 m
- Gain of Strength : $S_u = c + \sigma' \cdot \tan \phi'$

$$S_{u3} = c_2 + 0.22 \cdot s_3$$

Jika terdisipasinya tegangan air pori 100% maka :

$$S_{u3} = 16.16 + 0.22 (16 \times 0,65) \times (0.75/0.9) = 18.07 \text{ KN/m}^2$$

$$H_{cr} = \frac{5.14 \cdot S_U}{\gamma \cdot SF}$$

$$= \frac{5.14 \cdot 18.07}{16.1.3} = 4.64 \text{ m}$$

Maka, tinggi timbunan kritis tahap 2 adalah $4.5 \text{ m} - 3.65 \text{ m} = 0.82 \text{ m}$.
Penimbunan yang dilakukan pada tahap ini adalah 0.65 m .

Timbunan 3 (4,95 m)

- Penurunan yang terjadi : $1,04 \text{ m}$
- Gain of Strength : $S_u = c + \sigma' \cdot \tan \phi'$

$$S_{u4} = c_3 + 0.22 \cdot s_4$$

Jika terdisipasinya tegangan air pori 100% maka :

$$S_{u4} = 18.07 + 0.22 (16 \times 0,65) \times (0.83/0.9) = 20.18 \text{ KN/m}^2$$

$$H_{cr} = \frac{5.14 \cdot S_U}{\gamma \cdot SF}$$

$$= \frac{5.14 \cdot 20.18}{16.1.3} = 5.19 \text{ m}$$

Maka, tinggi timbunan kritis tahap 3 adalah $5.0 \text{ m} - 4.3 \text{ m} = 0.68 \text{ m}$.
Penimbunan yang dilakukan pada tahap ini adalah 0.65 m .

Timbunan 4 (5,43 m)

- Penurunan yang terjadi : $1,1 \text{ m}$
- Gain of Strength : $S_u = c + \sigma' \cdot \tan \phi'$

$$S_{u5} = c_4 + 0.22 \cdot s_5$$

Jika terdisipasinya tegangan air pori 100% maka :

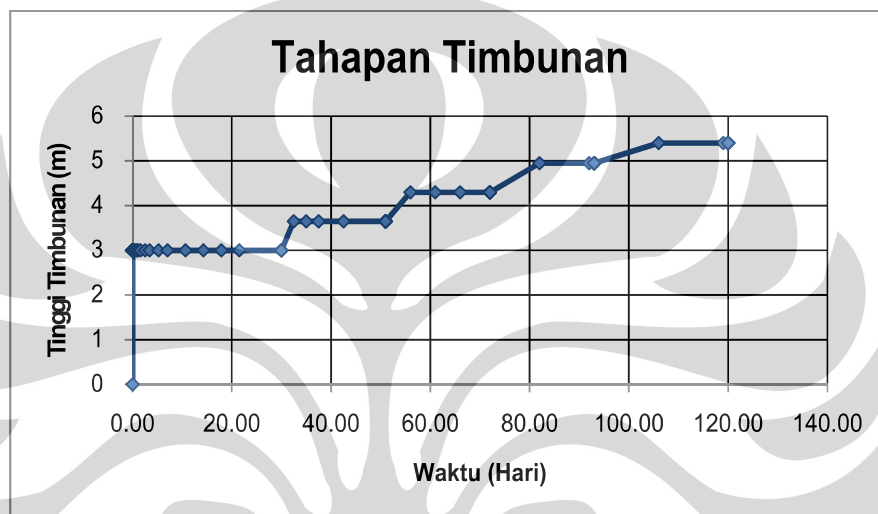
$$S_{u5} = 20.18 + 0.22 (16 \times 0,45) \times (0.9/0.9) = 21.76 \text{ KN/m}^2$$

$$H_{cr} = \frac{5.14 \cdot S_U}{\gamma \cdot SF}$$

$$= \frac{5.14 \cdot 21.76}{16.1.3} = 5.6 \text{ m}$$

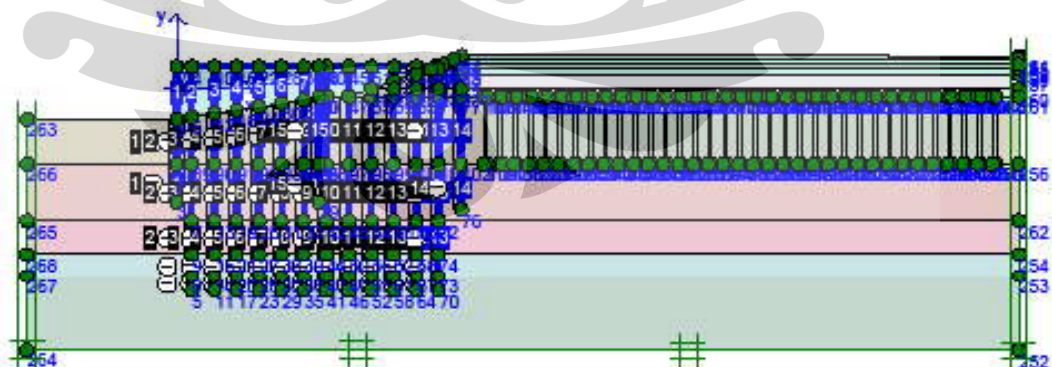
Maka, tinggi timbunan kritis tahap 4 adalah $5.4 \text{ m} - 4.95 \text{ m} = 0.45 \text{ m}$.

Penimbunan yang dilakukan pada tahap ini adalah 0.45 m.

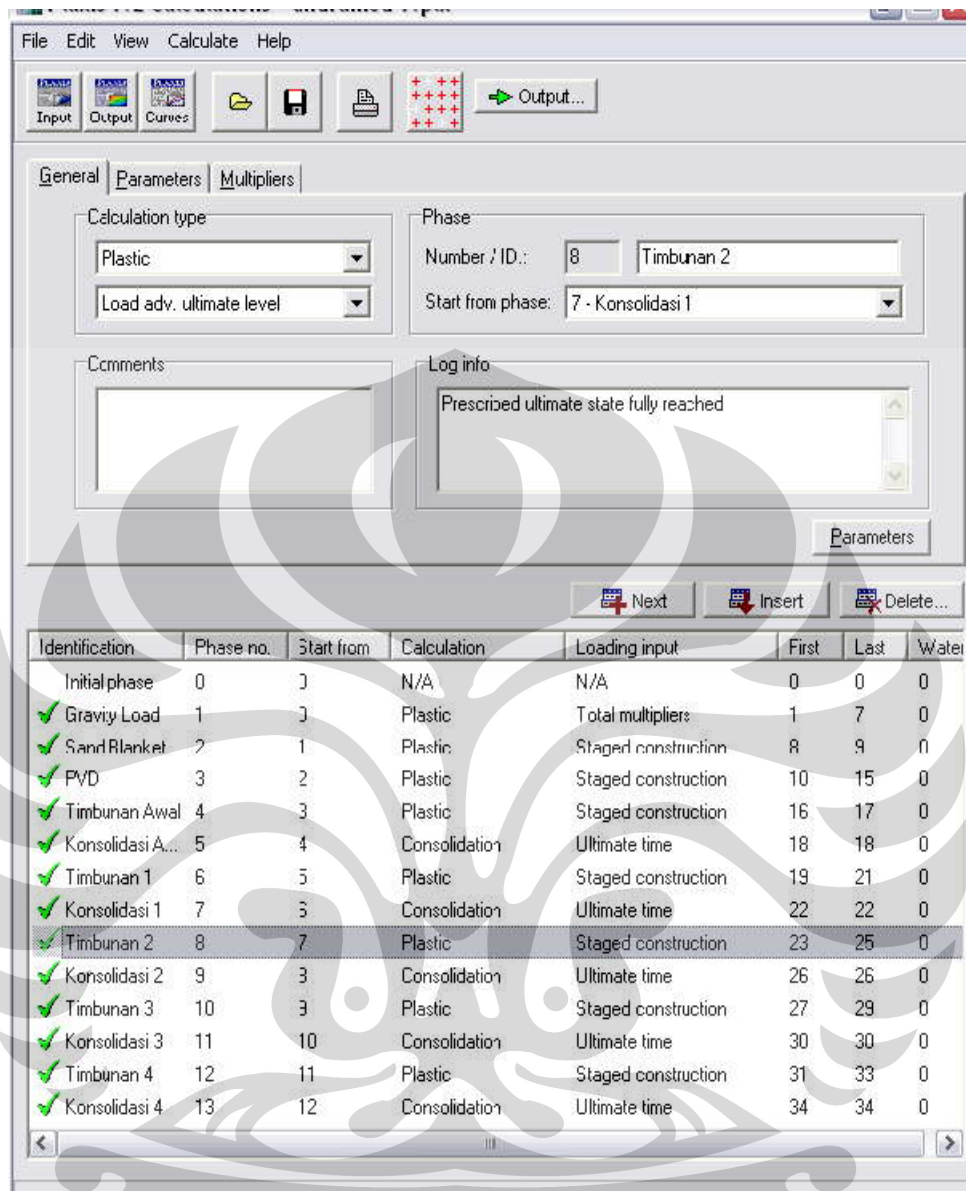


Gambar 4.15 Tinggi Tahapan Timbunan vs Waktu Tunggu

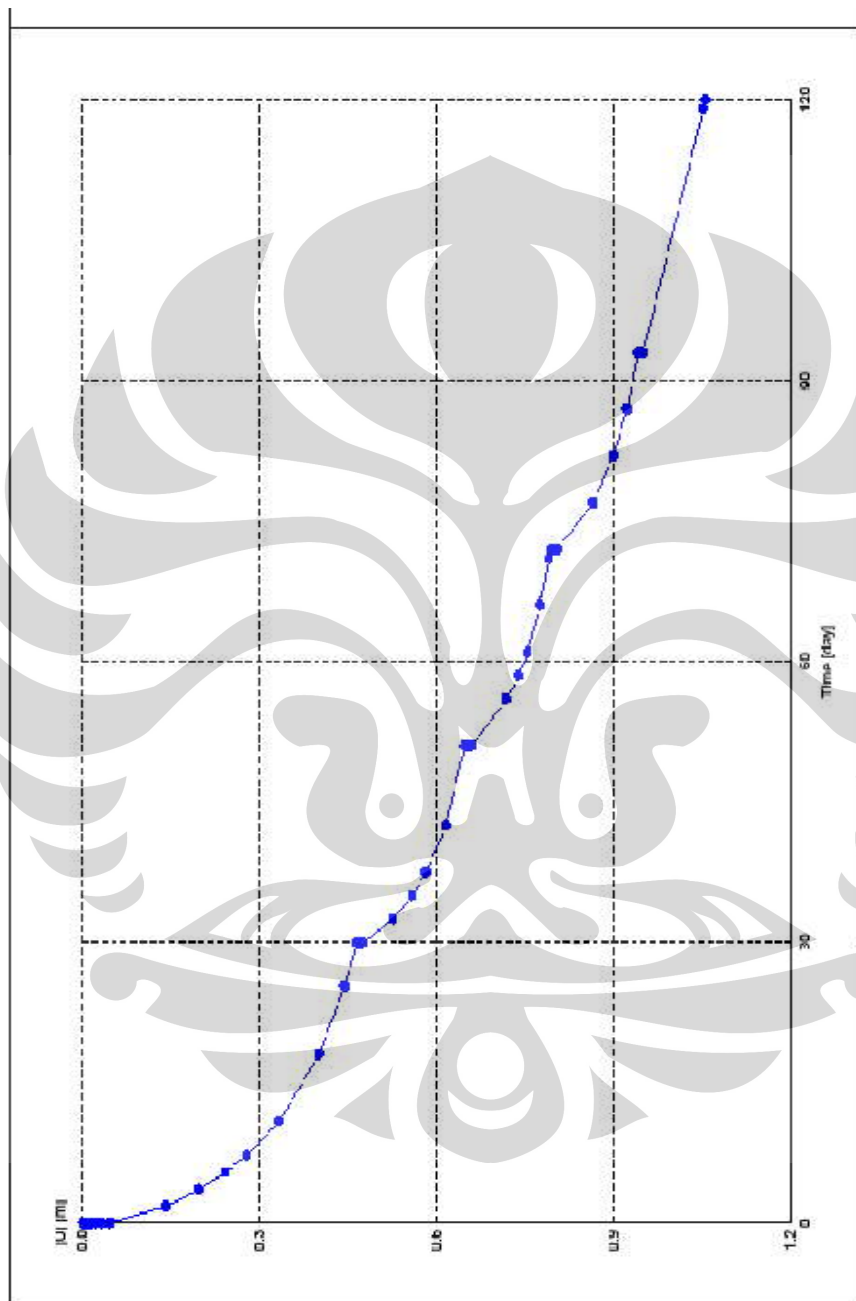
4.5 HASIL DAN ANALISIS PENURUNAN



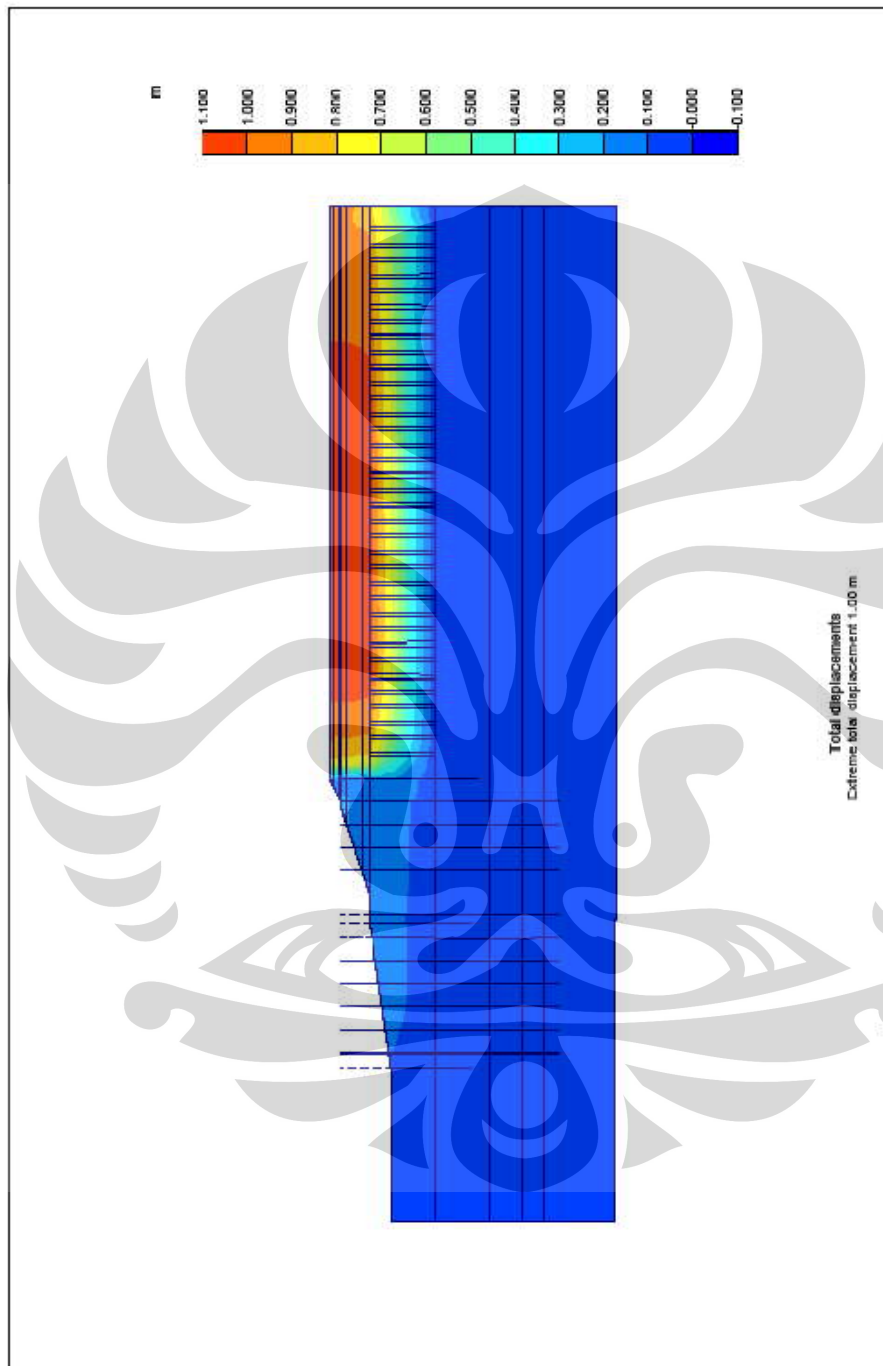
Gambar 4.16 Permodelan Timbunan dan Drainase Vertikal



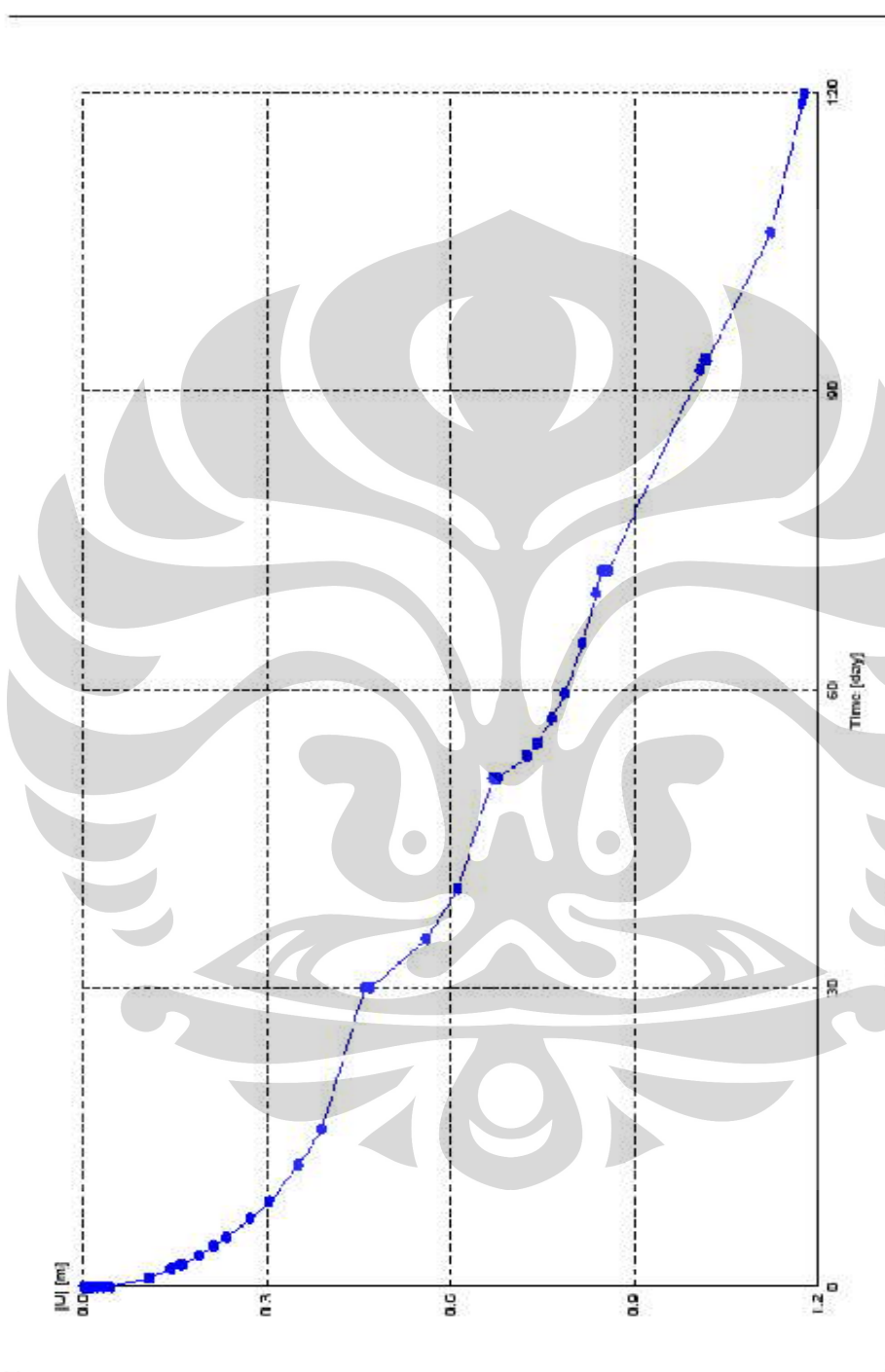
Gambar 4.17 Calculation PLAXIS



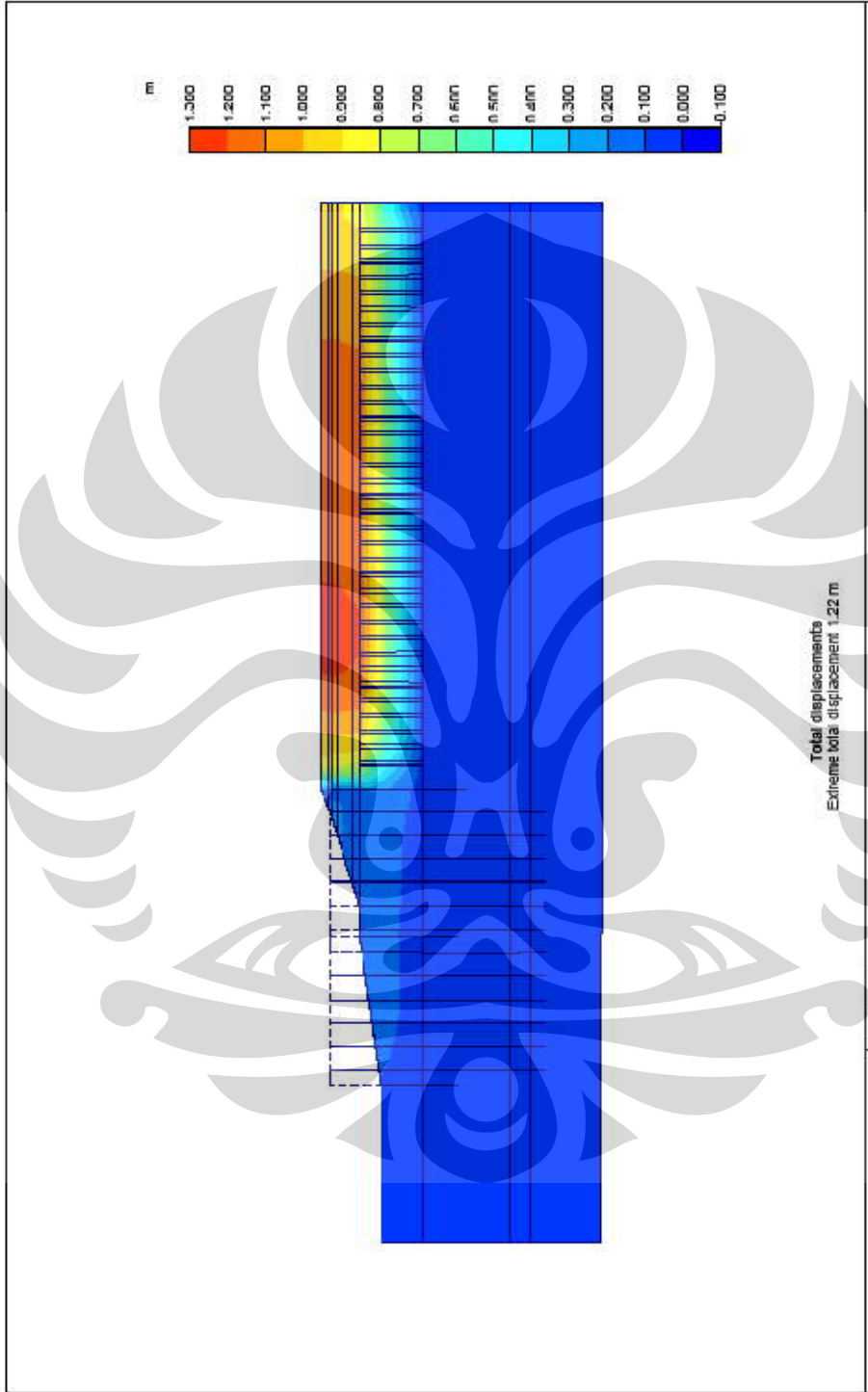
Gambar 4.18 Grafik Penurunan vs Waktu Parameter Undrained (dengan Gain Strength)



