

SKRIPSI

**ANALISA NUMERIK PENURUNAN TANAH TIMBUNAN
PADA AREA REKLAMASI**

Disusun dan diajukan oleh:

**SARA MALISAN LATI
D011 19 1111**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISA NUMERIK PENURUNAN TANAH TIMBUNAN PADA AREA REKLAMASI

Disusun dan diajukan oleh

SARA MALISAN LATI
D011 19 1111

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 12 Oktober 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Prof. Dr. Eng. Tri Harianto, ST, MT, IPU
NIP. 197203092000031002

Pembimbing Pendamping,



Ir. Ariningsih Suprapti, S.T., M.T
NIP. 197307122000032002

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP. 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Sara Malisan Lati

NIM : D011191111

Program Studi : Teknik Sipil

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Analisa Numerik Penurunan Tanah Timbunan Pada Area Reklamasi}

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

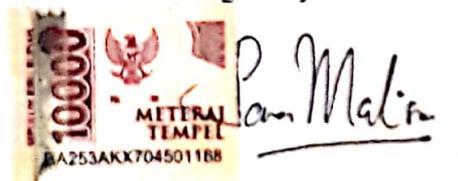
Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 26 Agustus 2023

Yang Menyatakan



Sara Malisan Lati

ABSTRAK

SARA MALISAN LATI. *Analisa Numerik Penurunan Tanah Timbunan Pada Area Reklamasi* (dibimbing oleh Tri Harianto dan Ariningsih Suprapti)

Reklamasi merupakan salah satu rekayasa ruang yang mampu memenuhi kebutuhan akan lahan untuk menampung beban populasi yang terus bertumbuh akan terpenuhi. Metode reklamasi yang paling umum digunakan di Indonesia adalah *preloading*. Konstruksi timbunan merupakan salah satu metode untuk menyesuaikan elevasi permukaan tanah. Pemberian beban timbunan di atas tanah lunak akan memberikan tambahan tegangan (σ) yang mengakibatkan penurunan tanah. Penurunan tanah yang terjadi dapat mengakibatkan kegagalan pada timbunan maupun struktur yang direncanakan di atas timbunan. Analisis ini diperlukan untuk menentukan besar penurunan dan tingkat keamanan timbunan pada reklamasi.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis besar penurunan tanah akibat timbunan yang dilakukan secara bertahap pada area reklamasi dan menganalisis stabilitas timbunan tersebut. Penurunan tanah dan stabilitas ditinjau melalui *software* Plaxis dua dimensi dengan model konstitutif *Mohr Coloumb*. Timbunan dilakukan dengan elevasi rencana 2,5 meter dengan konstruksi penimbunan bertahap.

Pemodelan stratigrafi area reklamasi adalah tanah permukaan merupakan lapisan pasir sedang hingga padat setebal 6 meter dengan nilai N-SPT berkisar 32-46, sudut geser berkisar 27-33. Lapisan kedua merupakan tanah lempung konsistensi lunak setebal 6 meter, dengan nilai N-SPT berkisar 7-12, dan kuat geser *undrained* (Cu) 12,5 kN/m². Lapisan paling bawah merupakan tanah lempung kaku setebal 3 meter dengan nilai N-SPT >60, dan kuat geser *undrained* (Cu) 50 kN/m².

Hasil dari analisis menunjukkan bahwa penurunan total dari timbunan bertahap dan tebal setiap tahap 0,5 m; dengan tinggi timbunan awal 2,5 m sebesar 0,05313 m dengan waktu konsolidasi selama 185 hari dan nilai *safety factor* 1,657. Total penurunan untuk timbunan bertahap dengan tinggi 3 m dan waktu konsolidasi 730 hari (2 tahun) sebesar 0,08987 m dan nilai *safety factor* 1,657. Sedangkan total penurunan untuk timbunan bertahap dengan tinggi 3 m dan konsolidasi mencapai *minimum excess pore pressure* sebesar 0,1464 selama 5073 hari (13 tahun, 10,9 bulan) dan nilai *safety factor* 1,661.