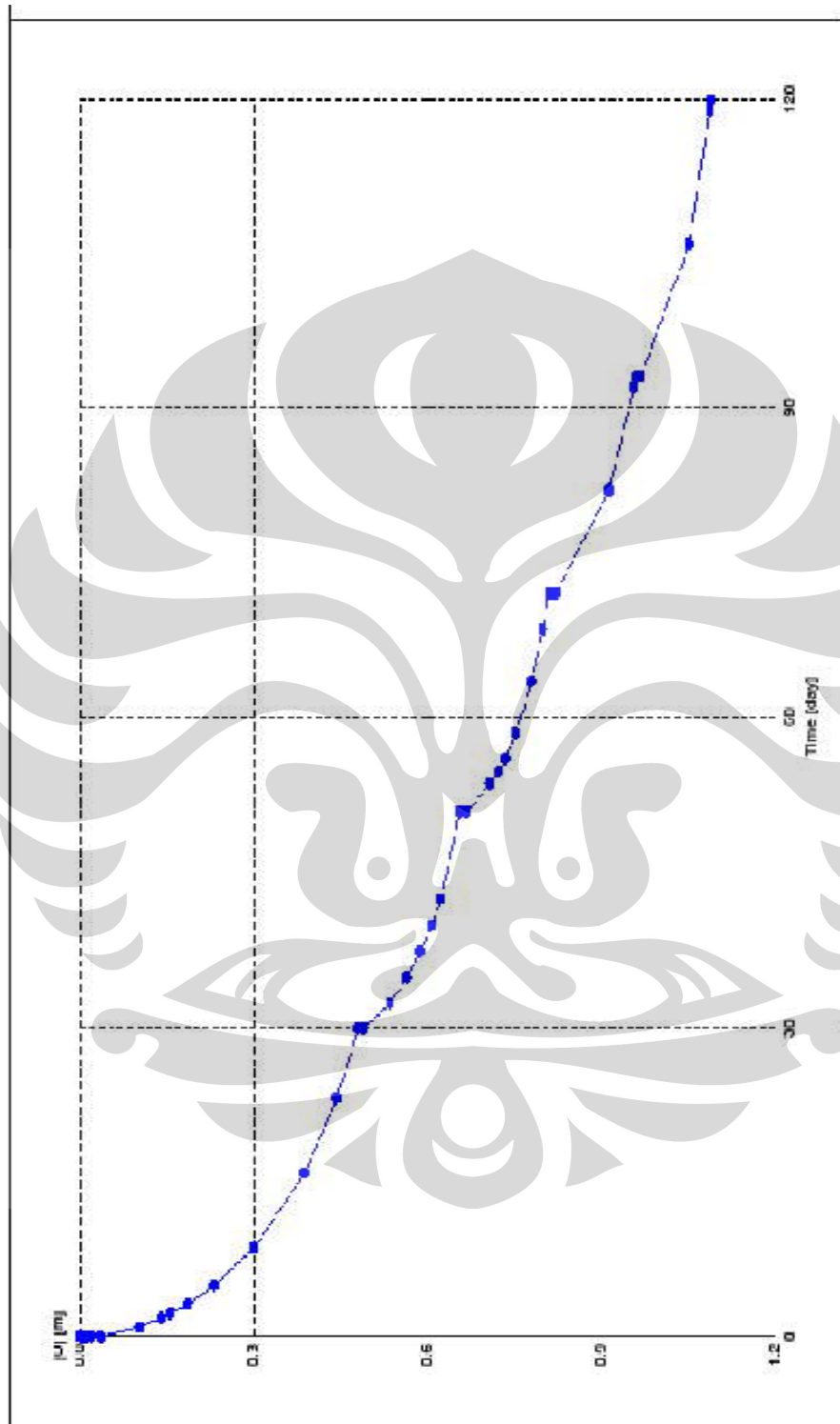
Gambar 4.19 Penurunan Total (1.08m) dengan Parameter Undrained (Gain Strength)



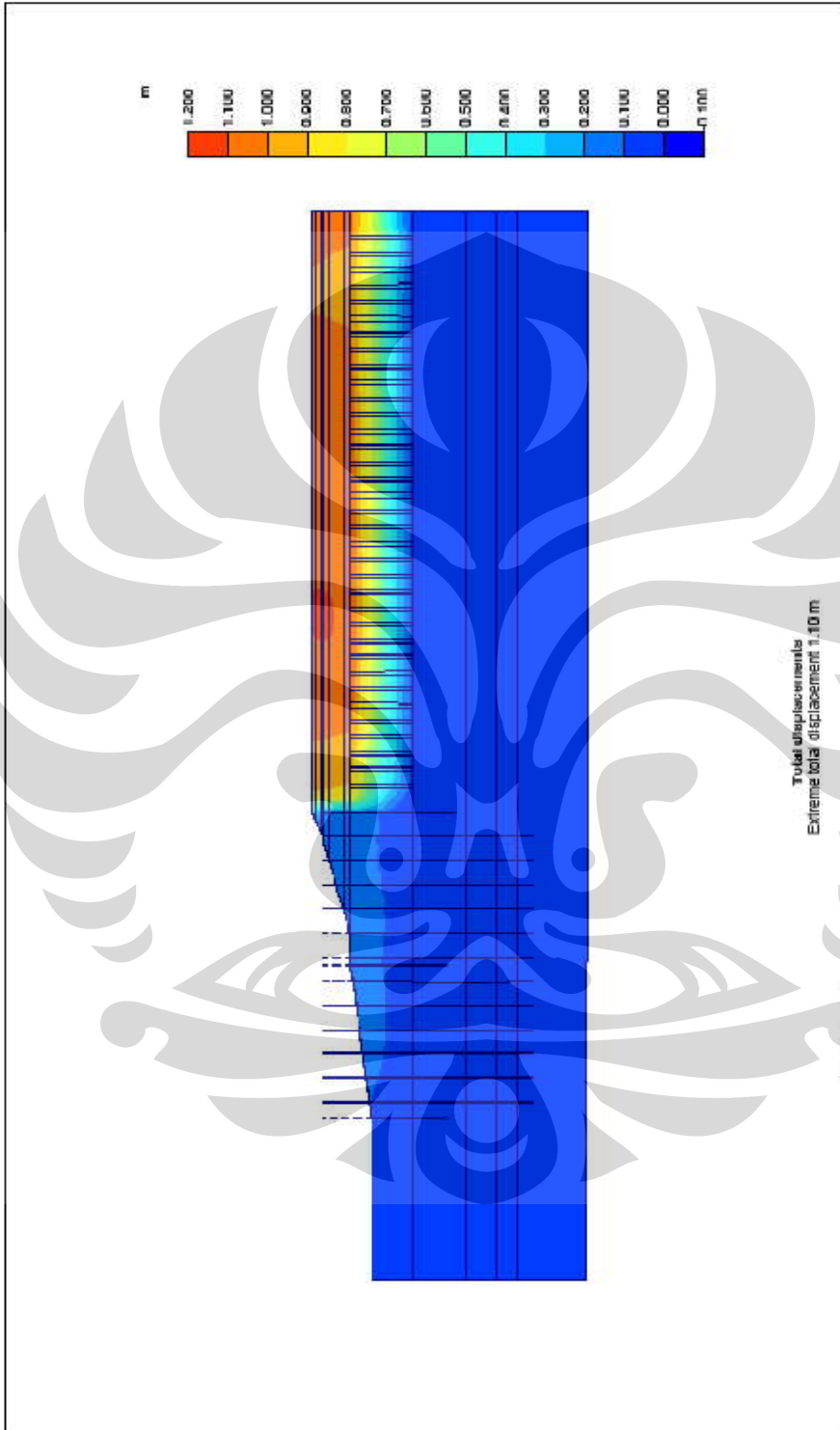
Gambar 4.20 Grafik Penurunan vs Waktu Parameter Undrained (tanpa Gain Strength)



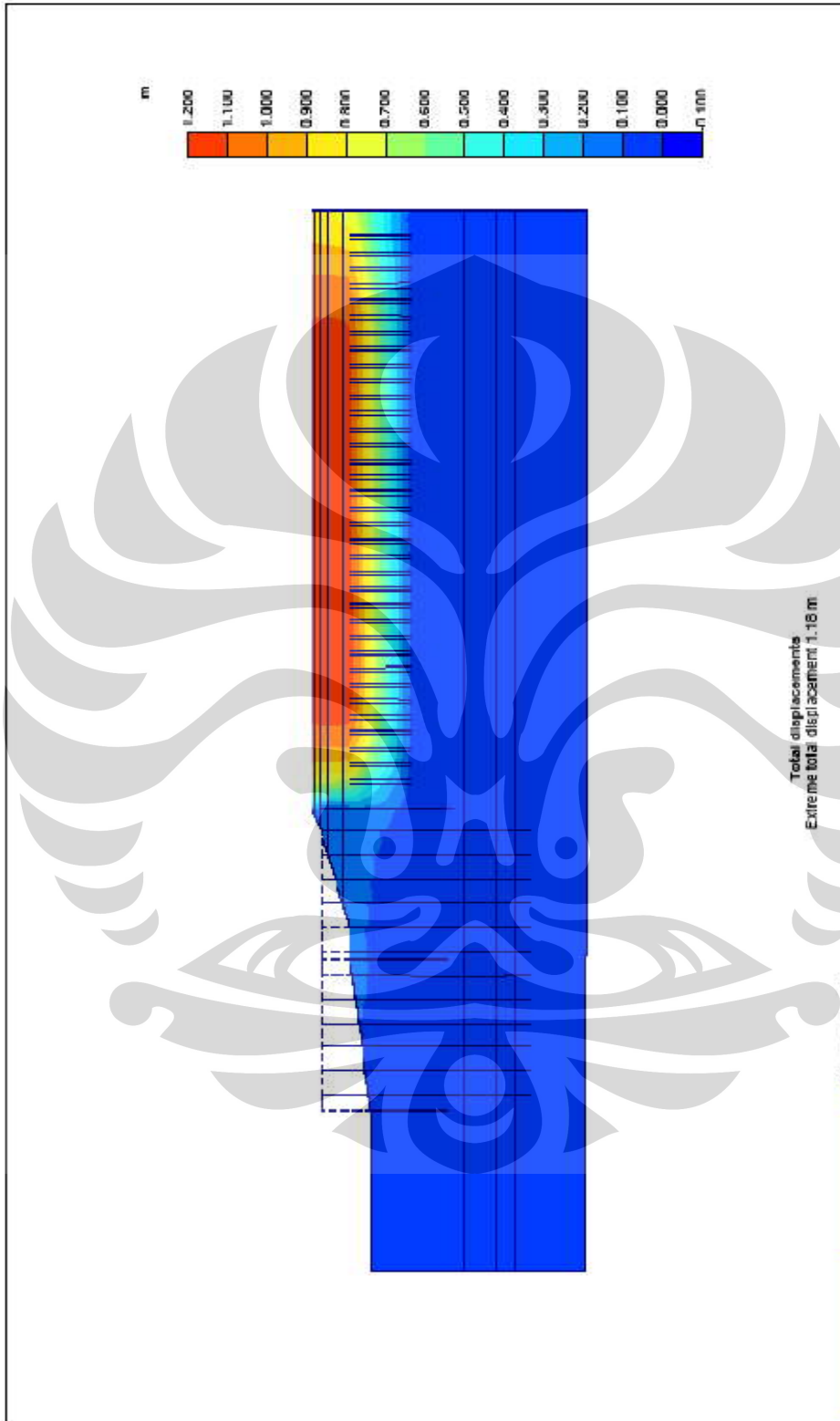
Gambar 4.21 Penurunan Total (1.22 m) dengan Parameter Undrained (Tanpa Gain Strength)



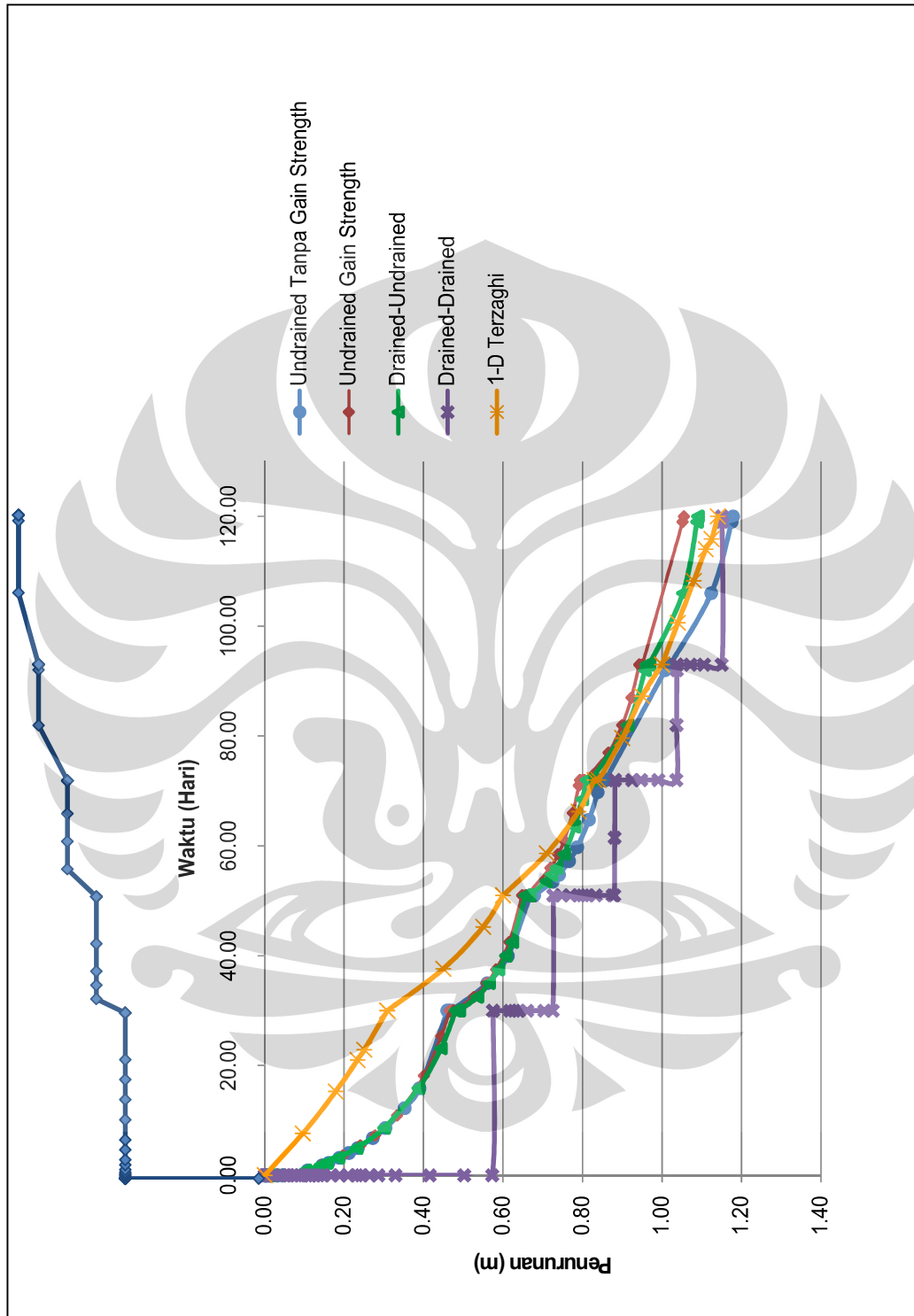
Gambar 4.22 Grafik Penurunan vs Waktu Parameter Drained Kondisi Undrained



Gambar 4.23 Penurunan Total (1.10 m) dengan Parameter Drained Kondisi Undrained



Gambar 4.25 Penurunan Total (1.18 m) dengan Parameter Drained Kondisi Drained



Tabel 4.10 Perbandingan Penurunan Total

| Material Type | Parameter | Penurunan (m) |
|---------------|---------------------------------|---------------|
| Undrained | Undrained | 1.08 |
| Undrained | Undrained (tanpa Gain Strength) | 1.22 |
| Undrained | Drained | 1.10 |
| Drained | Drained | 1.18 |

Berdasarkan hasil perhitungan PLAXIS tersebut di atas, dapat dilihat bahwa ternyata untuk parameter *Undrained* (dengan *gain strength*) dan *Drained* tidak jauh berbeda hasil penurunan yang dihasilkannya yaitu hanya berbeda 2%. Sedangkan, ternyata dengan untuk parameter *Undrained* dengan memasukkan nilai *gain strength* hasil perhitungan manual dengan tanpa memasukkan nilai *gain strength*, terdapat perbedaan 11%.

Pada parameter *Drained* itu sendiri terdapat perbedaan jika tipe material pada PLAXIS dibedakan yaitu *Undrained* dan *Drained*, dengan selisih perbedaan hingga 7%.

Jika dibandingkan dengan hasil penurunan *One Dimensional Terzaghi*, ternyata yang paling mendekati adalah hasil perhitungan PLAXIS dengan menggunakan parameter *Undrained* (dengan *gain strength*) dan juga parameter *Drained* (material type *Undrained*).

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

1. Proses konsolidasi yang terjadi pada timbunan dermaga berlangsung cukup lama sehingga diperlukan suatu cara untuk mempercepat terjadinya konsolidasi yaitu dengan drainase vertikal.
2. Pembangunan konstruksi timbunan setinggi +4,5 meter untuk metoda percepatan konsolidasi dengan drainase vertikal dilakukan bertahap, dimana lapisan tanah dasar pertama berada di elevasi 1 m dibawah muka air tanah (0,0).
3. Tahapan timbunan tanah pada dermaga adalah:
 - ✓ Tahapan 1 adalah timbunan setinggi +2 meter
 - ✓ Tahapan 2 adalah timbunan setinggi +2,65 meter
 - ✓ Tahapan 3 adalah timbunan setinggi +3,3 meter
 - ✓ Tahapan 4 adalah timbunan setinggi +3,95 meter
 - ✓ Tahapan 5 adalah timbunan setinggi +4,4 meter
4. Tinggi timbunan akhir rencana adalah +3 meter dengan tinggi pre-loading +4,4 meter, dengan prediksi penurunan 1,1 meter.
5. Analisis konsolidasi dengan software PLAXIS dilakukan dengan model *plain-strain*.
6. Penggunaan drainase vertikal mempercepat waktu konsolidasi yang cukup signifikan, yaitu 4 bulan untuk mencapai derajat konsolidasi 90%.

7. Drainase vertikal yang digunakan adalah pola segi empat dengan panjang 10 meter dan spasi antar drainase vertikal 1.2 meter.
8. Pada jarak pemasangan drainase vertikal semakin rapat maka penurunan akan semakin cepat.
9. Penurunan yang terjadi untuk tiap parameter dapat dilihat pada tabel berikut :

| Material Type | Parameter | Penurunan (m) |
|----------------------|---------------------------------|----------------------|
| Undrained | Undrained | 1.08 |
| Undrained | Undrained (tanpa Gain Strength) | 1.22 |
| Undrained | Drained | 1.10 |
| Drained | Drained | 1.18 |

10. Selisih perbedaan parameter *Undrained (Gain Strength)* dengan tanpa *Gain Strength* ternyata cukup besar, yaitu sebesar 11%.
11. Selisih antara parameter *Drained Material Type Undrained* dengan *Material Type Drained* adalah sebesar 7%.
12. Perbandingan parameter *Undrained (Gain Strength)* dengan *Drained (Material Type Undrained)* cukup kecil, yaitu hanya 2% saja.
13. Parameter tanah *Undrained (Gain Strength)* dan *Drained (Material Type Undrained)* memiliki perbandingan yang relatif kecil terhadap hasil perhitungan *One Dimensional Consolidation* Terzaghi.
14. Walaupun tidak mendapatkan hasil yang persis sama, dapat disimpulkan bahwa permodelan tanah baik dengan input parameter *Drained* maupun *Undrained* dapat merepresentasikan tanah sebenarnya.

5.2 SARAN

1. Pada tugas akhir ini, semua pengolahan data, permodelan, serta analisis dilakukan dengan asumsi bahwa data yang tersedia benar. Hasil studi akan lebih baik lagi apabila terdapat kontrol yang besar akan validitas data yang digunakan, misalnya dengan melakukan percobaan laboratorium dan pengamatan lapangan sendiri.
2. Tersedianya data pengamatan di lapangan akan sangat baik, agar dapat digunakan sebagai bahan pembandingan dan dapat diketahui mana hasil perhitungan yang paling mendekati kondisi sebenarnya.
3. Pada pembangunan timbunan menggunakan drainase vertikal sebaiknya benar-benar diperhitungkan efisiensinya sehingga tidak hanya didapatkan waktu konsolidasi yang cepat tetapi dari sisi biaya juga dapat diperhitungkan.
4. Apabila tanah di area tersebut sangat lunak, sebaiknya lokasi pembangunan dipindahkan, karena bila berkonsentrasi hanya pada perkuatan tanah dasar maka hasil yang didapatkan tidak akan seimbang dengan usaha yang sudah dikeluarkan.
5. Metoda elemen hingga memang memberikan banyak keunggulan. Namun, metoda ini juga menuntut masukan parameter yang lebih *akurat*, tidak sekedar parameter γ (berat jenis), ϕ (sudut geser), dan c (kohesi). Tugas *engineer* adalah bagaimana meningkatkan teknik eksplorasi data dilapangan/laboratorium dan mengintrepetasikannya ke dalam parameter disain yang proporsional. Tanpa data masukan yang representatif, output PLAXIS tidak dapat diandalkan. *Adjustment* yang bersumber dari akumulasi pengalaman masih sangat penting untuk mengurangi kesalahan.

Universitas Indonesia

6. Melakukan analisis dengan model Hardening Soil dengan kasus dan parameter yang sama merupakan studi yang menarik untuk dipelajari lebih lanjut, agar dapat diketahui perbandingannya.