Kata Kunci: Timbunan, Reklamasi, Penurunan, Numerik

ABSTRACT

SARA MALISAN LATI. *Numerical Analysis of Embankment Settlement in Reclamation Area* (supervised by Tri Harianto and Ariningsih Suprapti)

Reclamation is one of the spatial engineering that able to meet the needs for land to accommodate the growing population. The reclamation method generally used in Indonesia is *preloading*. This system is suit Indonesia's tropical climate which has very high rainfall. Embankment construction is one of the method to adjust the elevation of the ground surface. Embankment load on soft soil will provide additional stress (σ) causing soil settlement. Soil settlement that occurs may conduce failure on embankment or planned structure on embankment. Analysis is needed to determine amount of settlement and safety factor of embankment in reclamation.

This study aims to analyze the amount of soil settlement due to preloading embankment in reclamation area and analyze the stability of the embankment. Soil settlement and stability are reviewed through the two dimensional Plaxis software.

The stratigraphic modeling of the reclamation area is that the surface of soil is a layer of medium to dense sand 6 meters thick with N-SPT values ranging from 32-46, friction angles ranging from 27-33. The second layer is soft clay 6 meter thick, with N-SPT values ranging from 7-12, and undrained shear strength (C_u) is 12.5 kN/m². The bottom layer is stiff clay 3 meters thick with N-SPT > 60, and undrained shear strength (C_u) is 50 kN/m².

The results of the analysis show that the total settlement of the preloading and the thickness of each stage is 0.5 m; with an initial embankment height of 2.5 m of 0.05313 m with a consolidation time of 185 days and a safety factor value of 1.657. The total settlement for preloading with 3 m height and consolidation time of 730 days (2 years) was 0.08987 m and safety factor value of 1.657. Meanwhile, the total settlement for preloading with 3 m height and consolidation reached a minimum excess pore pressure of 0.1464 for 5073 days (13 years, 10.9 months) and safety factor value of 1.661.

Keywords: Embankment, Reclamation, Settlement, Numeric

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
KATA PENGANTAR.....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	14
1.1 Latar Belakang.....	14
1.2 Rumusan Masalah.....	15
1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan.....	15
1.4 Manfaat Penelitian.....	16
1.5 Ruang Lingkup/Asumsi perancangan.....	16
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	17
2.1 Reklamasi.....	17
2.2 Timbunan.....	17
2.3 Daya Dukung Tanah.....	19
2.4 Penurunan Tanah.....	22
2.4 Perbaikan Tanah dengan Pembebanan Awal (<i>Preloading</i>).....	28
2.5 Stabilitas Timbunan.....	31
2.6 Metode Elemen Hingga.....	32
2.7 Plaxis.....	32
2.7 Model Mohr-Coulomb (Plastisitas Sempurna).....	44
2.8 Penelitian Terdahulu.....	50
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	52
3.1 Lokasi Penelitian.....	52
3.2 Instrumen.....	52
3.3 Prosedur Penelitian.....	52
3.4 Teknik Pengumpulan Data.....	54
3.5 Pemodelan Timbunan.....	58
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	61
4.1 Tinggi Kritis Timbunan.....	61
4.2 Daya Dukung Tanah.....	61
4.3 Analisis Penurunan Timbunan Bertahap.....	64
4.4 Stabilitas Timbunan.....	85
4.5 Perbandingan dengan Metode Analitis.....	94
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	96
5.1 Kesimpulan.....	96
5.2 Saran.....	96
DAFTAR PUSTAKA.....	98

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Grafik faktor pengaruh (I) akibat beban trapezium.....	25
Gambar 2 Prinsip <i>preloading</i>	29
Gambar 3 Timbunan bertahap.....	30
Gambar 4 Sistem koordinat umum tiga dimensi dan perjanjian tanda pada tegangan	40
Gambar 5. Ruang tegangan utama	41
Gambar 6. Ide dasar dari suatu model elastis plastis sempurna.....	46
Gambar 7 Bidang leleh <i>Mohr-Coulomb</i> dalam ruang tegangan utama ($c=0$).....	47
Gambar 8 Definisi E_0 dan E_{50} untuk hasil uji	48
Gambar 9 Lingkaran-lingkaran tegangan saat mengalami leleh.....	49
Gambar 10. Diagram alir penelitian.....	53
Gambar 11 Bor-log SPT (<i>Standard Penetration Test</i>).....	55
Gambar 12 Geometri timbunan.....	58
Gambar 13 <i>General</i> dan <i>dimension</i> model yang digunakan	59
Gambar 14 Penurunan akibat konstruksi timbunan 0,5m	65
Gambar 15 Penurunan akibat konsolidasi 30 hari timbunan 0,5m	65
Gambar 16 Penurunan akibat konstruksi timbunan 1m	66
Gambar 17 Penurunan akibat konsolidasi timbunan 1m.....	66
Gambar 18 Penurunan akibat konstruksi timbunan 1,5m	67
Gambar 19 Penurunan akibat konsolidasi timbunan 1,5m.....	67
Gambar 20 Penurunan akibat konstruksi timbunan 2m	68
Gambar 21 Penurunan akibat konsolidasi timbunan 2m.....	68
Gambar 22 Penurunan akibat konstruksi timbunan 2,5m	69
Gambar 23 Penurunan akibat konsolidasi timbunan 2,5m.....	69
Gambar 24 Penurunan akibat konstruksi timbunan 3m	70
Gambar 25 Penurunan akibat konsolidasi timbunan 3m.....	71
Gambar 26 Penurunan akibat konsolidasi selama 2 tahun.....	71
Gambar 27 Penurunan akibat konsolidasi tekanan air pori minimum	72
Gambar 28 <i>Node</i>	73
Gambar 29 Kurva hubungan penurunan dan waktu pada <i>node</i> 26985	74
Gambar 30 Kurva hubungan penurunan dan waktu pada <i>node</i> 27887	75
Gambar 31 Kurva hubungan penurunan dan waktu pada <i>node</i> 28619	76
Gambar 32 Kurva hubungan penurunan dan waktu pada <i>node</i> 27399	77
Gambar 33 Kurva hubungan penurunan dan waktu pada <i>node</i> 25190	78
Gambar 34 <i>Node</i> bentang deformasi.....	78
Gambar 35 Kurva hubungan penurunan dan waktu pada <i>node</i> 29264	79
Gambar 36 Kurva hubungan penurunan dan waktu pada <i>node</i> 27523	80
Gambar 37 Kurva hubungan penurunan dan waktu pada <i>node</i> 22093	81
Gambar 38 Kurva hubungan penurunan dan waktu pada <i>node</i> 14050	82
Gambar 39 Kurva hubungan penurunan dan waktu pada <i>node</i> 4133	83
Gambar 40 Kurva hubungan penurunan dan waktu pada <i>node</i> 2487	84
Gambar 41 Kurva hubungan penurunan dan waktu pada <i>node</i> 1733	85
Gambar 42 Bidang gelincir konstruksi timbunan 0,5m	86
Gambar 43 Bidang gelincir timbunan 0,5m konsolidasi 30 hari	86

Gambar 44 Bidang gelincir konstruksi timbunan 1m	87
Gambar 45 Bidang gelincir timbunan 1m konsolidasi 30 hari	87
Gambar 46 Bidang gelincir konstruksi timbunan 1,5m	88
Gambar 47 Bidang gelincir timbunan 1,5m konsolidasi 30 hari	88
Gambar 48 Bidang gelincir konstruksi timbunan 2m	89
Gambar 49 Bidang gelincir timbunan 2m konsolidasi 30 hari	89
Gambar 50 Bidang gelincir konstruksi timbunan 2,5m	90
Gambar 51 Bidang gelincir timbunan 2,5m konsolidasi 30 hari	90
Gambar 52 Bidang gelincir konstruksi timbunan 3m	91
Gambar 53 Bidang gelincir timbunan 3m konsolidasi 30 hari	91
Gambar 54 Bidang gelincir timbunan 3m konsolidasi 2 tahun.....	92
Gambar 55 Bidang gelincir timbunan 3m konsolidasi <i>minimum excess pore</i>	92
Gambar 56 Bidang gelincir timbunan setinggi 2,8536m	93