Universitas Indonesia

DAFTAR PUSTAKA

- Craig, R.F, Susilo, B. 1994. *Mekanika Tanah*, Edisi keempat, Department of Civil Engineering, University of Dundee.
- Das, Braja M. 1985. *Principles of Geotechnical Engineering*, Boston : PWS Publishing.
- Das, Braja M. 1987. *Advanced Soil Mechanics*. Singapore : McGraw-Hill Book Co.
- Federal Highway Administration. 1986. *Prefabricated Vertical Drains*. Turner Fairbank Highway Research Centre.
- Fitrianingsih, Eliyana. 2005. *Analisis Dari Suatu Timbunan Bertahap Di Atas Tanah Lunaka Dengan Menggunakan Vertikal Drain*. Bandung : Program Studi Teknik Sipil.
- G. N. Smith dan I. G. N. Smith. 1998. *Element of Soil Mechanics*, Blackwell Science, Bristol.
- Irsyam, Ir.Masyhur,MSE.,Ph.D. 2009. *Permasalahan Konstruksi di Atas Tanah Lunak*. Bandung : Program Studi Teknik Sipil ITB.
- J. E. Bowles. 1984. *Physical and Geotechnical Properties of Soils*. McGraw-Hill.
- K. Terzaghi, R. B. Peck dan G. Mesri. 1996 *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Canada : John Wiley & Sons
- Nawir, DR.IR.Hasbullah,MT. 2009. *Percepatan Konsolidasi dengan Preloading dan Vertical Drain*. Slide Kuliah
- PLAXIS Manual, Plaxis BV, Netherland
- R. D. Holtz dan W. D. Kovacs. 1981. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. New Jersey :Prentice-Hall.
- T.Stapelfeldt. *Preloading and Vertical Drain*. Helsinki University of Technology.
- Wijemunige, Piyasena, & Moh, Z.,C. 1989. *Trial Embankment with Stage Loading and Vertical Drain*. Kuala Lumpur : International Symposium.



BORING LOG

| | | | |
|--------------------|------------------------------|---------------|---------------------|
| PROJECT | : - | BORING METHOD | : CORING & SAMPLING |
| LOCATION | : Dok Koja Bahari, Tj. Priuk | SPT | : Automatic hammer |
| BORE HOLE NO. | : DB-1 | DATE | : 05 - 06 May, 2006 |
| DEPTH | : 30.45 m | | |
| COORDINATE | : - | | |
| ELEVATION | : - | | |
| GROUND WATER LEVEL | : -0.60 | | |

| SAMPLE | DEPTH (meter) | USCS CHART | GRAPH SYMBOL | ROCK/SOIL DESCRIPTION | DEPTH (meter) | qu (kg/cm ²) | SPT - N value | | | RECOVERY (%) | |
|--------|---------------|------------|--------------|---|---------------|---|---------------|--------------|---------------------|--------------|---------|
| | | | | | | | Depth (m) | BLOWS PER CM | N PER FOOT 40 80 | | |
| | 0.00 | GP | | FILL, boulder & sand, concrete fragment, dense. | | | | | | | |
| | 1.00 | SM | | SANDY SILT, dark grey, fine sand, few shell fragment, very loose. | | | 1.15 | 02/30 | | | |
| | | | | | | | | | 2.55 | 01/15 | |
| | | | | | | | | | 4.15 | 09/30 | |
| | 6.00 | | | | | CLAYEY SILT, dark grey, few shell fragments and fine sand, very soft to soft. | | | 5.70 | 04/30 | |
| | 7.00 | CH | | | | | 7.55 | 01/15 | | | |
| | 7.55 | | | | | | | | 9.15 | 04/30 | |
| | 12.00 | | | | | | | | 10.70 | 04/30 | |
| | 12.55 | | | | | | | | 12.70 | 04/30 | |
| | 14.50 | MH | | CLAYEY SILT, brownish grey, stiff to very stiff. | | | 14.15 | 09/30 | | | |
| | 15.50 | SP | | SILTY SAND, dark brown fine to coarse grained sand, dense. | | | 16.15 | 56/30 | | | |
| | 16.00 | | | | | | | | 17.70 | 65/30 | |
| | | | | | | | | | 19.15 | 53/30 | |
| | | | | | | | | | 20.70 | 44/30 | |
| | | | | | | | | | 22.15 | 39/30 | |
| | | | | | | | | | 23.55 | 50/10 | N > 100 |
| | | | | | | | 25.00 | 50/10 | N > 100 | | |
| | 27.00 | CH | | CLAYEY SILT, dark grey, hard. | | | 27.15 | 37/30 | | | |
| | | | | | | | 28.70 | 40/30 | | | |
| | 30.45 | | | END OF THIS BORING. | | | 30.15 | 40/30 | | | |

DR1 TW1 - Times-Normal

Plate

BORING LOG

| | | | |
|---------------|------------------------------|---------------|-----------------------|
| PROJECT | : - | BORING METHOD | : CORING & SAMPLING |
| LOCATION | : Dok Koja Bahari, Tj. Priok | SPT | : Automatic hammer |
| BORE HOLE NO. | : DB-2 | DATE | : 11 - 12 April, 2006 |
| DEPTH | : 30.45 m | | |
| COORDINATE | : - | | |
| ELEVATION | : - | | |
| WATER DEPTH | : 2.20 | | |





| SAMPLE | DEPTH (meter) | USCS CHART | GRAPH SYMBOL | ROCK/SOIL DESCRIPTION | DEPTH (meter) | qu (kg/cm ²) | SPT - N value | | | RECOVERY (%) |
|--------|---------------|------------|--------------|--|---------------|--------------------------|---------------|--------------|------------------------|--------------|
| | | | | | | | Depth (m) | BLOWS PER CM | N PER FOOT 40 80 | |
| | 0.00 | | | SANDY SILT, dark grey, fine sand, very loose. | | | | | | |
| | | ML | | | | | 1.00 | 01/55 | | |
| | | | | | | | 2.55 | 01/50 | | |
| | 4.50 | | | CLAYEY SILT, grey to dark grey, some fine sand, very soft. | | | 4.00 | 01/45 | | |
| | 5.50 | | | | | | 6.05 | 01/45 | | |
| | 6.05 | CH | | | | | 7.50 | 01/15 | | |
| | | | | | | | 9.00 | 01/45 | | |
| | 10.50 | | | CLAYEY SILT, greyish brown, medium stiff. | | | 11.20 | 06/30 | | |
| | 11.05 | | | | | | 12.70 | 08/30 | | |
| | | CH | | | | | 14.15 | 13/30 | | |
| | 15.50 | | | | | | 16.20 | 11/30 | | |
| | 16.05 | | | | | | 17.70 | 18/30 | | |
| | | | | | | | 19.15 | 27/30 | | |
| | 20.50 | | | CLAYEY SILT/SILTSTONE, greyish brown to dark brown, slightly cemented as siltstone, dense to very dense. | | | 20.70 | 40/30 | | |
| | | | | | | | 22.00 | 50/13 | N > 100 | |
| | | | | | | | 23.70 | 57/30 | | |
| | | | | | | | 25.00 | 50/10 | N > 100 | |
| | | | | | | | 26.55 | 50/13 | N > 100 | |
| | | | | | | | 28.00 | 50/10 | N > 100 | |
| | | | | | | | 29.15 | 50/30 | | |
| | 30.45 | | | END OF THIS BORING. | | | 30.15 | 34/30 | | |

DR2 TWT - Times-Normal

Plate

BORING LOG

| | |
|--|---|
| PROJECT : - LOCATION : Dok Koja Bahari, Tj. Priuk BORE HOLE NO. : SB-1 DEPTH : 15.45 m COORDINATE : - ELEVATION : - GROUND WATER LEVEL : -0.50 | BORING METHOD : CORING & SAMPLING SPT : Automatic hammer DATE : 02 - 03 April, 2006 |
|--|---|

| SAMPLE | DEPTH (meter) | USCS CHART | GRAPH SYMBOL | ROCK/SOIL DESCRIPTION | DEPTH (meter) | qu (kg/cm ²) | SPT - N value | | RECOVERY (%) | | |
|--------|---------------|------------|---|---|---------------|--------------------------|---------------|--------------|--------------|------------|----|
| | | | | | | | Depth (m) | BLOWS PER CM | | N PER FOOT | |
| | | | | | | | | 40 | 80 | 0 | 80 |
| | 0.00 | GP |  | FILL, boulder & sand, concrete fragment, dense. | | | | | | | |
| | | | | SANDY SILT, dark grey, fine sand, few shell fragment, very loose. | | | 1.00 | 01/15 | | | |
| | | SM |  | | | | 2.70 | 05/30 | | | |
| | | | | | | | 4.15 | 04/30 | | | |
| | 6.00 | | | CLAYEY SILT, dark grey, few shell fragments and fine sand, very soft to soft. | | | 5.55 | 01/45 | | | |
| | 7.00 | | | | | | 7.55 | 01/45 | | | |
| | 7.55 | | | | | | 9.15 | 01/50 | | | |
| | | CH |  | | | | 10.55 | 01/50 | | | |
| | 12.00 | | | | | | 12.70 | 02/30 | | | |
| | 12.55 | | | | | | 14.15 | 03/30 | | | |
| | 14.50 | | | CLAYEY SILT, brownish grey, stiff to very stiff. | | | 15.15 | 15/30 | | | |
| | 15.45 | MH |  | END OF THIS BORING. | | | | | | | |

SR1 TWT - Times-Normal

Plate

BORING LOG

| | | | |
|--------------------|------------------------------|---------------|-----------------------|
| PROJECT | : - | BORING METHOD | : CORING & SAMPLING |
| LOCATION | : Dok Koja Bahari, Tj. Priuk | SPT | : Automatic hammer |
| BORE HOLE NO. | : SB-2 | DATE | : 03 - 04 April, 2006 |
| DEPTH | : 15.45 m | | |
| COORDINATE | : - | | |
| ELEVATION | : - | | |
| GROUND WATER LEVEL | : -0.50 | | |

| SAMPLE | DEPTH (meter) | USCS CHART | GRAPH SYMBOL | ROCK/SOIL DESCRIPTION | DEPTH (meter) | qu (kg/cm ²) | SPT - N value | | | RECOVERY (%) | |
|--------|---------------|------------|--------------|---|---------------|---|---------------|--------------|------------------------|--------------|--|
| | | | | | | | Depth (m) | BLOWS PER CM | N PER FOOT 40 80 | | |
| | 0.00 | GP | | FILL, boulder & sand, concrete fragment, dense. | | | | | | | |
| | 1.20 | | | SANDY SILT, dark grey, fine sand, few shell fragment, very loose. | | | 1.00 | 50/05 | | | |
| | | SM | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 2.55 | 01/45 | | | |
| | | | | | | | 4.15 | 04/30 | | | |
| | 6.00 | | | | | CLAYEY SILT, dark grey, few shell fragments and fine sand, very soft to soft. | 5.70 | 04/30 | | | |
| | 7.00 | | | | | | 7.70 | 03/30 | | | |
| | 7.55 | CH | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 9.00 | 01/15 | | | |
| | 12.00 | | | | | | 10.55 | 01/45 | | | |
| | 12.55 | | | | | | 12.70 | 03/30 | | | |
| | | MH | | | | | | | | | |
| | 14.50 | | | | | CLAYEY SILT, brownish grey, stiff to very stiff. | 14.15 | 11/30 | | | |
| | 15.45 | | | END OF THIS BORING. | 15.15 | 20/30 | | | | | |

SR2 TWT - Times-Normal

Plate

BORING LOG

| | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| PROJECT : - | BORING METHOD : CORING & SAMPLING | SPT : Automatic hammer |
| LOCATION : Dok Koja Bahari, Tj. Priok | DATE : 15 April, 2006 | |
| BORE HOLE NO. : SB-4 | | |
| DEPTH : 15.45 m | | |
| COORDINATE : - | | |
| ELEVATION : - | | |
| GROUND WATER LEVEL : -0.40 m | | |

| SAMPLE | DEPTH (meter) | USCS CHART | GRAPH SYMBOL | ROCK/SOIL DESCRIPTION | DEPTH (meter) | q _u (kg/cm ²) | SPT - N value | | RECOVERY (%) | | | |
|--------|---------------|------------|--------------|--|---------------|--------------------------------------|---------------|--------------|--------------|------------|----|--|
| | | | | | | | Depth (m) | BLOWS PER CM | | N PER FOOT | | |
| | | | | | | | | 40 | 80 | 0 | 80 | |
| | 0.00 | SM | | SANDY SILT, dark grey, fine sand, few shell fragment, very loose. | | | 1.15 | 03/30 | | | | |
| | | | | | | | | | 2.70 | 07/30 | | |
| | | | | | | | | | 4.15 | 03/30 | | |
| | 5.50 | CH | | CLAYEY SILT, dark grey, few shell fragment and fine sand, very soft to soft. | | | 5.55 | 01/45 | | | | |
| | 7.00 | | | | | | | | 9.00 | 01/45 | | |
| | 7.55 | | | | | | | | 10.70 | 02/30 | | |
| | 12.00 | | | | | | | | 14.15 | 03/30 | | |
| | 12.55 | MH | | CLAYEY SILT, brownish grey, stiff. | | | 15.15 | 07/30 | | | | |
| | 14.50 | | | | | END OF THIS BORING. | | | | | | |
| | 15.45 | | | | | | | | | | | |

Plate

BORING LOG

| | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| PROJECT : - | BORING METHOD : CORING & SAMPLING | SPT : Automatic hammer |
| LOCATION : Dok Koja Bahari, Tj. Priok | DATE : 10 April, 2006 | |
| BORE HOLE NO. : SB-5 | | |
| DEPTH : 15.45 m | | |
| COORDINATE : - | | |
| ELEVATION : - | | |
| WATER DEPTH : 3.50 | | |

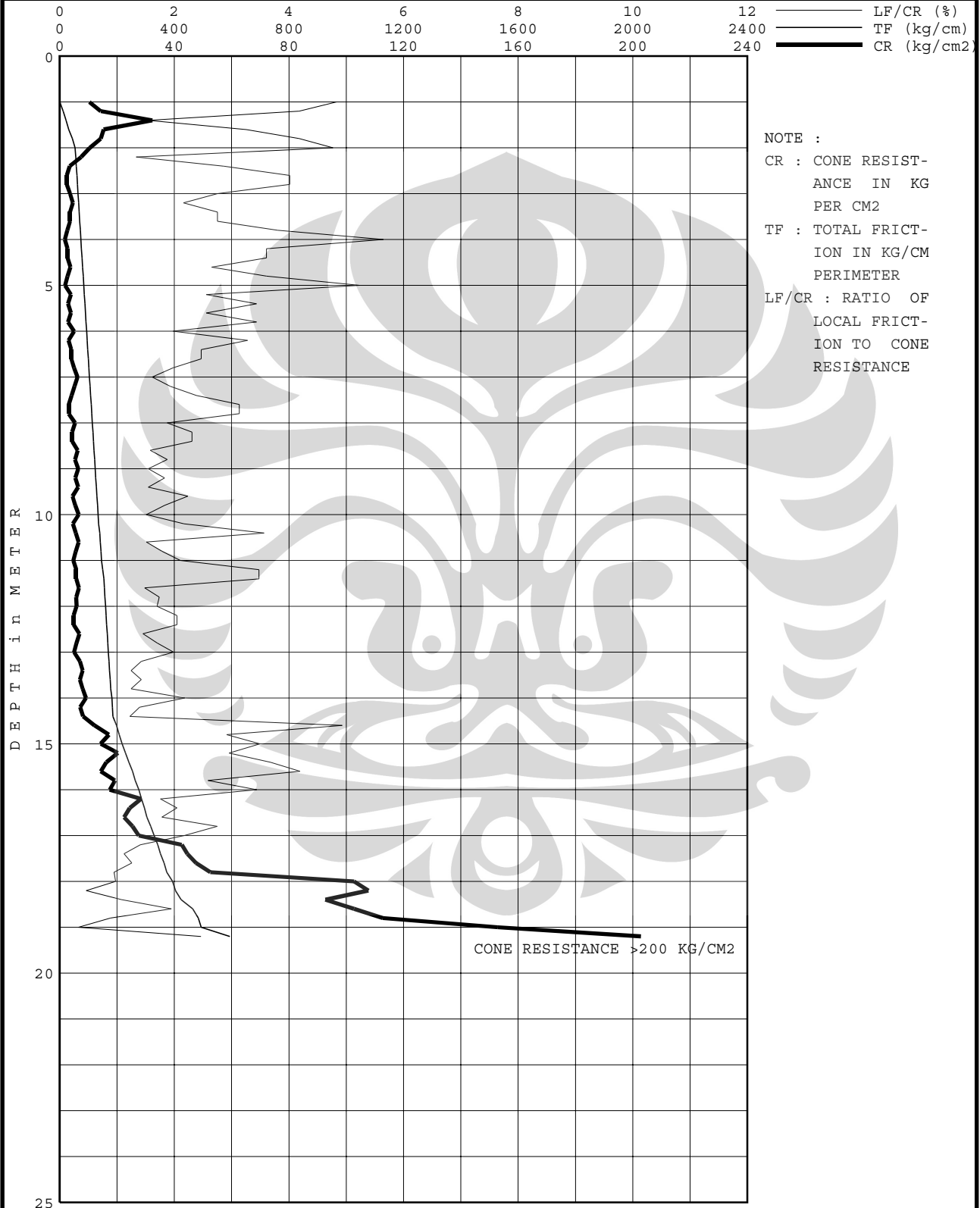
| SAMPLE | DEPTH (meter) | USCS CHART | GRAPH SYMBOL | ROCK/SOIL DESCRIPTION | DEPTH (meter) | qu (kg/cm ²) | SPT - N value | | | RECOVERY (%) | |
|--------|---------------|------------|--------------|--|---------------|--------------------------|---------------|--------------|---------------------|--------------|--|
| | | | | | | | Depth (m) | BLOWS PER CM | N PER FOOT 40 80 | | |
| | 0.00 | ML | | SANDY SILT, dark grey, fine grained sand, very loose. | | | | | | | |
| | 1.00 | | | 01/50 | | | | | | | |
| | 2.55 | | | | | | | | | | |
| | 3.00 | CH | | CLAYEY SILT, grey to dark grey, some fine sand, few shell fragment, very soft to soft. | | | | | | | |
| | 4.00 | | | | | | | | | | |
| | 4.55 | | | | | | | | | | |
| | 6.15 | | | | | | | | | | |
| | 7.70 | | | | | | | | | | |
| | 9.00 | | | | | | | | | | |
| | 9.55 | | | | | | | | | | |
| | 11.15 | | | | | | | | | | |
| | 12.70 | | | | | | | | | | |
| | 13.00 | CH | | CLAYEY SILT, greyish brown, medium stiff to stiff. | | | | | | | |
| | 14.15 | | | | | | | | | | |
| | 15.15 | | | | | | | | | | |
| | 15.45 | | | END OF THIS BORING. | | | | | | | |

SR5_TWT - Times-Normal

Plate

GRAPHS OF 2-ton DCPT

PROJECT : - ELEVATION : -
 LOCATION : Dok Koja Bahari, Tj. Priok DATE : 01 April, 2006.
 POINT : S.1
 GROUND WATER LEVEL : -1.00 m



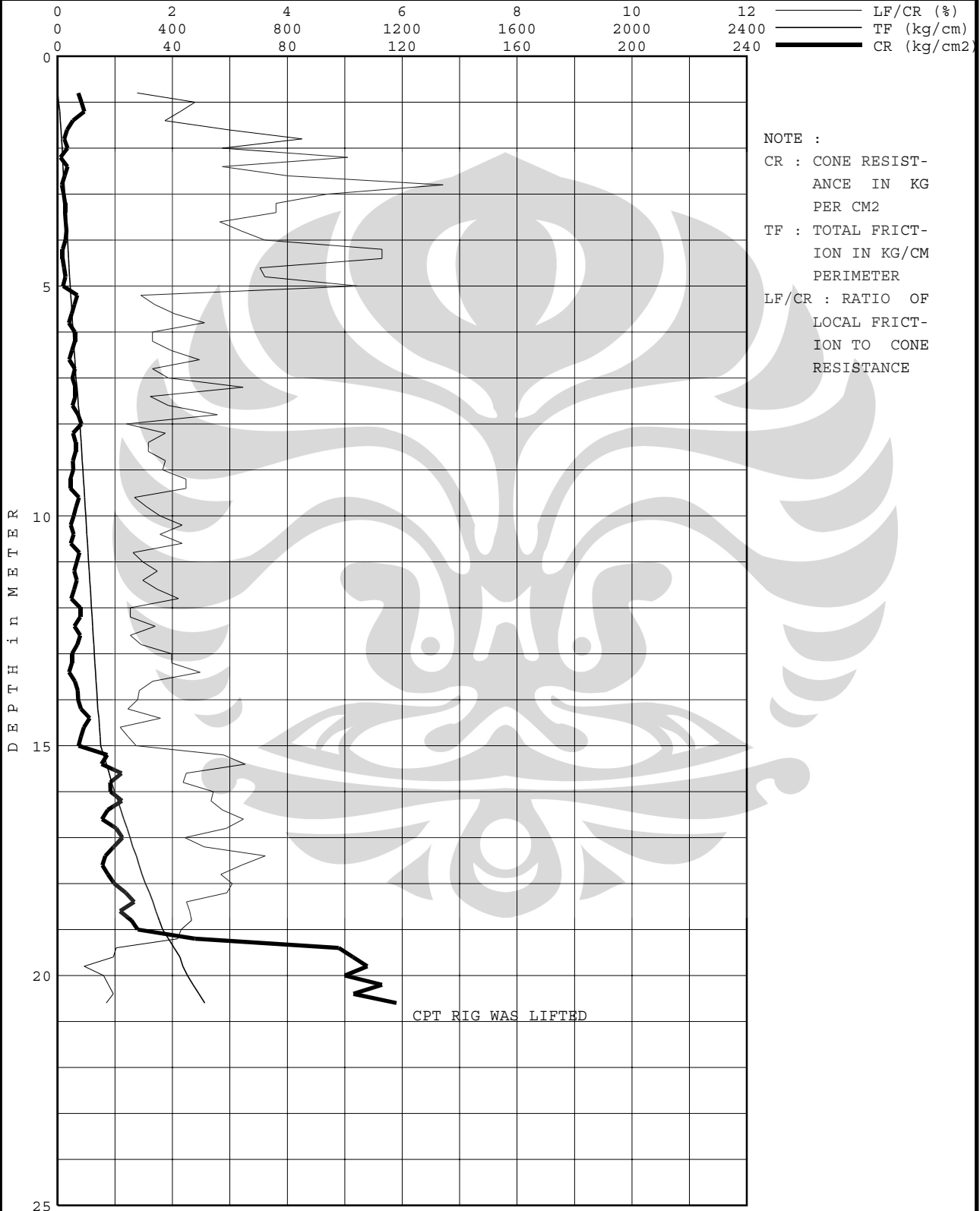
SI.TXT - Times-Normal

Plate

GRAPHS OF 2-ton DCPT

PROJECT : -
 LOCATION : Dok Koja Bahari, Tj. Priok
 POINT : S.2
 GROUND WATER LEVEL : -1.00 m

COORDINATES : N = E =
 ELEVATION : -
 DATE : 02 April, 2006.



NOTE :
 CR : CONE RESISTANCE IN KG PER CM²
 TF : TOTAL FRICTION IN KG/CM PERIMETER
 LF/CR : RATIO OF LOCAL FRICTION TO CONE RESISTANCE

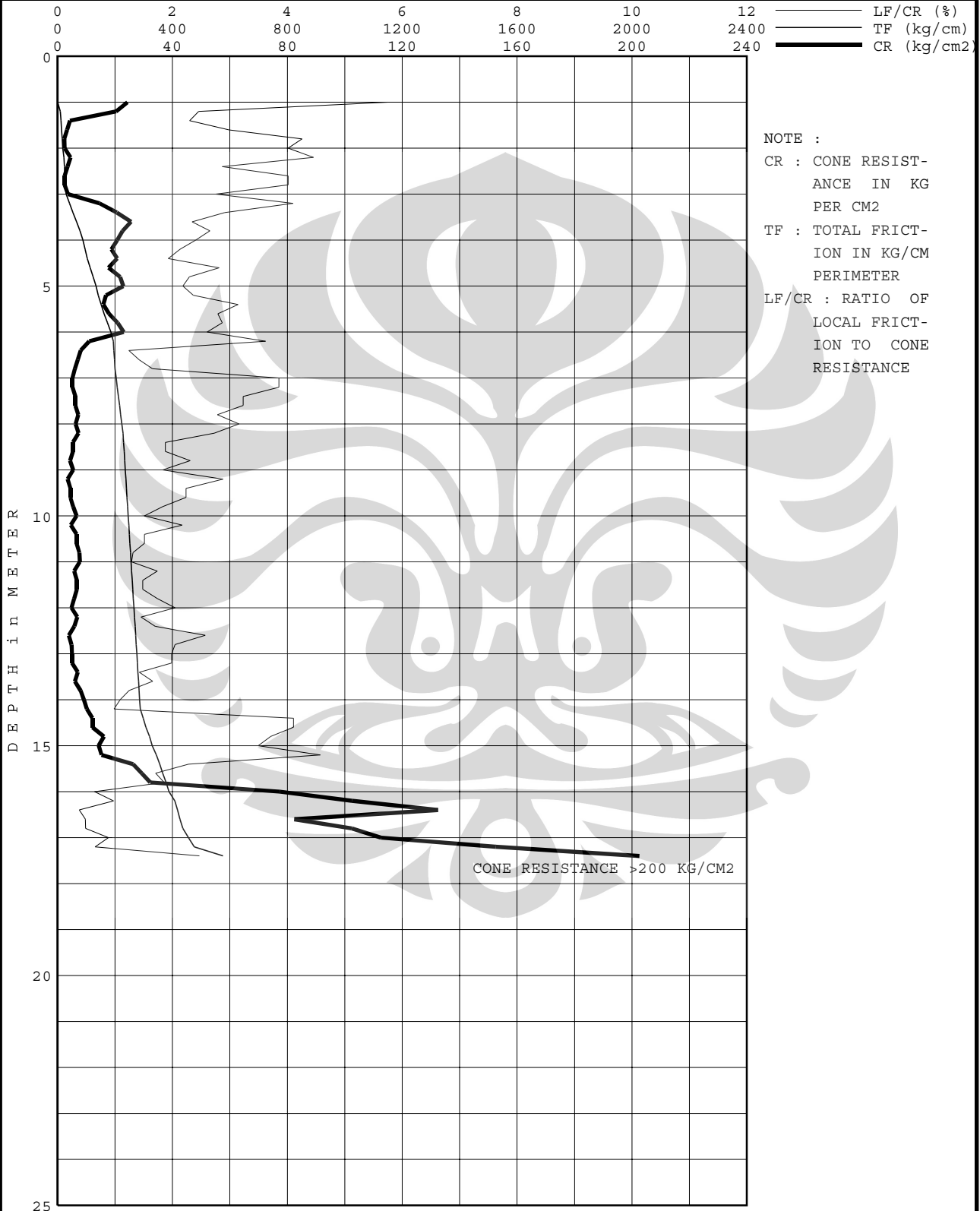
S2.TXT - Times-Normal

Plate

GRAPHS OF 2-ton DCPT

PROJECT : -
 LOCATION : Dok Koja Bahari, Tj. Priok
 POINT : S.3
 GROUND WATER LEVEL : -1.00 m

COORDINATES : N = E =
 ELEVATION : -
 DATE : 04 April, 2006.



NOTE :
 CR : CONE RESISTANCE IN KG PER CM2
 TF : TOTAL FRICTION IN KG/CM PERIMETER
 LF/CR : RATIO OF LOCAL FRICTION TO CONE RESISTANCE

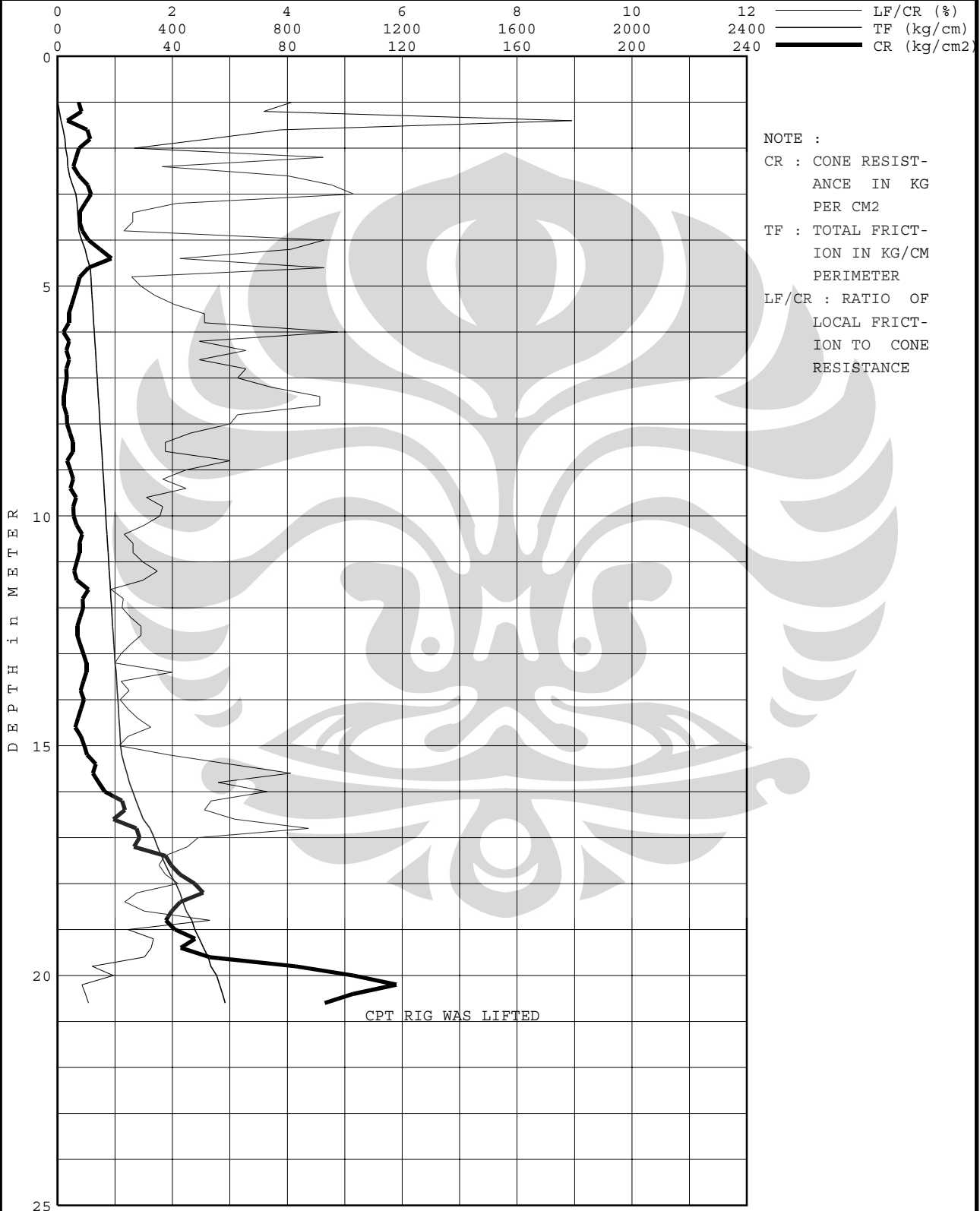
S3.TXT - Times-Normal

Plate

GRAPHS OF 2-ton DCPT

PROJECT : -
 LOCATION : Dok Koja Bahari, Tj. Priok
 POINT : S.4
 GROUND WATER LEVEL : -0.50 m

COORDINATES : N = E =
 ELEVATION : -
 DATE : 03 April, 2006.



NOTE :
 CR : CONE RESISTANCE IN KG PER CM2
 TF : TOTAL FRICTION IN KG/CM PERIMETER
 LF/CR : RATIO OF LOCAL FRICTION TO CONE RESISTANCE

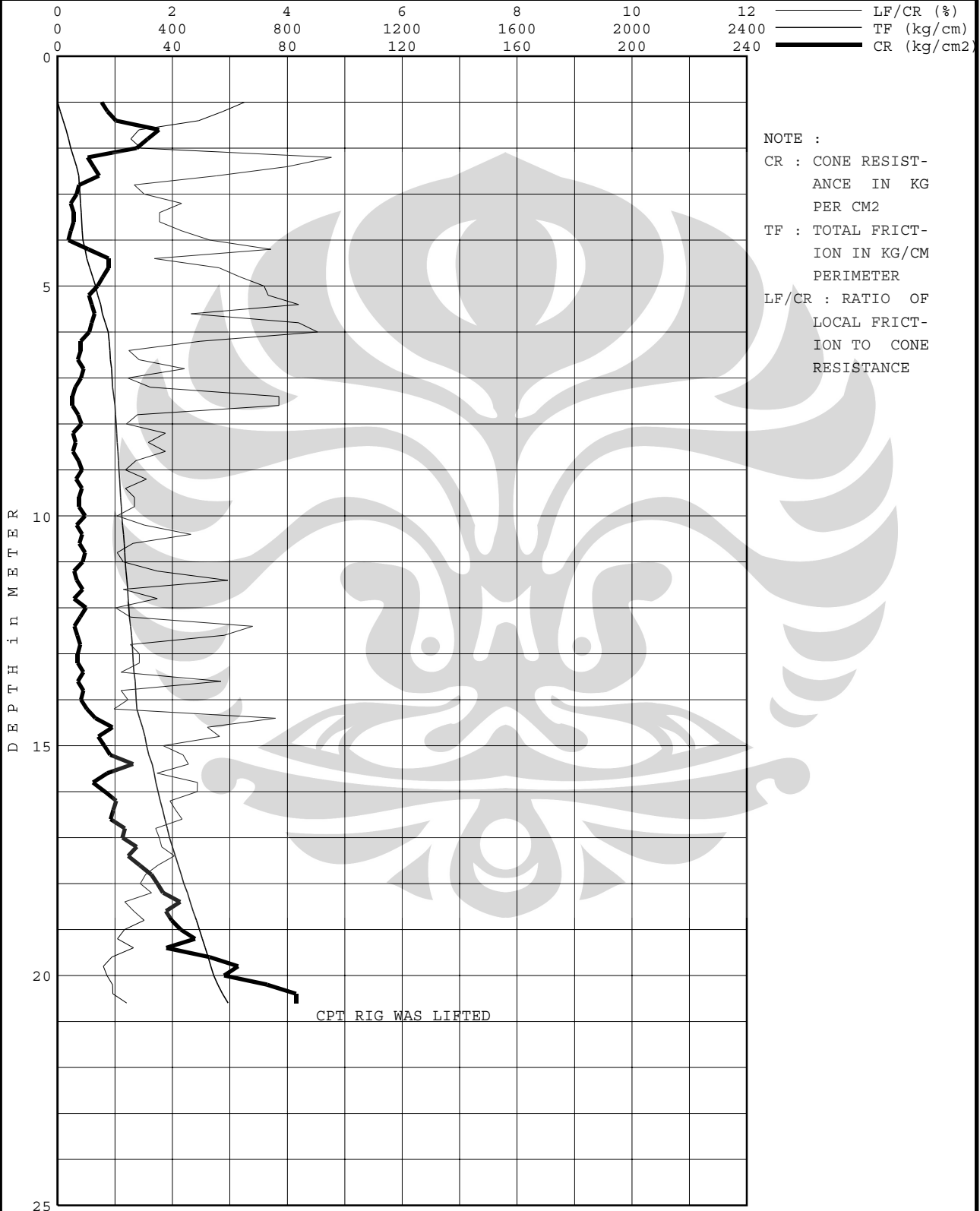
S4.TXT - Times-Normal

Plate

GRAPHS OF 2-ton DCPT

PROJECT : -
 LOCATION : Dok Koja Bahari, Tj. Priok
 POINT : S.5
 GROUND WATER LEVEL : -0.60 m

COORDINATES : N = E =
 ELEVATION : -
 DATE : 30 April, 2006.



NOTE :
 CR : CONE RESISTANCE IN KG PER CM2
 TF : TOTAL FRICTION IN KG/CM PERIMETER
 LF/CR : RATIO OF LOCAL FRICTION TO CONE RESISTANCE

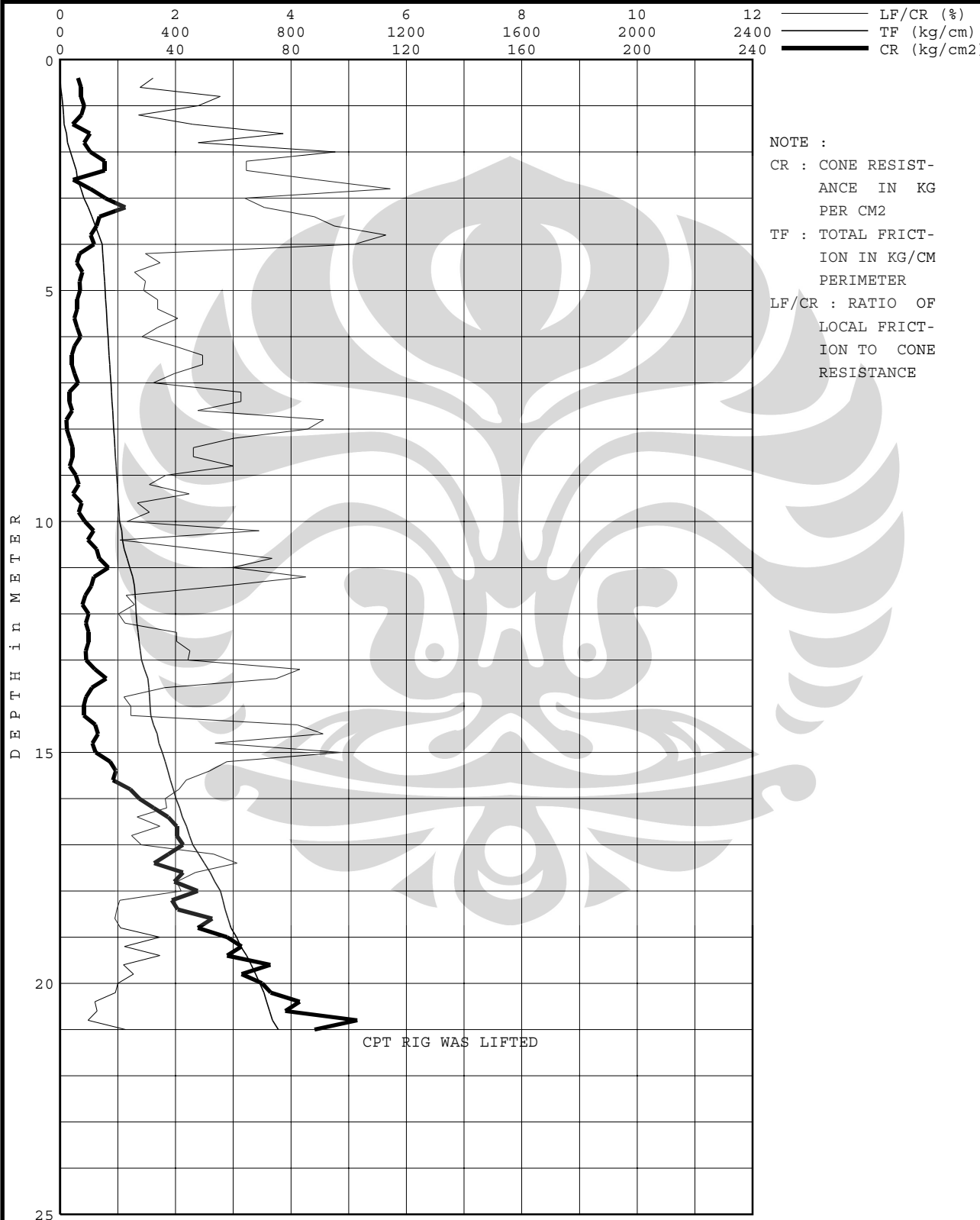
S5.TXT - Times-Normal

Plate

GRAPHS OF 2-ton DCPT

PROJECT : -
 LOCATION : Dok Koja Bahari, Tj. Priok
 POINT : S.6
 GROUND WATER LEVEL : -0.40 m

COORDINATES : N = E =
 ELEVATION : -
 DATE : 07 April, 2006.



NOTE :
 CR : CONE RESISTANCE IN KG PER CM2
 TF : TOTAL FRICTION IN KG/CM PERIMETER
 LF/CR : RATIO OF LOCAL FRICTION TO CONE RESISTANCE

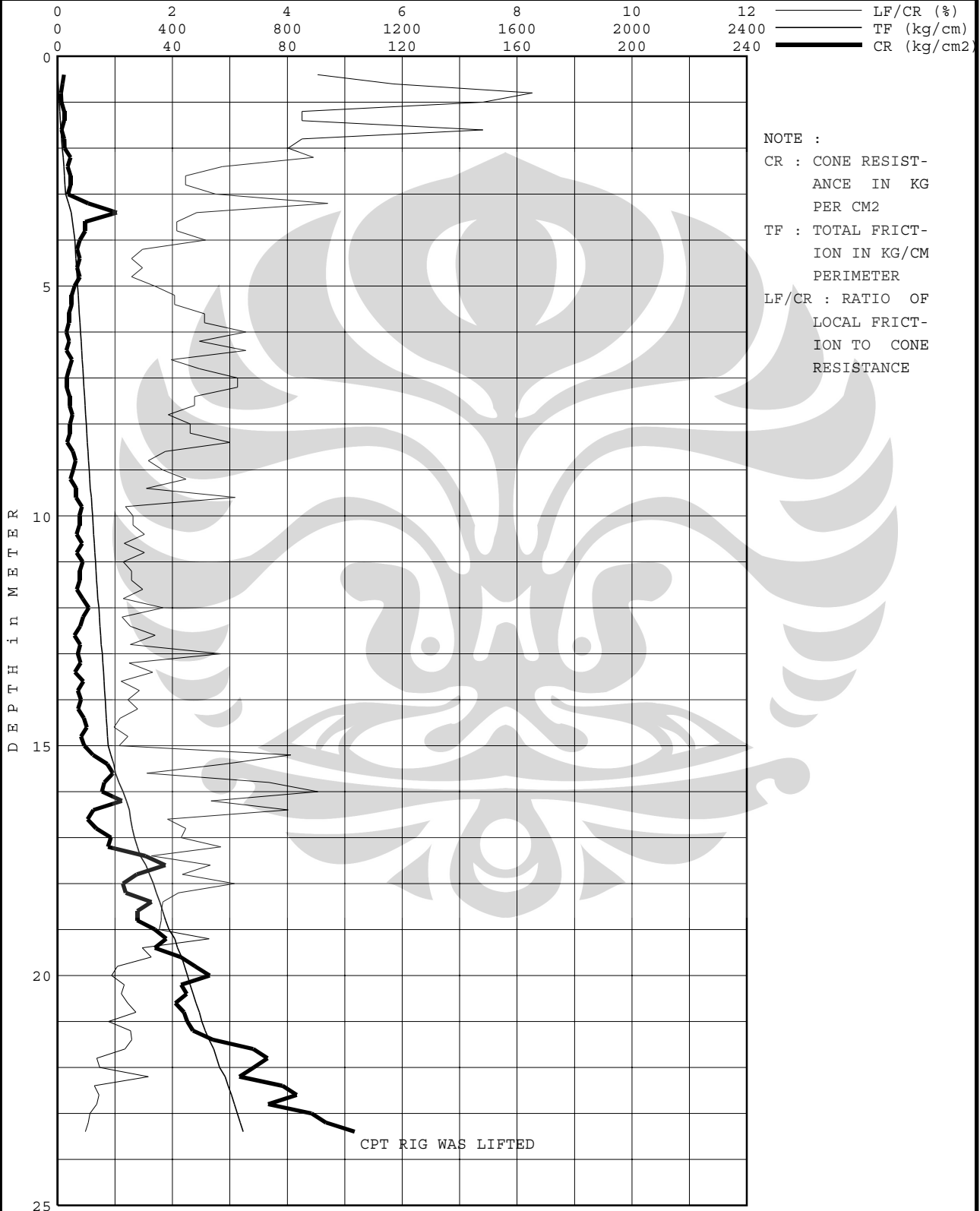
S6.TXT - Times-Normal

Plate

GRAPHS OF 2-ton DCPT

PROJECT : -
 LOCATION : Dok Koja Bahari, Tj. Priok
 POINT : S.7
 GROUND WATER LEVEL : -0.60 m

COORDINATES : N = E =
 ELEVATION : -
 DATE : 09 April, 2006.