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Nilai-nilai estimasi sudut geser dalam dari hasil uji triaksial	20
Tabel 2 Faktor kapasitas daya dukung dengan sudut geser	21
Tabel 3 Hubungan derajat konsolidasi (U) dengan faktor waktu (T_v).....	28
Tabel 4 Penelitian Terdahulu	50
Tabel 5 Hasil pengujian laboratorium.....	54
Tabel 6 Tabel nilai representative modulus elastisitas tanah	56
Tabel 7 Tabel nilai representative <i>Poisson's ratio</i>	56
Tabel 8 Input Parameter Data Tanah	57
Tabel 9 Input parameter data timbunan	57
Tabel 10 Urutan konstruksi timbunan.....	60
Tabel 11 Peningkatan daya dukung tanah dasar	64
Tabel 12 Rekapitulasi penurunan akibat penimbunan	72
Tabel 13 Penurunan pada <i>node</i> 26985	73
Tabel 14 Penurunan pada <i>node</i> 27887	74
Tabel 15 Penurunan pada <i>node</i> 28619	75
Tabel 16 Penurunan pada <i>node</i> 27399	76
Tabel 17 Penurunan pada <i>node</i> 25190	77
Tabel 18. Penurunan pada <i>node</i> 29264	79
Tabel 19 Penurunan pada <i>node</i> 27523	80
Tabel 20 Penurunan pada <i>node</i> 22093	81
Tabel 21 Penurunan pada <i>node</i> 14050	82
Tabel 22 Penurunan pada <i>node</i> 4133	83
Tabel 23 Penurunan pada <i>node</i> 2487	84
Tabel 24 Penurunan pada <i>node</i> 1733	85
Tabel 25 Nilai faktor keamanan setiap tahapan penimbunan	93
Tabel 26 Rekapitulasi penurunan dan faktor keamanan setiap tahap penimbunan.....	94
Tabel 27 Besar penurunan setiap metode analisis.....	94

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
H	Tebal tanah
$H_{\text{pelaksanaan}}$	Tinggi timbunan saat pelaksanaan
H_{awal}	Tinggi awal timbunan
H_{kritis}	Tinggi kritis timbunan
S_{total}	Total penurunan yang terjadi pada tanah dasar
S_i	Penurunan seketika
S_c	Penurunan konsolidasi primer
S_s	Penurunan konsolidasi sekunder
c_u	Kohesi tanah <i>undrained</i>
γ	Berat isi tanah
γ_{sat}	Berat isi tanah jenuh
γ_w	Berat isi air
N_c	Faktor daya dukung
F	Faktor tahanan geser
BC	Panjang bidang gelincir B s/d di <i>compressible soil</i>
R	Jari-jari bidang gelincir <i>rupture circular</i>
P	Resultan gaya penggerak akibat timbunan
D	Jarak antara P dengan sumbu titik putar O_s
q_u	Daya dukung ultimit
P_u	Beban ultimit
A	Luas beban
D_f	Kedalaman fondasi
q_{un}	Daya dukung ultimit neto
h_i	Tebal lapisan tanah i
E'_1	Modulus oedometrik pada lapisan i
E	Nilai modulus Young
E'	Nilai modulus oedometrik
μ	Angka poisson

e_0	Angka pori awal
Δe	Perubahan angka pori
C_c	Indeks kompresi
C_v	Koefisien konsolidasi vertikal
C_s	Indeks pengembangan
C_α	Indeks pemampatan sekunder
$\Delta\sigma$	Penambahan tegangan vertikal
σ'_0	<i>Effective overburden pressure</i>
σ'_c	<i>Effective past overburden pressure</i>
P_0	Tegangan <i>overburden</i>
ΔP	Distribusi tengangan tanah
l	Faktor pengaruh
q_0	Beban terbagi rata
t_1	Waktu awal pemampatan sekunder
t_2	Waktu akhir pemampatan sekunder
t	Waktu konsolidasi
T_v	Faktor waktu
H_{dr}	Panjang aliran drainase

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Profil Bor-log SPT.....	100
Lampiran 2. Data pemeriksaan kadar air	101
Lampiran 3. Data pemeriksaan berat isi.....	102
Lampiran 4. Pemeriksaan batas-batas atterberg.....	103
Lampiran 5. Pemeriksaan berat jenis	105
Lampiran 6. Analisa saringan dan hirdrometer.....	106
Lampiran 7. Pengujian konsolidasi	110

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat, rahmat, karunia, serta izinnya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Analisis Numerik Penurunan Tanah Pada Area Reklamasi” sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi di Fakultas Teknik Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin.