NOTE :
 CR : CONE RESISTANCE IN KG PER CM²
 TF : TOTAL FRICTION IN KG/CM PERIMETER
 LF/CR : RATIO OF LOCAL FRICTION TO CONE RESISTANCE

S7.TXT - Times-Normal

Plate





SUMMARY OF LABORATORY TEST RESULTS

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------|---------------|---------------|-------------|---------------|---------------|-------------|---------------|---------------|-------------|---------------|---------------|
| Project | : PELABUHAN | | | | | | | | | | | |
| Location | : DOK KOJA BAHARI | | | | | | | | | | | |
| Boring No. | : DB - 01 | | | | | | | | | | | |
| Depth (M) | 7,00 - 7,55 | 12,00 - 12,55 | 15,50 - 16,05 | 5,00 - 5,55 | 10,50 - 11,05 | 15,50 - 16,05 | 5,00 - 5,55 | 10,50 - 11,05 | 15,50 - 16,05 | 5,00 - 5,55 | 10,50 - 11,05 | 15,50 - 16,05 |
| GRAINSIZE ANALYSIS | | | | | | | | | | | | |
| Passing # 200 | 96,22 | 97,76 | 19,40 | 95,41 | 97,47 | 76,59 | 95,41 | 97,47 | 76,59 | 95,41 | 97,47 | 76,59 |
| Gravel | 0 | 1 | 41 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 3 |
| Sand | 4 | 1 | 40 | 3 | 2 | 21 | 3 | 2 | 21 | 3 | 2 | 21 |
| Silt | 79 | 71 | 19 | 76 | 74 | 66 | 76 | 74 | 66 | 76 | 74 | 66 |
| Clay | 17 | 27 | 0 | 19 | 24 | 11 | 19 | 24 | 11 | 19 | 24 | 11 |
| ATTEBERG | | | | | | | | | | | | |
| Liquid Limit (LL) | 58,52 | 63,48 | NP | 58,75 | 113,20 | 66,06 | 58,75 | 113,20 | 66,06 | 58,75 | 113,20 | 66,06 |
| Plastic Limit (PL) | 27,88 | 30,20 | NP | 25,85 | 36,98 | 36,31 | 25,85 | 36,98 | 36,31 | 25,85 | 36,98 | 36,31 |
| Plasticity Index (PI) | 30,64 | 33,28 | NP | 32,90 | 76,22 | 29,75 | 32,90 | 76,22 | 29,75 | 32,90 | 76,22 | 29,75 |
| Liquidity Index (LI) | 0,91 | -0,61 | | 1,47 | 0,82 | 0,51 | 1,47 | 0,82 | 0,51 | 1,47 | 0,82 | 0,51 |
| NATURAL STATE | | | | | | | | | | | | |
| Water Content | 55,70 | 9,78 | 24,66 | 74,22 | 99,59 | 51,48 | 74,22 | 99,59 | 51,48 | 74,22 | 99,59 | 51,48 |
| Wet Density (Ym) | 1,560 | 1,430 | 1,749 | 1,520 | 1,420 | 1,640 | 1,520 | 1,420 | 1,640 | 1,520 | 1,420 | 1,640 |
| Dry Density (Yd) | 1,002 | 1,303 | 1,403 | 0,872 | 0,711 | 1,083 | 0,872 | 0,711 | 1,083 | 0,872 | 0,711 | 1,083 |
| Specific gravity (Gs) | 2,587 | 2,542 | 2,649 | 2,553 | 2,534 | 2,625 | 2,553 | 2,534 | 2,625 | 2,553 | 2,534 | 2,625 |
| Void Ratio (e) | 1,582 | 0,951 | 0,888 | 1,926 | 2,562 | 1,425 | 1,926 | 2,562 | 1,425 | 1,926 | 2,562 | 1,425 |
| Deg.Saturation (Sr) | 91 | 26 | 74 | 98 | 99 | 95 | 98 | 99 | 95 | 98 | 99 | 95 |
| UU - TRIAXIAL COMP. | | | | | | | | | | | | |
| Cohesion (c) | 0,031 | 0,105 | 0,309 | 0,072 | 0,051 | 0,061 | 0,072 | 0,051 | 0,061 | 0,072 | 0,051 | 0,061 |
| Angle of Int.frict.(φ) | 1 | 3 | 25 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| CONSOLIDATION | | | | | | | | | | | | |
| Compression Index (CC) | 0,365 | 0,640 | 0,479 | 0,479 | 0,659 | 0,329 | 0,479 | 0,659 | 0,329 | 0,479 | 0,659 | 0,329 |



SOIL MECHANICS LABORATORY
 CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
 BANDUNG INSTITUTE OF TECHNOLOGY

SUMMARY OF LABORATORY TEST RESULTS

| Project Location | : PELABUHAN : DOK KOJA BAHARI | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | : Boring No. Depth (M) | | : SB - 01 | | : SB - 02 | | : SB - 03 | | : SB - 04 | | : SB - 05 | | : SB - 06 | |
| | | 7,00 - 7,55 | 12,00 - 12,5 | 7,00 - 7,55 | 12,00 - 12,5 | 4,00 - 4,55 | 9,00 - 9,55 | 13,50 - 14,00 | 7,00 - 7,55 | 12,00 - 12,5 | 4,00 - 4,55 | 9,00 - 9,55 | 4,00 - 4,55 | 9,00 - 9,55 |
| GRAIN SIZE ANALYSIS | | | | | | | | | | | | | | |
| Passing # 200 | % | 96.99 | 97.51 | 97.05 | 98.95 | 61.96 | 96.25 | 51.92 | 97.42 | 96.85 | 95.86 | 97.58 | 96.64 | 91.64 |
| Gravel | % | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 | 1 | 19 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 6 |
| Sand | % | 3 | 1 | 3 | 1 | 35 | 2 | 29 | 2 | 2 | 4 | 1 | 3 | 3 |
| Silt | % | 78 | 78 | 75 | 71 | 51 | 70 | 44 | 79 | 70 | 75 | 70 | 72 | 69 |
| Clay | % | 19 | 20 | 22 | 28 | 11 | 26 | 8 | 18 | 27 | 21 | 28 | 25 | 23 |
| ATTERBERG | | | | | | | | | | | | | | |
| Liquid Limit (LL) | % | 91.24 | 53.57 | 81.28 | 117.05 | 63.89 | 127.28 | 63.32 | 72.94 | 112.40 | 93.45 | 112.08 | 76.61 | 110.50 |
| Plastic Limit (PL) | % | 28.72 | 31.26 | 30.68 | 32.21 | 27.26 | 34.75 | 30.31 | 28.71 | 31.08 | 29.21 | 32.56 | 28.11 | 30.03 |
| Plasticity Index (PI) | % | 62.52 | 22.31 | 50.60 | 84.84 | 36.63 | 92.53 | 33.01 | 44.23 | 81.32 | 64.24 | 79.52 | 48.50 | 80.47 |
| Liquidity Index (LI) | % | 0.60 | 3.20 | 0.92 | 0.84 | 1.41 | 0.78 | 0.94 | 0.89 | 0.89 | 0.91 | 0.88 | 0.90 | 0.89 |
| NATURAL STATE | | | | | | | | | | | | | | |
| Water Content | % | 66.19 | 102.60 | 77.20 | 103.41 | 78.90 | 106.73 | 61.25 | 68.09 | 103.82 | 87.68 | 102.58 | 71.77 | 101.91 |
| Wet Density (Ym) | t/m3 | 1.500 | 1.400 | 1.520 | 1.410 | 1.470 | 1.400 | 1.610 | 1.540 | 1.420 | 1.470 | 1.420 | 1.530 | 1.420 |
| Dry Density (Yd) | t/m3 | 0.903 | 0.691 | 0.858 | 0.693 | 0.822 | 0.677 | 0.998 | 0.916 | 0.697 | 0.783 | 0.701 | 0.891 | 0.703 |
| Specific gravity (Gs) | t/m3 | 2.577 | 2.535 | 2.573 | 2.522 | 2.554 | 2.526 | 2.604 | 2.574 | 2.525 | 2.544 | 2.522 | 2.563 | 2.535 |
| Void Ratio (e) | % | 1.855 | 2.669 | 2.000 | 2.638 | 2.108 | 2.730 | 1.608 | 1.810 | 2.624 | 2.248 | 2.598 | 1.877 | 2.605 |
| Deg.Saturation (Sr) | % | 92 | 97 | 99 | 99 | 96 | 99 | 99 | 97 | 100 | 99 | 100 | 98 | 99 |
| UU - TRIAXIAL COMP. | | | | | | | | | | | | | | |
| Cohesion (c) | kg/cm2 | 0.079 | 0.113 | 0.081 | 0.062 | 0.019 | 0.103 | 0.316 | 0.097 | 0.077 | 0.104 | 0.089 | 0.089 | 0.097 |
| Angle of Int.frict.(φ) | deg | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 | 7 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| CONSOLIDATION | | | | | | | | | | | | | | |
| Compression Index (CC) | | 0.425 | 0.688 | 0.508 | 0.668 | 0.538 | 0.711 | 0.385 | 0.413 | 0.688 | 0.578 | 0.684 | 0.468 | 0.678 |

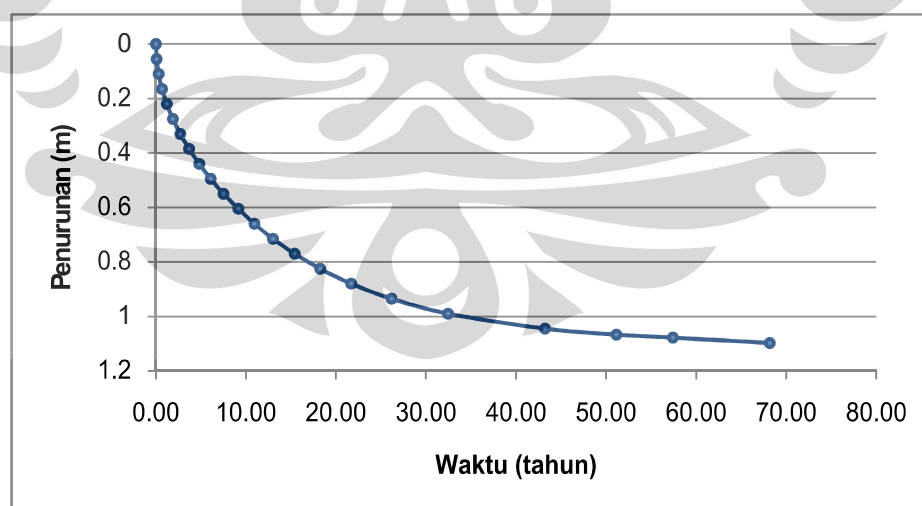
Lampiran 3 : Perhitungan Penurunan One Dimensional Terzaghi

| Tahap | Tinggi Timbunan (m) | $p_{o(i)} + \Delta p_{(i)}$ | $p_{o(i)}$ | e_o | $\log\left(\frac{p_{o(i)} + \Delta p_{(i)}}{p_{o(i)}}\right)$ | Penurunan (m) |
|-------|---------------------|-----------------------------|------------|-------|---|---------------|
| awal | 3 | 71.5 | 32.5 | 1.04 | 0.342422681 | 0.71 |
| 1 | 3.65 | 81.9 | 32.5 | 1.04 | 0.401400541 | 0.84 |
| 2 | 4.3 | 92.3 | 32.5 | 1.04 | 0.45331834 | 0.95 |
| 3 | 4.95 | 102.7 | 32.5 | 1.04 | 0.499687083 | 1.04 |
| 4 | 5.4 | 109.9 | 32.5 | 1.04 | 0.529114331 | 1.10 |



Lampiran 4 : Perhitungan Time Rate Consolidation Terzaghi

| t (hari) | t (tahun) | Tv | Cv (m/hari) | Hdr ² | Uav (%) | Sc (m) |
|----------|-----------|---------|-------------|------------------|---------|--------|
| 0 | 0.00 | 0 | 0.003024 | 25 | 0 | 0 |
| 27.38426 | 0.08 | 0.00196 | 0.003024 | 25 | 0.05 | 0.06 |
| 109.6768 | 0.30 | 0.00785 | 0.003024 | 25 | 0.1 | 0.11 |
| 247.2966 | 0.68 | 0.0177 | 0.003024 | 25 | 0.15 | 0.17 |
| 438.707 | 1.20 | 0.0314 | 0.003024 | 25 | 0.2 | 0.22 |
| 686.0036 | 1.88 | 0.0491 | 0.003024 | 25 | 0.25 | 0.28 |
| 987.7894 | 2.71 | 0.0707 | 0.003024 | 25 | 0.3 | 0.33 |
| 1344.064 | 3.68 | 0.0962 | 0.003024 | 25 | 0.35 | 0.39 |
| 1760.417 | 4.82 | 0.126 | 0.003024 | 25 | 0.4 | 0.44 |
| 2221.478 | 6.09 | 0.159 | 0.003024 | 25 | 0.45 | 0.50 |
| 2738.426 | 7.50 | 0.196 | 0.003024 | 25 | 0.5 | 0.55 |
| 3339.203 | 9.15 | 0.239 | 0.003024 | 25 | 0.55 | 0.61 |
| 3995.866 | 10.95 | 0.286 | 0.003024 | 25 | 0.6 | 0.66 |
| 4750.331 | 13.01 | 0.34 | 0.003024 | 25 | 0.65 | 0.72 |
| 5630.539 | 15.43 | 0.403 | 0.003024 | 25 | 0.7 | 0.77 |
| 6664.435 | 18.26 | 0.477 | 0.003024 | 25 | 0.75 | 0.83 |
| 7921.875 | 21.70 | 0.567 | 0.003024 | 25 | 0.8 | 0.88 |
| 9556.548 | 26.18 | 0.684 | 0.003024 | 25 | 0.85 | 0.94 |
| 11847.88 | 32.46 | 0.848 | 0.003024 | 25 | 0.9 | 0.99 |
| 15773.89 | 43.22 | 1.129 | 0.003024 | 25 | 0.95 | 1.05 |
| 18666.01 | 51.14 | 1.336 | 0.003024 | 25 | 0.97 | 1.07 |
| 20957.34 | 57.42 | 1.5 | 0.003024 | 25 | 0.98 | 1.08 |
| 24883.35 | 68.17 | 1.781 | 0.003024 | 25 | 0.998 | 1.10 |



Lampiran 5 : Drainase Vertikal

Drainase Vertikal
 Segitiga
 $dw = \frac{2(a+b)p}{3}$
 Spek
 PVD
 $cv = \frac{a}{b}$
 $ch = 1.2 cv$

$a = 100$ mm
 $b = 5$ mm
 0.00080 cm²/det
 0.00096 cm²/det

| Spasi cm | de cm | dw cm | n | ch | | | t | | | Th | Fn | U (%) | Settlement m |
|-------------|----------|----------|-------|----------------------|-------|------|---------|-------|-------|------|-------|-------|-----------------|
| | | | | cm ² /det | bulan | hari | detik | | | | | | |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 0.00 | 0.0 | 0 | 0.000 | 2.195 | 0.0 | 0.000 | | |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 0.25 | 7.6 | 658800 | 0.040 | 2.195 | 13.5 | 0.149 | | |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 0.50 | 15.3 | 1317600 | 0.080 | 2.195 | 25.2 | 0.277 | | |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 0.75 | 22.9 | 1976400 | 0.120 | 2.195 | 35.3 | 0.388 | | |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 1.00 | 30.5 | 2635200 | 0.159 | 2.195 | 44.0 | 0.485 | | |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 1.25 | 38.1 | 3294000 | 0.199 | 2.195 | 51.6 | 0.568 | | |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 1.50 | 45.8 | 3952800 | 0.239 | 2.195 | 58.1 | 0.640 | | |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 1.75 | 53.4 | 4611600 | 0.279 | 2.195 | 63.8 | 0.702 | | |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 2.00 | 61.0 | 5270400 | 0.319 | 2.195 | 68.7 | 0.756 | | |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 2.25 | 68.6 | 5929200 | 0.359 | 2.195 | 72.9 | 0.802 | | |

(Lanjutan)

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-------|---------|------|-------|----------|-------|-------|------|-------|
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 2.50 | 76.3 | 6588000 | 0.398 | 2.195 | 76.6 | 0.842 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 2.75 | 83.9 | 7246800 | 0.438 | 2.195 | 79.7 | 0.877 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 3.00 | 91.5 | 7905600 | 0.478 | 2.195 | 82.5 | 0.907 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 3.25 | 99.1 | 8564400 | 0.518 | 2.195 | 84.8 | 0.933 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 3.50 | 106.8 | 9223200 | 0.558 | 2.195 | 86.9 | 0.956 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 3.75 | 114.4 | 9882000 | 0.598 | 2.195 | 88.7 | 0.975 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 4.00 | 122.0 | 10540800 | 0.637 | 2.195 | 90.2 | 0.992 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 4.25 | 129.6 | 11199600 | 0.677 | 2.195 | 91.5 | 1.007 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 4.50 | 137.3 | 11858400 | 0.717 | 2.195 | 92.7 | 1.019 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 4.75 | 144.9 | 12517200 | 0.757 | 2.195 | 93.7 | 1.030 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 5.00 | 152.5 | 13176000 | 0.797 | 2.195 | 94.5 | 1.040 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 5.25 | 160.1 | 13834800 | 0.837 | 2.195 | 95.3 | 1.048 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 5.50 | 167.8 | 14493600 | 0.876 | 2.195 | 95.9 | 1.055 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 5.75 | 175.4 | 15152400 | 0.916 | 2.195 | 96.5 | 1.061 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 6.00 | 183.0 | 15811200 | 0.956 | 2.195 | 96.9 | 1.066 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 6.25 | 190.6 | 16470000 | 0.996 | 2.195 | 97.3 | 1.071 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 6.50 | 198.3 | 17128800 | 1.036 | 2.195 | 97.7 | 1.075 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 6.75 | 205.9 | 17787600 | 1.076 | 2.195 | 98.0 | 1.078 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 7.00 | 213.5 | 18446400 | 1.115 | 2.195 | 98.3 | 1.081 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 7.25 | 221.1 | 19105200 | 1.155 | 2.195 | 98.5 | 1.084 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 7.50 | 228.8 | 19764000 | 1.195 | 2.195 | 98.7 | 1.086 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 7.75 | 236.4 | 20422800 | 1.235 | 2.195 | 98.9 | 1.088 |

(Lanjutan)

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-------|---------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 8.00 | 244.0 | 21081600 | 1.275 | 2.195 | 99.0 | 1.089 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 8.25 | 251.6 | 21740400 | 1.315 | 2.195 | 99.2 | 1.091 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 8.50 | 259.3 | 22399200 | 1.354 | 2.195 | 99.3 | 1.092 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 8.75 | 266.9 | 23058000 | 1.394 | 2.195 | 99.4 | 1.093 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 9.00 | 274.5 | 23716800 | 1.434 | 2.195 | 99.5 | 1.094 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 9.25 | 282.1 | 24375600 | 1.474 | 2.195 | 99.5 | 1.095 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 9.50 | 289.8 | 25034400 | 1.514 | 2.195 | 99.6 | 1.096 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 9.75 | 297.4 | 25693200 | 1.554 | 2.195 | 99.7 | 1.096 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 10.00 | 305.0 | 26352000 | 1.593 | 2.195 | 99.7 | 1.097 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 10.25 | 312.6 | 27010800 | 1.633 | 2.195 | 99.7 | 1.097 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 10.50 | 320.3 | 27669600 | 1.673 | 2.195 | 99.8 | 1.098 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 10.75 | 327.9 | 28328400 | 1.713 | 2.195 | 99.8 | 1.098 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 11.00 | 335.5 | 28987200 | 1.753 | 2.195 | 99.8 | 1.098 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 11.25 | 343.1 | 29646000 | 1.793 | 2.195 | 99.9 | 1.098 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 11.50 | 350.8 | 30304800 | 1.832 | 2.195 | 99.9 | 1.099 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 11.75 | 358.4 | 30963600 | 1.872 | 2.195 | 99.9 | 1.099 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 12.00 | 366.0 | 31622400 | 1.912 | 2.195 | 99.9 | 1.099 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 12.25 | 373.6 | 32281200 | 1.952 | 2.195 | 99.9 | 1.099 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 12.50 | 381.3 | 32940000 | 1.992 | 2.195 | 99.9 | 1.099 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 12.75 | 388.9 | 33598800 | 2.032 | 2.195 | 99.9 | 1.099 |
| 120 | 126 | 6.7 | 18.85 | 0.00096 | 13.75 | 419.4 | 36234000 | 2.191 | 2.195 | 100.0 | 1.100 |

(Lanjutan)

| Spasi cm | de cm | dw cm | n | ch cm ² /def | t | | | Th | Fn | U (%) | Settlement m |
|-------------|----------|----------|-------|----------------------------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-----------------|
| | | | | | bulan | hari | defik | | | | |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 0.00 | 0.0 | 0 | 0.000 | 2.274 | 0.0 | 0.000 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 0.25 | 7.6 | 658800 | 0.034 | 2.274 | 11.3 | 0.124 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 0.50 | 15.3 | 1317600 | 0.068 | 2.274 | 21.2 | 0.234 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 0.75 | 22.9 | 1976400 | 0.102 | 2.274 | 30.1 | 0.331 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 1.00 | 30.5 | 2635200 | 0.136 | 2.274 | 38.0 | 0.418 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 1.25 | 38.1 | 3294000 | 0.170 | 2.274 | 45.0 | 0.494 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 1.50 | 45.8 | 3952800 | 0.204 | 2.274 | 51.1 | 0.563 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 1.75 | 53.4 | 4611600 | 0.238 | 2.274 | 56.6 | 0.623 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 2.00 | 61.0 | 5270400 | 0.272 | 2.274 | 61.5 | 0.677 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 2.25 | 68.6 | 5929200 | 0.305 | 2.274 | 65.9 | 0.724 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 2.50 | 76.3 | 6588000 | 0.339 | 2.274 | 69.7 | 0.767 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 2.75 | 83.9 | 7246800 | 0.373 | 2.274 | 73.1 | 0.804 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 3.00 | 91.5 | 7905600 | 0.407 | 2.274 | 76.1 | 0.837 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 3.25 | 99.1 | 8564400 | 0.441 | 2.274 | 78.8 | 0.867 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 3.50 | 106.8 | 9223200 | 0.475 | 2.274 | 81.2 | 0.893 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 3.75 | 114.4 | 9882000 | 0.509 | 2.274 | 83.3 | 0.917 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 4.00 | 122.0 | 10540800 | 0.543 | 2.274 | 85.2 | 0.937 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 4.25 | 129.6 | 11199600 | 0.577 | 2.274 | 86.9 | 0.955 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 4.50 | 137.3 | 11858400 | 0.611 | 2.274 | 88.3 | 0.972 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 4.75 | 144.9 | 12517200 | 0.645 | 2.274 | 89.7 | 0.986 |

(Lanjutan)

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-------|---------|-------|-------|----------|-------|-------|------|-------|
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 6.25 | 190.6 | 16470000 | 0.849 | 2.274 | 94.9 | 1.044 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 6.50 | 198.3 | 17128800 | 0.883 | 2.274 | 95.5 | 1.051 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 6.75 | 205.9 | 17787600 | 0.916 | 2.274 | 96.0 | 1.056 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 7.00 | 213.5 | 18446400 | 0.950 | 2.274 | 96.5 | 1.061 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 7.25 | 221.1 | 19105200 | 0.984 | 2.274 | 96.9 | 1.066 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 7.50 | 228.8 | 19764000 | 1.018 | 2.274 | 97.2 | 1.069 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 7.75 | 236.4 | 20422800 | 1.052 | 2.274 | 97.5 | 1.073 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 8.00 | 244.0 | 21081600 | 1.086 | 2.274 | 97.8 | 1.076 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 8.25 | 251.6 | 21740400 | 1.120 | 2.274 | 98.1 | 1.079 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 8.50 | 259.3 | 22399200 | 1.154 | 2.274 | 98.3 | 1.081 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 8.75 | 266.9 | 23058000 | 1.188 | 2.274 | 98.5 | 1.083 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 9.00 | 274.5 | 23716800 | 1.222 | 2.274 | 98.6 | 1.085 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 9.25 | 282.1 | 24375600 | 1.256 | 2.274 | 98.8 | 1.087 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 9.50 | 289.8 | 25034400 | 1.290 | 2.274 | 98.9 | 1.088 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 9.75 | 297.4 | 25693200 | 1.324 | 2.274 | 99.0 | 1.090 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 10.00 | 305.0 | 26352000 | 1.358 | 2.274 | 99.2 | 1.091 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 10.25 | 312.6 | 27010800 | 1.392 | 2.274 | 99.3 | 1.092 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 10.50 | 320.3 | 27669600 | 1.426 | 2.274 | 99.3 | 1.093 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 10.75 | 327.9 | 28328400 | 1.460 | 2.274 | 99.4 | 1.094 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 11.00 | 335.5 | 28987200 | 1.494 | 2.274 | 99.5 | 1.094 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 11.25 | 343.1 | 29646000 | 1.527 | 2.274 | 99.5 | 1.095 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 11.50 | 350.8 | 30304800 | 1.561 | 2.274 | 99.6 | 1.095 |

(Lanjutan)

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-------|---------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 11.75 | 358.4 | 30963600 | 1.595 | 2.274 | 99.6 | 1.096 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 12.00 | 366.0 | 31622400 | 1.629 | 2.274 | 99.7 | 1.096 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 12.25 | 373.6 | 32281200 | 1.663 | 2.274 | 99.7 | 1.097 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 12.50 | 381.3 | 32940000 | 1.697 | 2.274 | 99.7 | 1.097 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 12.75 | 388.9 | 33598800 | 1.731 | 2.274 | 99.8 | 1.098 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 13.75 | 419.4 | 36234000 | 1.867 | 2.274 | 99.9 | 1.098 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 14.75 | 449.9 | 38869200 | 2.003 | 2.274 | 99.9 | 1.099 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 15.75 | 480.4 | 41504400 | 2.138 | 2.274 | 99.9 | 1.099 |
| 130 | 137 | 6.7 | 20.42 | 0.00096 | 16.75 | 510.9 | 44139600 | 2.274 | 2.274 | 100.0 | 1.100 |

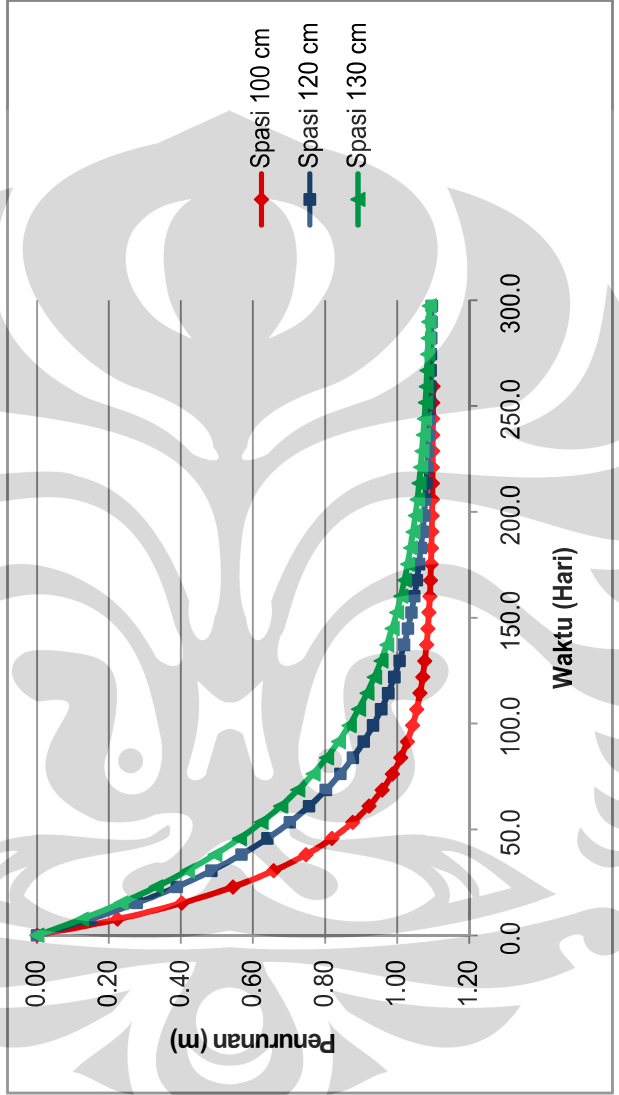
| Spasi cm | de cm | dw cm | n | ch cm ² /det | t | | | Th | Fn | U (%) | Settlement m |
|-------------|----------|----------|-------|----------------------------|-------|------|---------|-------|-------|-------|-----------------|
| | | | | | bulan | hari | detik | | | | |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 0.00 | 0.0 | 0 | 0.000 | 2.016 | 0.0 | 0.000 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 0.25 | 7.6 | 658800 | 0.057 | 2.016 | 20.4 | 0.224 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 0.50 | 15.3 | 1317600 | 0.115 | 2.016 | 36.6 | 0.402 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 0.75 | 22.9 | 1976400 | 0.172 | 2.016 | 49.5 | 0.544 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 1.00 | 30.5 | 2635200 | 0.229 | 2.016 | 59.8 | 0.657 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 1.25 | 38.1 | 3294000 | 0.287 | 2.016 | 68.0 | 0.747 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 1.50 | 45.8 | 3952800 | 0.344 | 2.016 | 74.5 | 0.819 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 1.75 | 53.4 | 4611600 | 0.402 | 2.016 | 79.7 | 0.876 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 2.00 | 61.0 | 5270400 | 0.459 | 2.016 | 83.8 | 0.922 |

(Lanjutan)

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-------|---------|------|-------|----------|-------|-------|------|-------|
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 2.25 | 68.6 | 5929200 | 0.516 | 2.016 | 87.1 | 0.958 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 2.50 | 76.3 | 6588000 | 0.574 | 2.016 | 89.7 | 0.987 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 2.75 | 83.9 | 7246800 | 0.631 | 2.016 | 91.8 | 1.010 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 3.00 | 91.5 | 7905600 | 0.688 | 2.016 | 93.5 | 1.028 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 3.25 | 99.1 | 8564400 | 0.746 | 2.016 | 94.8 | 1.043 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 3.50 | 106.8 | 9223200 | 0.803 | 2.016 | 95.9 | 1.055 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 3.75 | 114.4 | 9882000 | 0.860 | 2.016 | 96.7 | 1.064 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 4.00 | 122.0 | 10540800 | 0.918 | 2.016 | 97.4 | 1.071 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 4.25 | 129.6 | 11199600 | 0.975 | 2.016 | 97.9 | 1.077 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 4.50 | 137.3 | 11858400 | 1.033 | 2.016 | 98.3 | 1.082 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 4.75 | 144.9 | 12517200 | 1.090 | 2.016 | 98.7 | 1.085 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 5.00 | 152.5 | 13176000 | 1.147 | 2.016 | 98.9 | 1.088 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 5.25 | 160.1 | 13834800 | 1.205 | 2.016 | 99.2 | 1.091 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 5.50 | 167.8 | 14493600 | 1.262 | 2.016 | 99.3 | 1.093 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 5.75 | 175.4 | 15152400 | 1.319 | 2.016 | 99.5 | 1.094 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 6.00 | 183.0 | 15811200 | 1.377 | 2.016 | 99.6 | 1.095 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 6.25 | 190.6 | 16470000 | 1.434 | 2.016 | 99.7 | 1.096 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 6.50 | 198.3 | 17128800 | 1.491 | 2.016 | 99.7 | 1.097 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 6.75 | 205.9 | 17787600 | 1.549 | 2.016 | 99.8 | 1.098 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 7.00 | 213.5 | 18446400 | 1.606 | 2.016 | 99.8 | 1.098 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 7.25 | 221.1 | 19105200 | 1.664 | 2.016 | 99.9 | 1.099 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 7.50 | 228.8 | 19764000 | 1.721 | 2.016 | 99.9 | 1.099 |

(Lanjutan)

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-------|---------|------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 7.25 | 221.1 | 19105200 | 1.664 | 2.016 | 99.9 | 1.099 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 7.50 | 228.8 | 19764000 | 1.721 | 2.016 | 99.9 | 1.099 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 7.75 | 236.4 | 20422800 | 1.778 | 2.016 | 99.9 | 1.099 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 8.00 | 244.0 | 21081600 | 1.836 | 2.016 | 99.9 | 1.099 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 8.25 | 251.6 | 21740400 | 1.893 | 2.016 | 99.9 | 1.099 |
| 100 | 105 | 6.7 | 15.71 | 0.00096 | 8.50 | 259.3 | 22399200 | 1.950 | 2.016 | 100.0 | 1.100 |



Lampiran 6 : Parameter Ekuivalensi Drainase Vertikal

Point A (di lapisan bagian atas)

| Point | Time [day] | Excess PP [kN/m ²] | U | Sc |
|-------|------------|--------------------------------|------|------|
| 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | | |
| 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | | |
| 3 | 0.00E+00 | -1.24E+00 | | |
| 4 | 0.00E+00 | -3.72E+00 | | |
| 5 | 0.00E+00 | -6.15E+00 | | |
| 6 | 0.00E+00 | -1.10E+01 | | |
| 7 | 0.00E+00 | -2.08E+01 | | |
| 8 | 0.00E+00 | -4.04E+01 | 1.00 | 0.00 |
| 9 | 0.00E+00 | -7.36E+01 | 0.79 | 0.23 |
| 10 | 4.91E+00 | -5.79E+01 | 0.63 | 0.40 |
| 11 | 9.81E+00 | -4.66E+01 | 0.53 | 0.52 |
| 12 | 1.47E+01 | -3.90E+01 | 0.40 | 0.66 |
| 13 | 2.45E+01 | -2.97E+01 | 0.32 | 0.75 |
| 14 | 3.43E+01 | -2.34E+01 | 0.21 | 0.87 |
| 15 | 5.40E+01 | -1.57E+01 | 0.15 | 0.94 |
| 16 | 7.36E+01 | -1.08E+01 | 0.08 | 1.01 |
| 17 | 1.13E+02 | -5.75E+00 | 0.04 | 1.05 |
| 18 | 1.52E+02 | -3.09E+00 | 0.02 | 1.08 |
| 19 | 2.31E+02 | -1.14E+00 | 0.01 | 1.09 |
| 20 | 3.09E+02 | -4.26E-01 | | |

Point B (di lapisan bagian tengah)

| Point | Time [day] | Excess PP [kN/m ²] | U | Sc |
|-------|------------|--------------------------------|------|------|
| 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | | |
| 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | | |
| 3 | 0.00E+00 | -1.24E+00 | | |
| 4 | 0.00E+00 | -3.72E+00 | | |
| 5 | 0.00E+00 | -6.15E+00 | | |
| 6 | 0.00E+00 | -1.10E+01 | | |
| 7 | 0.00E+00 | -2.08E+01 | | |
| 8 | 0.00E+00 | -4.04E+01 | | |
| 9 | 0.00E+00 | -7.36E+01 | 1.00 | 0.00 |
| 10 | 4.91E+00 | -7.18E+01 | 0.97 | 0.03 |
| 11 | 9.81E+00 | -6.76E+01 | 0.92 | 0.09 |
| 12 | 1.47E+01 | -6.26E+01 | 0.85 | 0.17 |
| 13 | 2.45E+01 | -5.26E+01 | 0.71 | 0.31 |
| 14 | 3.43E+01 | -4.37E+01 | 0.59 | 0.45 |
| 15 | 5.40E+01 | -3.06E+01 | 0.42 | 0.64 |
| 16 | 7.36E+01 | -2.15E+01 | 0.29 | 0.78 |
| 17 | 1.13E+02 | -1.16E+01 | 0.16 | 0.93 |
| 18 | 1.52E+02 | -6.24E+00 | 0.08 | 1.01 |
| 19 | 2.31E+02 | -2.31E+00 | 0.03 | 1.07 |
| 20 | 3.09E+02 | -8.55E-01 | 0.01 | 1.09 |

(Lanjutan)

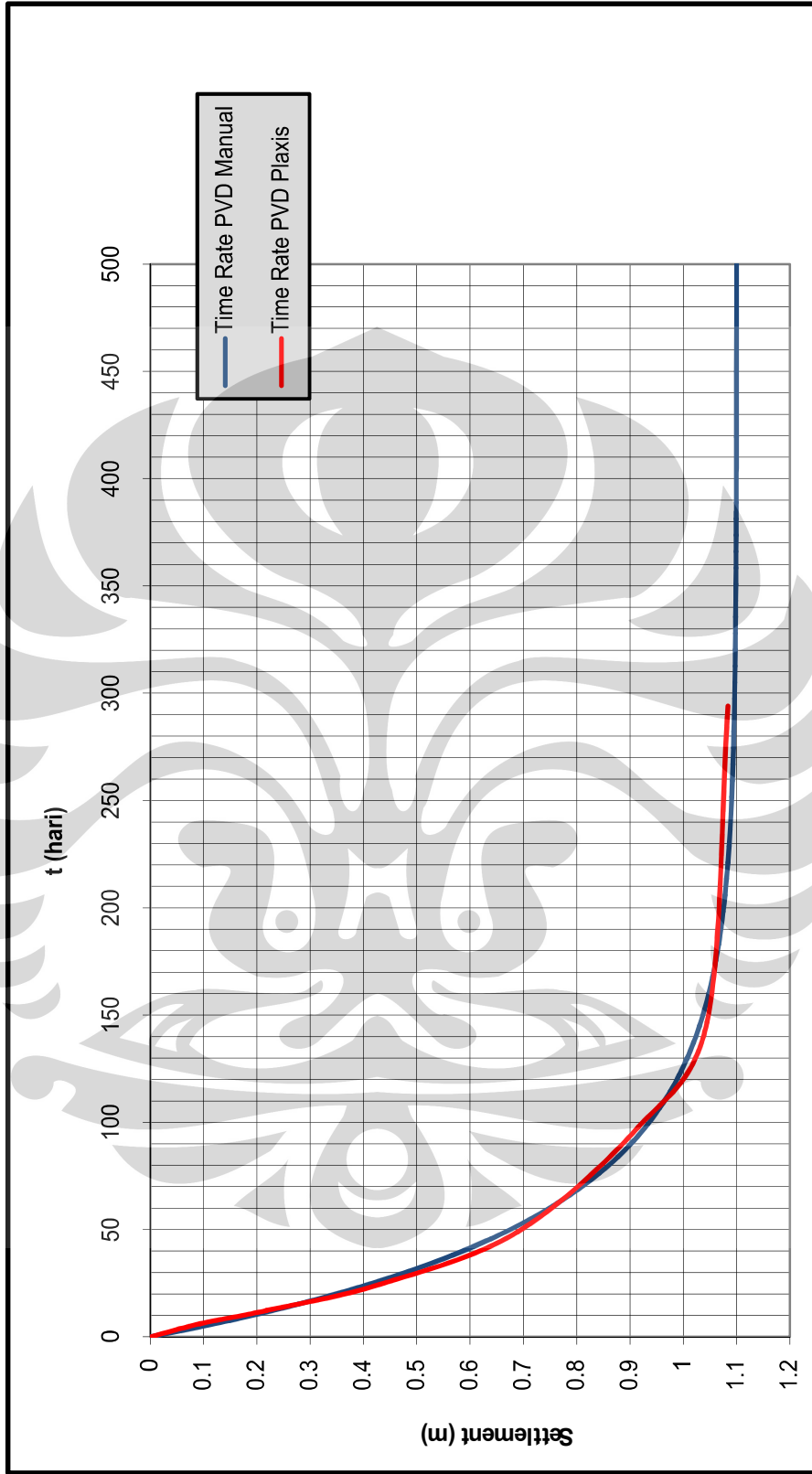
Point C (di lapisan bagian bawah)

| Point | Time [day] | Excess PP [kN/m ²] | U | Sc |
|-------|------------|--------------------------------|------|------|
| 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | | |
| 2 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | | |
| 3 | 0.00E+00 | -1.24E+00 | | |
| 4 | 0.00E+00 | -3.72E+00 | | |
| 5 | 0.00E+00 | -6.15E+00 | | |
| 6 | 0.00E+00 | -1.10E+01 | | |
| 7 | 0.00E+00 | -2.08E+01 | | |
| 8 | 0.00E+00 | -4.04E+01 | | |
| 9 | 0.00E+00 | -7.36E+01 | 1.00 | 0.00 |
| 10 | 4.91E+00 | -7.19E+01 | 0.98 | 0.03 |
| 11 | 9.81E+00 | -6.80E+01 | 0.92 | 0.08 |
| 12 | 1.47E+01 | -6.30E+01 | 0.86 | 0.16 |
| 13 | 2.45E+01 | -5.28E+01 | 0.72 | 0.31 |
| 14 | 3.43E+01 | -4.39E+01 | 0.60 | 0.44 |
| 15 | 5.40E+01 | -3.08E+01 | 0.42 | 0.64 |
| 16 | 7.36E+01 | -2.16E+01 | 0.29 | 0.78 |
| 17 | 1.13E+02 | -1.16E+01 | 0.16 | 0.93 |
| 18 | 1.52E+02 | -6.28E+00 | 0.09 | 1.01 |
| 19 | 2.31E+02 | -2.33E+00 | 0.03 | 1.07 |
| 20 | 3.09E+02 | -8.61E-01 | 0.01 | 1.09 |

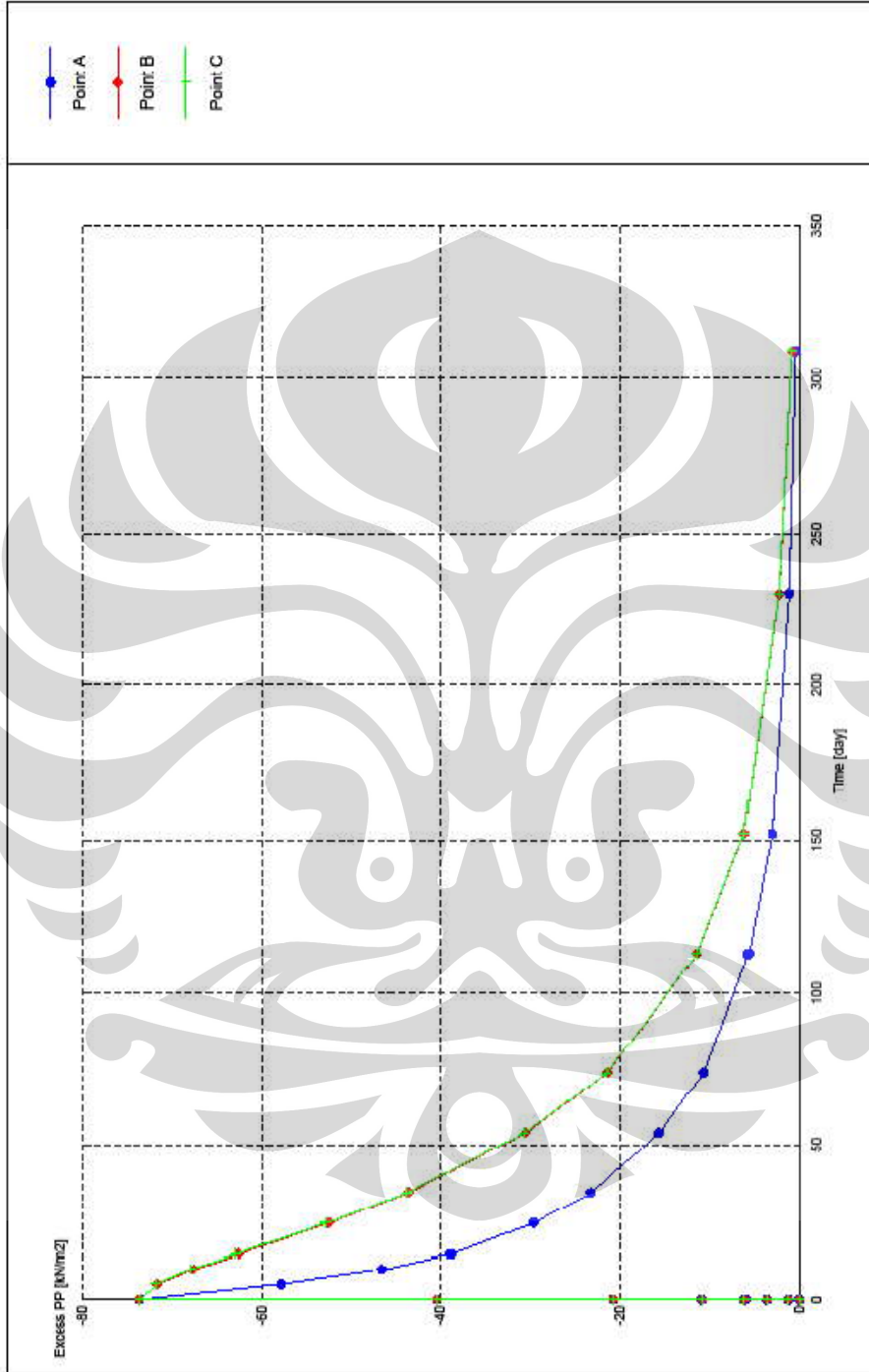
Rata - Rata

| Point | Time [day] | Sc |
|-------|------------|------|
| 1 | 0.00E+00 | |
| 2 | 0.00E+00 | |
| 3 | 0.00E+00 | |
| 4 | 0.00E+00 | |
| 5 | 0.00E+00 | |
| 6 | 0.00E+00 | |
| 7 | 0.00E+00 | |
| 8 | 0.00E+00 | |
| 9 | 0.00E+00 | 0.00 |
| 10 | 4.91E+00 | 0.10 |
| 11 | 9.81E+00 | 0.19 |
| 12 | 1.47E+01 | 0.28 |
| 13 | 2.45E+01 | 0.43 |
| 14 | 3.43E+01 | 0.55 |
| 15 | 5.40E+01 | 0.72 |
| 16 | 7.36E+01 | 0.83 |
| 17 | 1.13E+02 | 0.96 |
| 18 | 1.52E+02 | 1.02 |
| 19 | 2.31E+02 | 1.07 |
| 20 | 3.09E+02 | 1.09 |

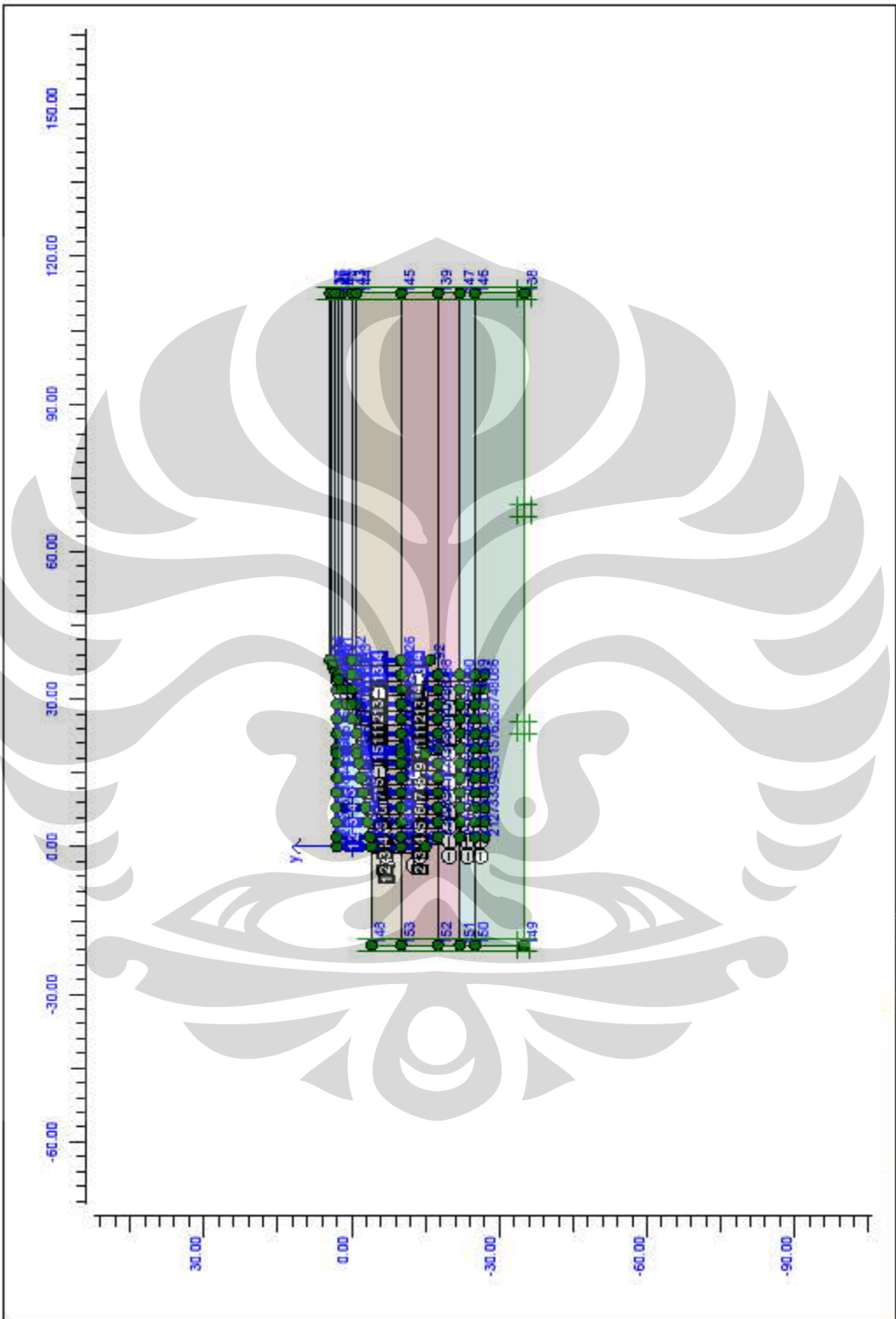
Lampiran 7 : Grafik Time Rate Consolidation PVD Manual dengan PLAXIS



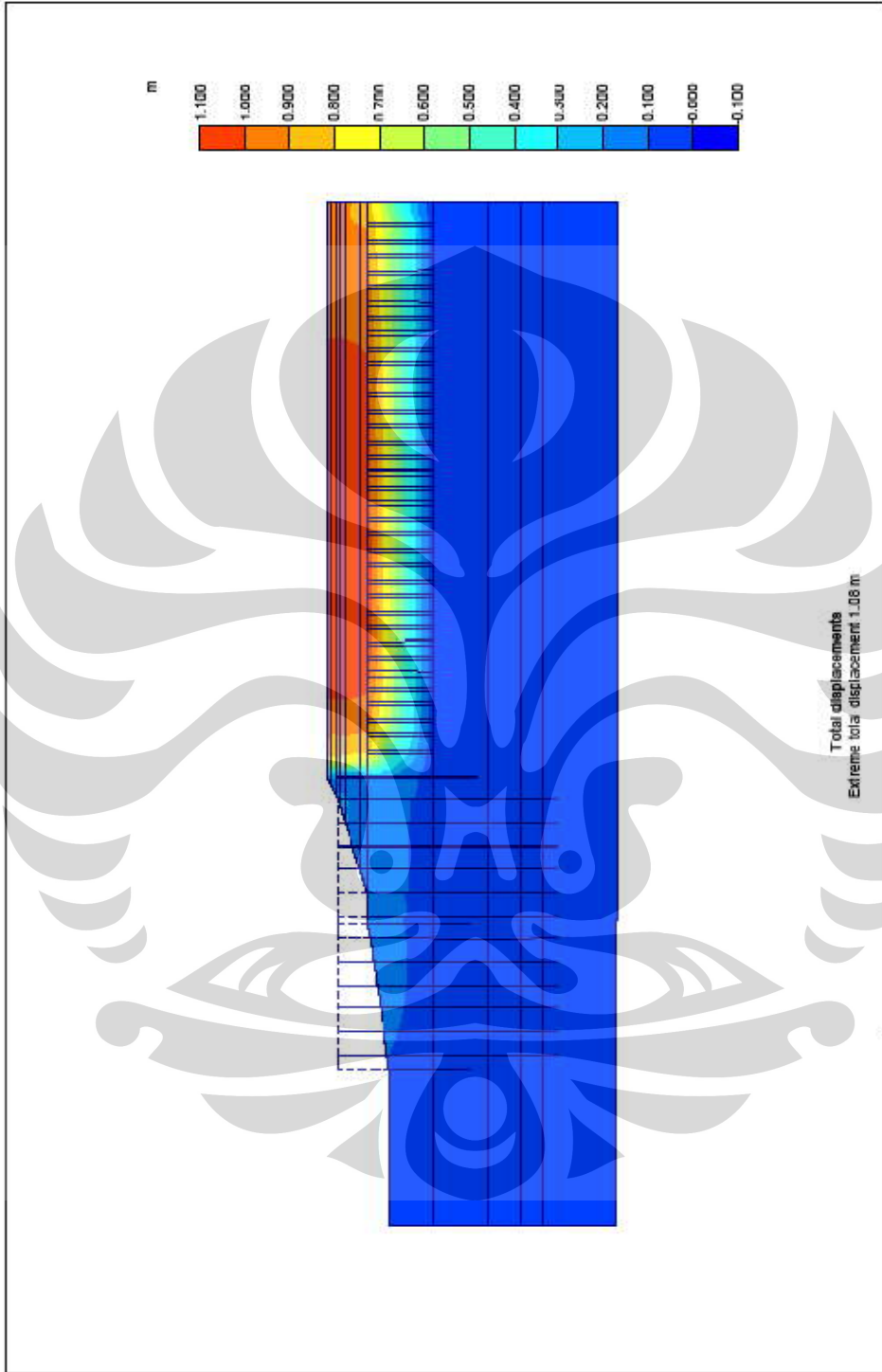
Lampiran 8 : Kurva Hasil Penurunan Pada PLAXIS



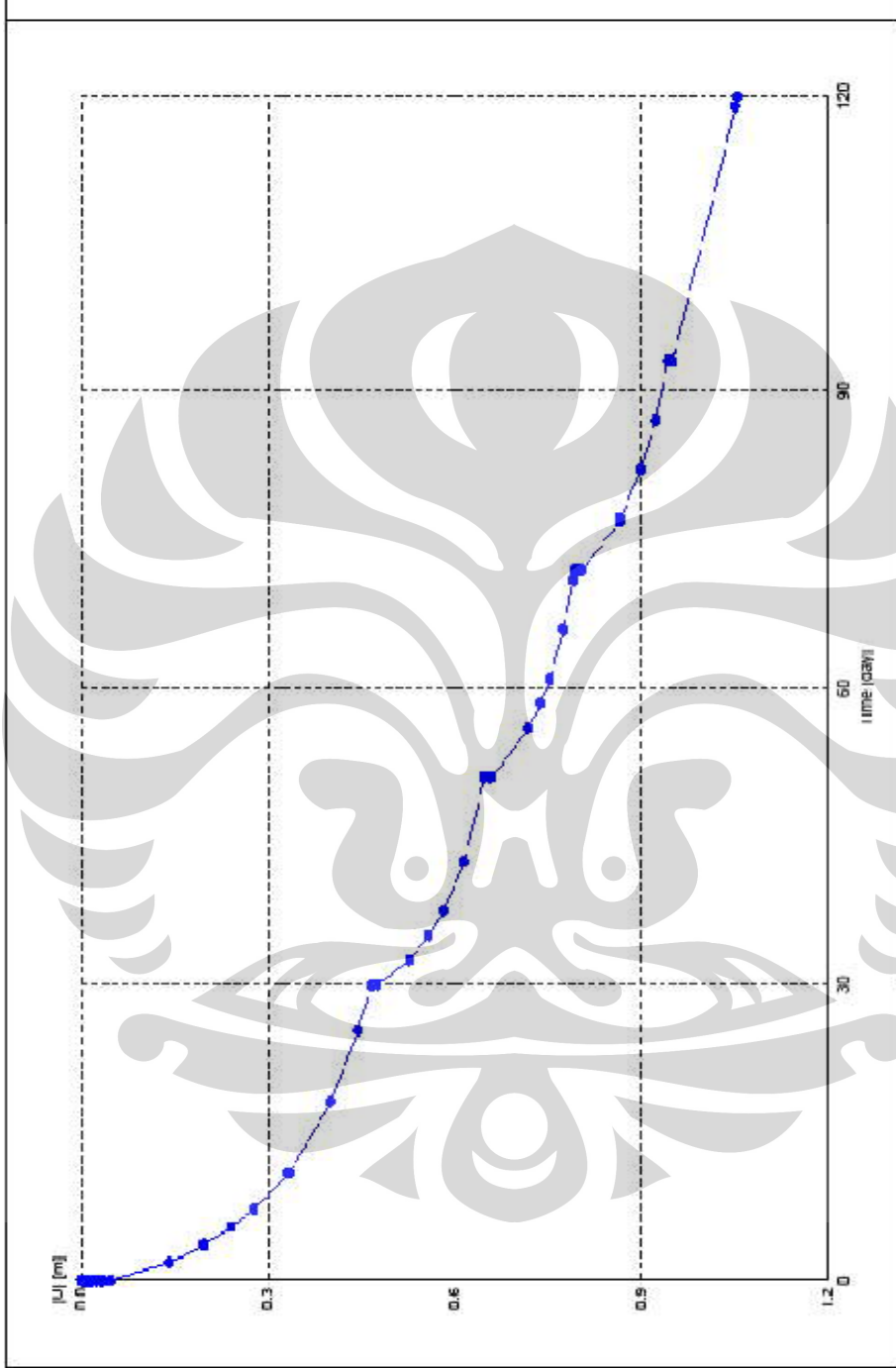
Lampiran 9 : Permodelan Geometri Timbunan



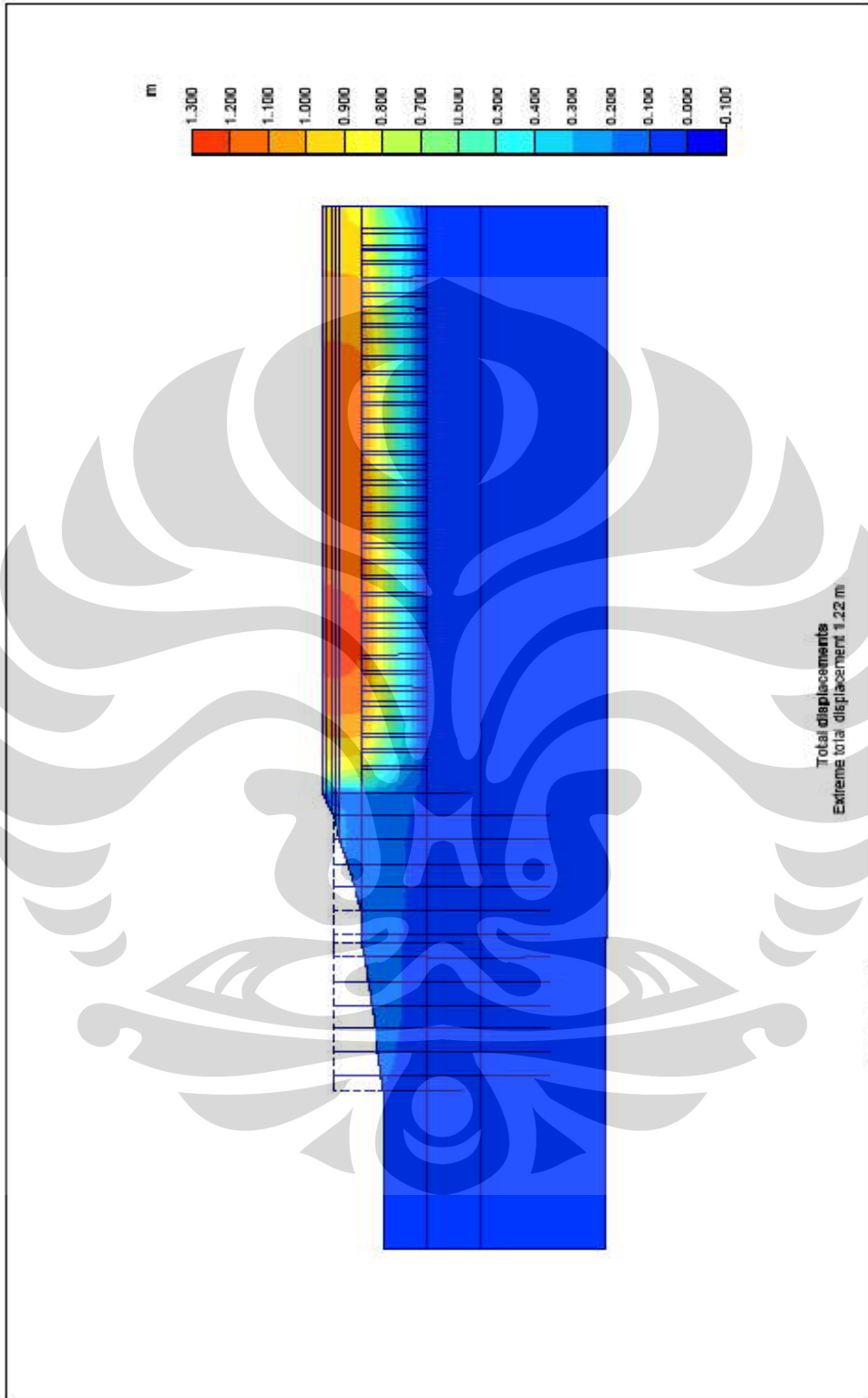
Lampiran 10 : Perhitungan Penurunan PLAXIS Parameter Undrained (Gain Strength)



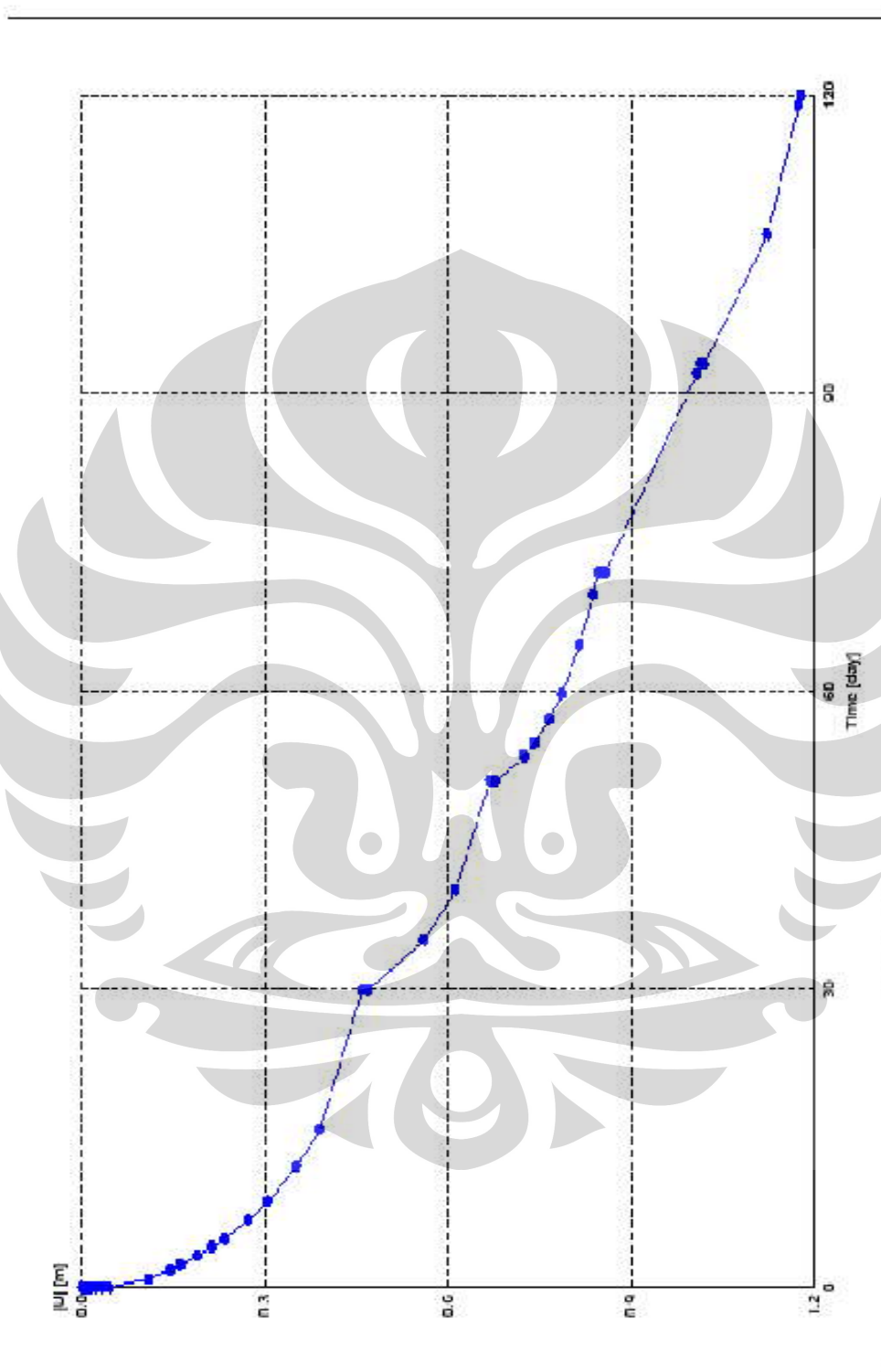
Lampiran 11 : Kurva Time vs Displacement Parameter Undrained (GainStrength)



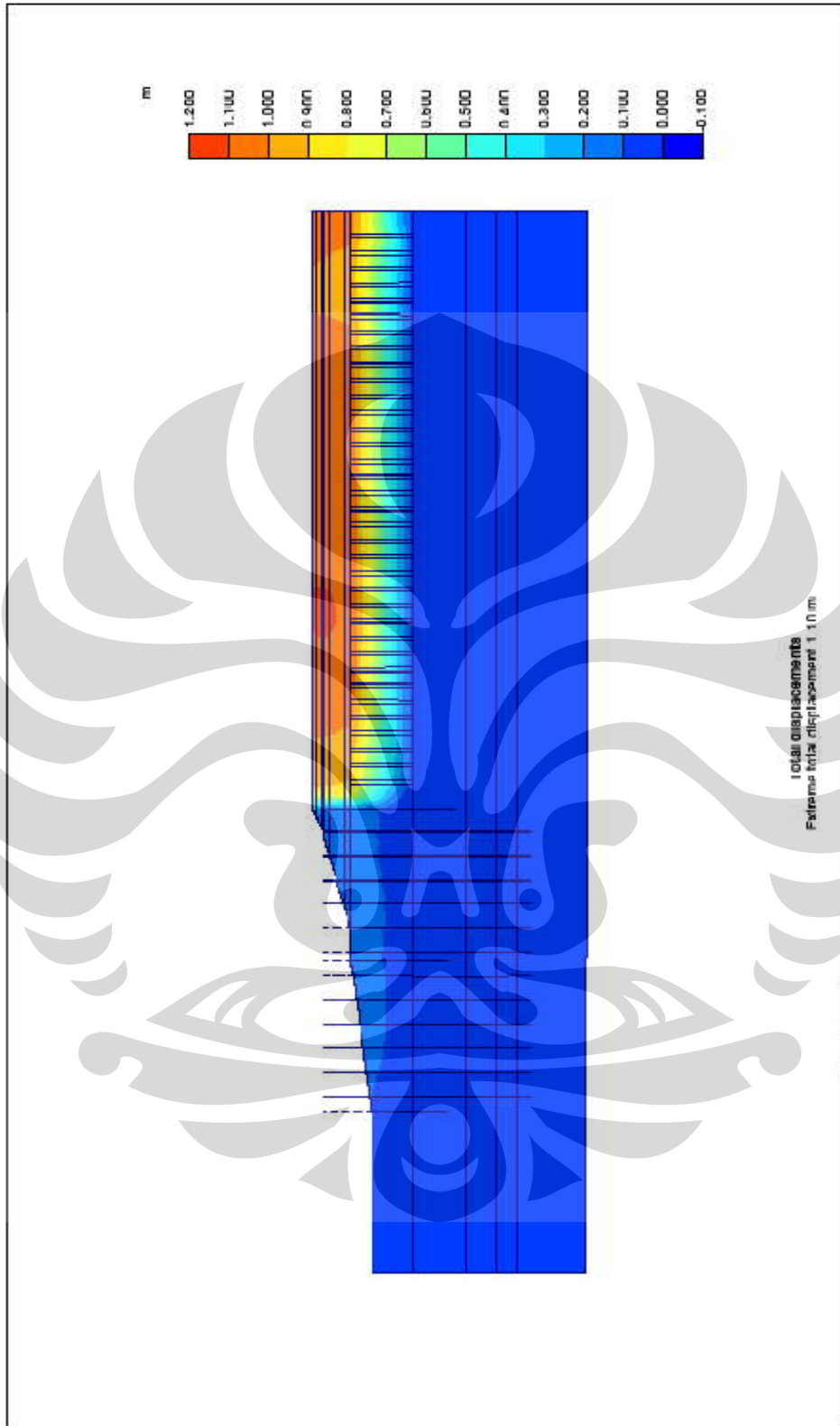
Lampiran 12 : Perhitungan Penurunan PLAXIS Parameter Undrained (tanpa Gain Strength)



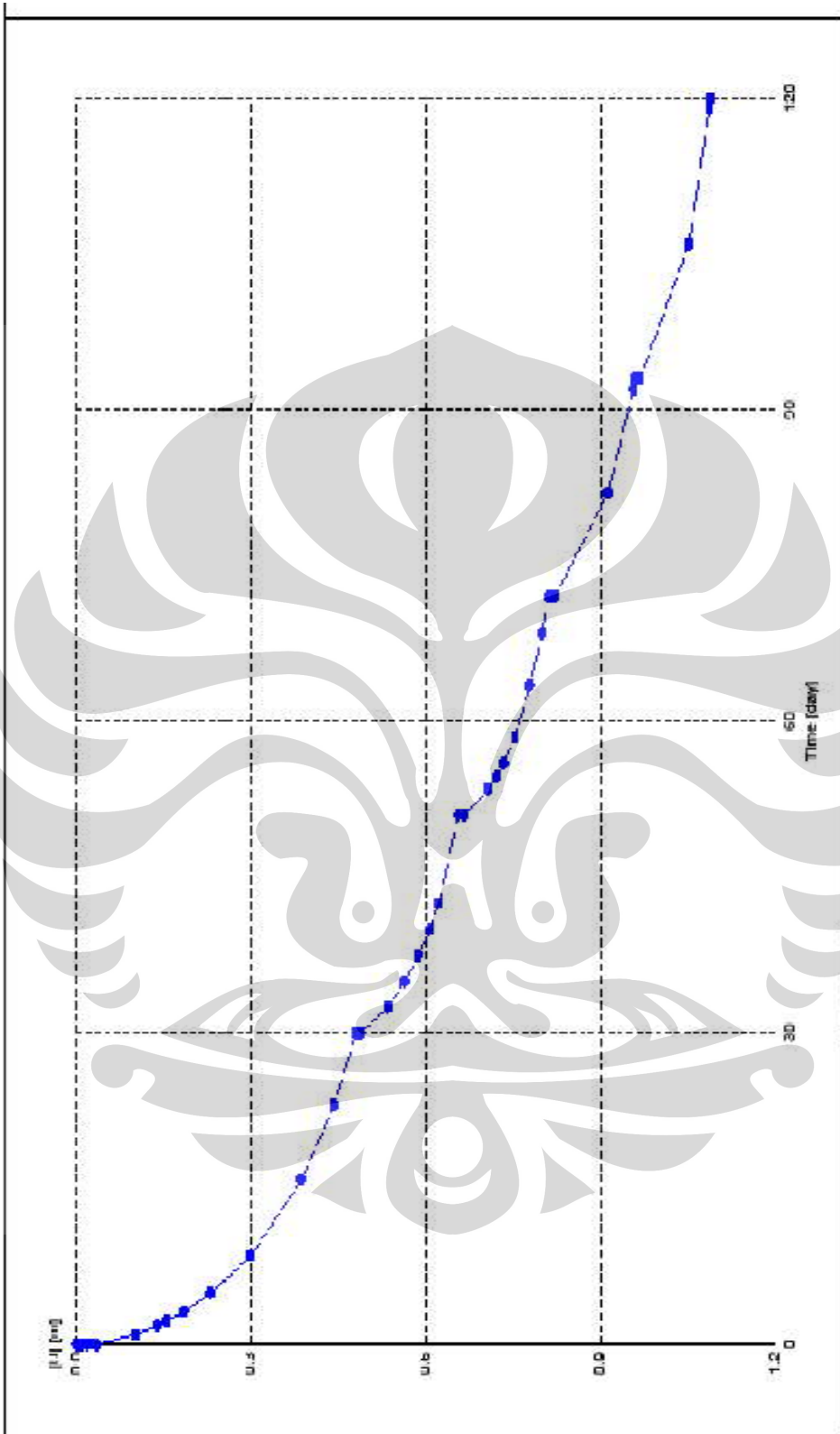
Lampiran 13 : Kurva Time vs Displacement Parameter Undrained (Tanpa Gain Strength)



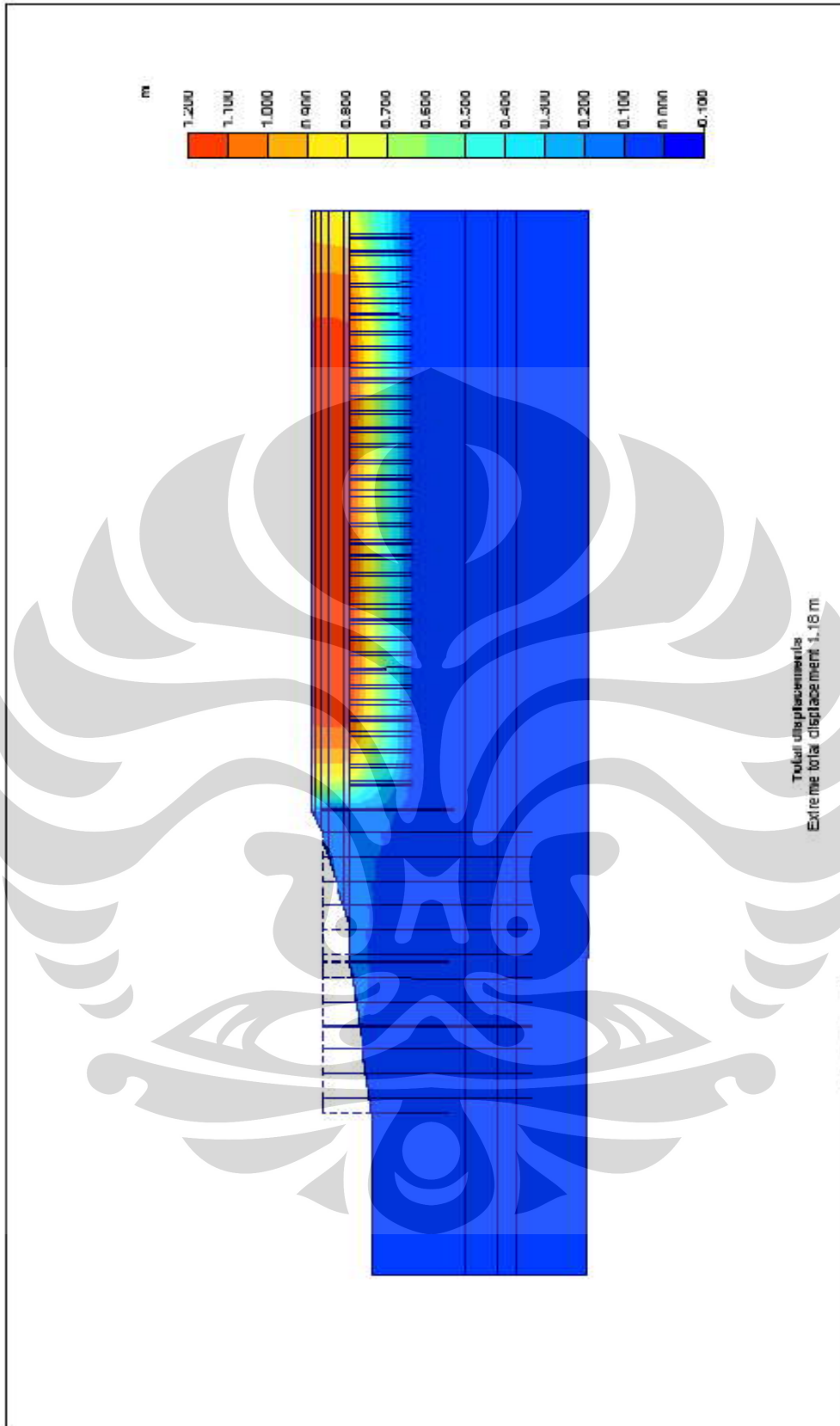
Lampiran 14 : Perhitungan Penurunan PLAXIS Parameter Drained (Material Type Undrained)



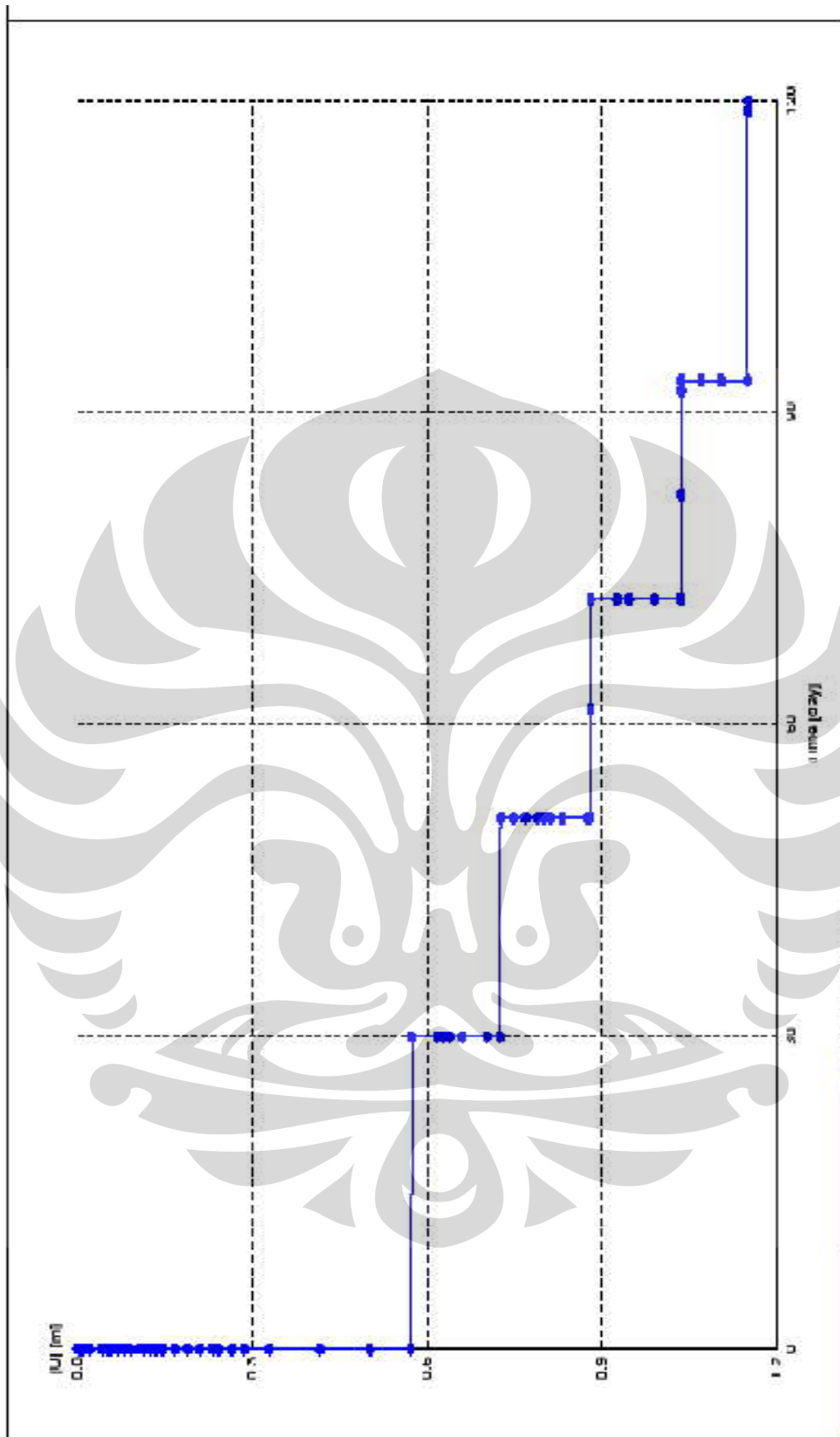
Lampiran 15 : Kurva Time vs Displacement Parameter Drained (Material Type Undrained)



Lampiran 16 : Perhitungan Penurunan PLAXIS Parameter Drained (Material Type Drained)



Lampiran 17 : Kurva Time vs Displacement Parameter Drained (Material Type Drained)



Lampiran 18 : Data Perhitungan Penurunan PLAXIS Parameter Undrained (Gain Strength)

| Parameter Undrained (Gain Strength) | | | | | |
|-------------------------------------|------------|----------|----|----------|----------|
| Point | Time [day] | U [m] | | | |
| 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 33 | 1.09E+01 | 3.33E-01 |
| 2 | 0.00E+00 | 2.73E-04 | 34 | 1.81E+01 | 4.01E-01 |
| 3 | 0.00E+00 | 4.46E-04 | 35 | 2.54E+01 | 4.45E-01 |
| 4 | 0.00E+00 | 8.13E-04 | 36 | 3.00E+01 | 4.66E-01 |
| 5 | 0.00E+00 | 1.62E-03 | 37 | 3.00E+01 | 4.66E-01 |
| 6 | 0.00E+00 | 2.45E-03 | 38 | 3.00E+01 | 4.69E-01 |
| 7 | 0.00E+00 | 2.86E-03 | 39 | 3.00E+01 | 4.75E-01 |
| 8 | 0.00E+00 | 3.06E-03 | 40 | 3.00E+01 | 4.76E-01 |
| 9 | 0.00E+00 | 3.47E-03 | 41 | 3.25E+01 | 5.27E-01 |
| 10 | 0.00E+00 | 4.28E-03 | 42 | 3.50E+01 | 5.58E-01 |
| 11 | 0.00E+00 | 4.68E-03 | 43 | 3.75E+01 | 5.82E-01 |
| 12 | 0.00E+00 | 5.49E-03 | 44 | 4.25E+01 | 6.16E-01 |
| 13 | 0.00E+00 | 6.32E-03 | 45 | 5.10E+01 | 6.48E-01 |
| 14 | 0.00E+00 | 7.11E-03 | 46 | 5.10E+01 | 6.48E-01 |
| 15 | 0.00E+00 | 7.90E-03 | 47 | 5.10E+01 | 6.55E-01 |
| 16 | 0.00E+00 | 9.49E-03 | 48 | 5.10E+01 | 6.59E-01 |
| 17 | 0.00E+00 | 9.90E-03 | 49 | 5.60E+01 | 7.19E-01 |
| 18 | 0.00E+00 | 1.03E-02 | 50 | 5.85E+01 | 7.39E-01 |
| 19 | 0.00E+00 | 1.11E-02 | 51 | 6.10E+01 | 7.54E-01 |
| 20 | 0.00E+00 | 1.27E-02 | 52 | 6.60E+01 | 7.75E-01 |
| 21 | 0.00E+00 | 1.39E-02 | 53 | 7.10E+01 | 7.91E-01 |
| 22 | 0.00E+00 | 1.37E-02 | 54 | 7.20E+01 | 7.94E-01 |
| 23 | 0.00E+00 | 1.37E-02 | 55 | 7.20E+01 | 7.94E-01 |
| 24 | 0.00E+00 | 1.52E-02 | 56 | 7.20E+01 | 8.01E-01 |
| 25 | 0.00E+00 | 1.83E-02 | 57 | 7.20E+01 | 8.05E-01 |
| 26 | 0.00E+00 | 2.35E-02 | 58 | 7.70E+01 | 8.66E-01 |
| 27 | 0.00E+00 | 3.38E-02 | 59 | 8.20E+01 | 9.00E-01 |
| 28 | 0.00E+00 | 4.67E-02 | 60 | 8.70E+01 | 9.23E-01 |
| 29 | 1.81E+00 | 1.42E-01 | 61 | 9.30E+01 | 9.43E-01 |
| 30 | 3.63E+00 | 1.97E-01 | 62 | 9.30E+01 | 9.43E-01 |
| 31 | 5.44E+00 | 2.41E-01 | 63 | 9.30E+01 | 9.49E-01 |
| 32 | 7.25E+00 | 2.78E-01 | 64 | 9.30E+01 | 9.51E-01 |
| | | | 65 | 1.19E+02 | 1.05E+00 |
| | | | 66 | 1.20E+02 | 1.06E+00 |
| | | | 67 | 1.09E+01 | 3.33E-01 |

Lampiran 19 : Data Perhitungan Penurunan PLAXIS Parameter Undrained
(tanpa Gain Strength)

Parameter Undrained (tanpa
Gain Strength)

| Point | Time [day] | U [m] | | | |
|-------|------------|----------|----|----------|----------|
| 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 32 | 6.80E+00 | 2.72E-01 |
| 2 | 0.00E+00 | 3.53E-04 | 33 | 8.61E+00 | 3.04E-01 |
| 3 | 0.00E+00 | 5.75E-04 | 34 | 1.22E+01 | 3.53E-01 |
| 4 | 0.00E+00 | 1.05E-03 | 35 | 1.59E+01 | 3.90E-01 |
| 5 | 0.00E+00 | 2.10E-03 | 36 | 3.00E+01 | 4.60E-01 |
| 6 | 0.00E+00 | 3.16E-03 | 37 | 3.00E+01 | 4.60E-01 |
| 7 | 0.00E+00 | 3.69E-03 | 38 | 3.00E+01 | 4.68E-01 |
| 8 | 0.00E+00 | 3.82E-03 | 39 | 3.00E+01 | 4.70E-01 |
| 9 | 0.00E+00 | 4.08E-03 | 40 | 3.50E+01 | 5.61E-01 |
| 10 | 0.00E+00 | 4.60E-03 | 41 | 4.00E+01 | 6.12E-01 |
| 11 | 0.00E+00 | 5.12E-03 | 42 | 5.10E+01 | 6.69E-01 |
| 12 | 0.00E+00 | 6.16E-03 | 43 | 5.10E+01 | 6.69E-01 |
| 13 | 0.00E+00 | 6.68E-03 | 44 | 5.10E+01 | 6.77E-01 |
| 14 | 0.00E+00 | 7.19E-03 | 45 | 5.10E+01 | 6.79E-01 |
| 15 | 0.00E+00 | 8.22E-03 | 46 | 5.35E+01 | 7.25E-01 |
| 16 | 0.00E+00 | 1.03E-02 | 47 | 5.48E+01 | 7.41E-01 |
| 17 | 0.00E+00 | 1.24E-02 | 48 | 5.73E+01 | 7.66E-01 |
| 18 | 0.00E+00 | 1.34E-02 | 49 | 5.98E+01 | 7.87E-01 |
| 19 | 0.00E+00 | 1.32E-02 | 50 | 6.48E+01 | 8.16E-01 |
| 20 | 0.00E+00 | 1.32E-02 | 51 | 6.98E+01 | 8.38E-01 |
| 21 | 0.00E+00 | 1.48E-02 | 52 | 7.20E+01 | 8.47E-01 |
| 22 | 0.00E+00 | 1.78E-02 | 53 | 7.20E+01 | 8.47E-01 |
| 23 | 0.00E+00 | 2.30E-02 | 54 | 7.20E+01 | 8.56E-01 |
| 24 | 0.00E+00 | 3.31E-02 | 55 | 7.20E+01 | 8.58E-01 |
| 25 | 0.00E+00 | 4.58E-02 | 56 | 9.20E+01 | 1.01E+00 |
| 26 | 9.06E-01 | 1.08E-01 | 57 | 9.30E+01 | 1.01E+00 |
| 27 | 1.81E+00 | 1.44E-01 | 58 | 9.30E+01 | 1.01E+00 |
| 28 | 2.27E+00 | 1.61E-01 | 59 | 9.30E+01 | 1.02E+00 |
| 29 | 3.17E+00 | 1.88E-01 | 60 | 9.30E+01 | 1.02E+00 |
| 30 | 4.08E+00 | 2.13E-01 | 61 | 1.06E+02 | 1.12E+00 |
| 31 | 4.98E+00 | 2.35E-01 | 62 | 1.20E+02 | 1.18E+00 |

Lampiran 20 : Data Perhitungan Penurunan PLAXIS Parameter Drained
(Material Type Undrained)

Parameter Drained (Material
Type Undrained)

| Point | Time [day] | U [m] | | | |
|-------|------------|----------|----|----------|----------|
| 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 32 | 3.00E+01 | 4.87E-01 |
| 2 | 0.00E+00 | 5.74E-05 | 33 | 3.00E+01 | 4.90E-01 |
| 3 | 0.00E+00 | 1.15E-04 | 34 | 3.25E+01 | 5.36E-01 |
| 4 | 0.00E+00 | 2.33E-04 | 35 | 3.50E+01 | 5.65E-01 |
| 5 | 0.00E+00 | 4.64E-04 | 36 | 3.75E+01 | 5.88E-01 |
| 6 | 0.00E+00 | 9.25E-04 | 37 | 4.00E+01 | 6.07E-01 |
| 7 | 0.00E+00 | 1.39E-03 | 38 | 4.25E+01 | 6.23E-01 |
| 8 | 0.00E+00 | 2.33E-03 | 39 | 5.10E+01 | 6.57E-01 |
| 9 | 0.00E+00 | 2.80E-03 | 40 | 5.10E+01 | 6.57E-01 |
| 10 | 0.00E+00 | 3.27E-03 | 41 | 5.10E+01 | 6.64E-01 |
| 11 | 0.00E+00 | 3.73E-03 | 42 | 5.10E+01 | 6.67E-01 |
| 12 | 0.00E+00 | 4.20E-03 | 43 | 5.35E+01 | 7.08E-01 |
| 13 | 0.00E+00 | 5.12E-03 | 44 | 5.48E+01 | 7.22E-01 |
| 14 | 0.00E+00 | 5.93E-03 | 45 | 5.60E+01 | 7.34E-01 |
| 15 | 0.00E+00 | 6.18E-03 | 46 | 5.85E+01 | 7.54E-01 |
| 16 | 0.00E+00 | 6.14E-03 | 47 | 6.35E+01 | 7.80E-01 |
| 17 | 0.00E+00 | 6.13E-03 | 48 | 6.85E+01 | 7.99E-01 |
| 18 | 0.00E+00 | 7.74E-03 | 49 | 7.20E+01 | 8.11E-01 |
| 19 | 0.00E+00 | 1.20E-02 | 50 | 7.20E+01 | 8.11E-01 |
| 20 | 0.00E+00 | 2.09E-02 | 51 | 7.20E+01 | 8.18E-01 |
| 21 | 0.00E+00 | 3.65E-02 | 52 | 7.20E+01 | 8.21E-01 |
| 22 | 9.06E-01 | 1.02E-01 | 53 | 8.20E+01 | 9.14E-01 |
| 23 | 1.81E+00 | 1.40E-01 | 54 | 9.20E+01 | 9.57E-01 |
| 24 | 2.27E+00 | 1.57E-01 | 55 | 9.30E+01 | 9.61E-01 |
| 25 | 3.17E+00 | 1.85E-01 | 56 | 9.30E+01 | 9.61E-01 |
| 26 | 4.98E+00 | 2.32E-01 | 57 | 9.30E+01 | 9.67E-01 |
| 27 | 8.61E+00 | 3.01E-01 | 58 | 9.30E+01 | 9.68E-01 |
| 28 | 1.59E+01 | 3.87E-01 | 59 | 1.06E+02 | 1.05E+00 |
| 29 | 2.31E+01 | 4.44E-01 | 60 | 1.19E+02 | 1.09E+00 |
| 30 | 3.00E+01 | 4.81E-01 | 61 | 1.20E+02 | 1.09E+00 |
| 31 | 3.00E+01 | 4.81E-01 | 62 | 3.00E+01 | 4.87E-01 |

Lampiran 21 : Data Perhitungan Penurunan PLAXIS Parameter Drained (Material Type Drained)

Parameter Drained (Material Type Drained)

| Point | Time [day] | U [m] | | | |
|-------|------------|----------|----|----------|----------|
| 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 32 | 3.00E+01 | 6.18E-01 |
| 2 | 0.00E+00 | 2.67E-03 | 33 | 3.00E+01 | 6.29E-01 |
| 3 | 0.00E+00 | 5.33E-03 | 34 | 3.00E+01 | 6.39E-01 |
| 4 | 0.00E+00 | 1.07E-02 | 35 | 3.00E+01 | 6.61E-01 |
| 5 | 0.00E+00 | 2.13E-02 | 36 | 3.00E+01 | 7.04E-01 |
| 6 | 0.00E+00 | 4.26E-02 | 37 | 3.00E+01 | 7.25E-01 |
| 7 | 0.00E+00 | 5.33E-02 | 38 | 5.10E+01 | 7.27E-01 |
| 8 | 0.00E+00 | 5.86E-02 | 39 | 5.10E+01 | 7.27E-01 |
| 9 | 0.00E+00 | 6.93E-02 | 40 | 5.10E+01 | 7.48E-01 |
| 10 | 0.00E+00 | 7.99E-02 | 41 | 5.10E+01 | 7.70E-01 |
| 11 | 0.00E+00 | 9.06E-02 | 42 | 5.10E+01 | 7.91E-01 |
| 12 | 0.00E+00 | 1.06E-01 | 43 | 5.10E+01 | 8.01E-01 |
| 13 | 0.00E+00 | 1.15E-01 | 44 | 5.10E+01 | 8.12E-01 |
| 14 | 0.00E+00 | 1.14E-01 | 45 | 5.10E+01 | 8.33E-01 |
| 15 | 0.00E+00 | 1.14E-01 | 46 | 5.10E+01 | 8.76E-01 |
| 16 | 0.00E+00 | 1.25E-01 | 47 | 5.10E+01 | 8.80E-01 |
| 17 | 0.00E+00 | 1.35E-01 | 48 | 6.15E+01 | 8.81E-01 |
| 18 | 0.00E+00 | 1.46E-01 | 49 | 7.20E+01 | 8.82E-01 |
| 19 | 0.00E+00 | 1.68E-01 | 50 | 7.20E+01 | 8.82E-01 |
| 20 | 0.00E+00 | 1.89E-01 | 51 | 7.20E+01 | 9.25E-01 |
| 21 | 0.00E+00 | 2.11E-01 | 52 | 7.20E+01 | 9.47E-01 |
| 22 | 0.00E+00 | 2.32E-01 | 53 | 7.20E+01 | 9.91E-01 |
| 23 | 0.00E+00 | 2.43E-01 | 54 | 7.20E+01 | 1.04E+00 |
| 24 | 0.00E+00 | 2.65E-01 | 55 | 8.20E+01 | 1.04E+00 |
| 25 | 0.00E+00 | 2.86E-01 | 56 | 9.20E+01 | 1.04E+00 |
| 26 | 0.00E+00 | 3.30E-01 | 57 | 9.30E+01 | 1.04E+00 |
| 27 | 0.00E+00 | 4.16E-01 | 58 | 9.30E+01 | 1.04E+00 |
| 28 | 0.00E+00 | 5.03E-01 | 59 | 9.30E+01 | 1.07E+00 |
| 29 | 0.00E+00 | 5.73E-01 | 60 | 9.30E+01 | 1.11E+00 |
| 30 | 3.00E+01 | 5.75E-01 | 61 | 9.30E+01 | 1.15E+00 |
| 31 | 3.00E+01 | 5.75E-01 | 62 | 1.20E+02 | 1.15E+00 |