Selesainya tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak yang senantiasa memberikan dukungan kepada penulis. Untuk itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih sebagai bentuk apresiasi penulis kepada pihak-pihak yang telah berkontribusi baik secara langsung maupun tidak langsung dalam proses penggarapan tugas akhir ini, yaitu kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, Ayahanda Aldrin Lati dan Ibunda Henny Rachman atas kasih sayang, doa, nasehat, dan segala dukungan kepada penulis.
2. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak Prof. Dr. Muh. Wihardi Tjaronge, S.T., M.Eng., selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Prof. Dr. Eng. Tri Harianto, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan serta arahan kepada penulis hingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Ibu Ir. Ariningsih Suprpti, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan serta arahan kepada penulis hingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Bapak Prof. Dr. Ir. Abd. Rachman Djamaluddin, M.T., selaku Kepala Laboratorium Mekanika Tanah yang telah memberikan wawasan tambahan selama penulis menjadi asisten laboratorium.
7. Seluruh dosen, staff, dan karyawan Departemen Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah banyak membantu dalam penulisan tugas akhir ini.
8. Stevany Bamba Lati, Samuel Lati dan Satya Nugrah sebagai saudara/saudara tercinta dan teman seumur hidup yang selalu memberikan tunjangan serta dukungannya dalam hidup penulis.
9. Jois Nande, Mufidatul Azmi, Ersiana Sari Tandilolo, Loveeane Ribka, Amirah Kurnia Syahran, dan Nur Syifa Eka Nahdiyah sebagai sahabat sekaligus teman bertukar pikiran sedari awal perkuliahan dan turut mewarnai masa perkuliahan penulis.
10. Teman-teman penelitian tugas akhir; Muh. Yusril Yushan dan Taufiq Hidayat Safaruddin yang telah berjuang bersama dan saling memberikan bantuan dalam pengerjaan tugas akhir.
11. Keluarga besar Laboratorium Mekanika Tanah; Kak Zainal, Upi, Mutiara, Jaemshon, Sultan, Yayat, Yusril, Megumi, Nusrah, Aisa, Kelvin, Danti, dan Melda.

12. Teman-teman KKD Geoteknik 2019, yang selalu memberikan bantuan dan motivasi untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
13. Saudara-saudari Geometric KMKO Sipit 19 yang senantiasa memberikan warna serta pengalaman yang sangat berharga selama masa perkuliahan.
14. Saudara-saudari PORTLAND 2020, teman-teman Departemen Teknik Sipil dan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Angkatan 2019.
15. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebut satu persatu dengan semua bantuan dan dukungan yang diberikan.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini masih banyak kekurangan dan kesalahan, karena itu saran dan kritik dari pembaca sangat diharapkan sebagai masukan untuk penulis kedepannya. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat tidak hanya bagi penulis namun kepada semua pembaca.

Gowa, 2023

Penulis

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan lahan baru di kota-kota besar di Indonesia sudah menjadi masalah yang sangat krusial. Pertumbuhan jumlah penduduk terus saja meningkat secara masif. Salah satu kota yang membutuhkan reklamasi adalah Makassar. Tercatat di Badan Pusat Statistik, jumlah penduduk kota Makassar mencapai 1.43 juta jiwa pada tahun 2022. Dengan jumlah penduduk yang sedemikian besar maka kebutuhan akan lahan juga ikut meningkat. Atas permasalahan ini perlu dilakukan rekayasa ruang. Reklamasi dapat menjadi solusi atas permasalahan tersebut. Melalui reklamasi, kebutuhan akan lahan untuk menampung beban populasi yang terus bertumbuh akan terpenuhi.

UU No. 27 Tahun 2007 tentang Pengelolaan Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil pasal 1 butir 23 mendefinisikan bahwa reklamasi adalah kegiatan yang dilakukan oleh orang dalam rangka meningkatkan manfaat sumber daya lahan ditinjau dari sudut lingkungan dan sosial ekonomi dengan cara pengurangan, pengeringan lahan, atau drainase. Pada Pasal 34 menjelaskan bahwa manfaat sosial dan ekonomi yang diperoleh lebih besar dari biaya sosial dan biaya ekonominya.

Reklamasi dilakukan untuk mengurangi tekanan atas kebutuhan lahan yang padat. Reklamasi yang baik dan benar dapat meningkatkan nilai guna bahkan mampu mendorong pertumbuhan ekonomi di wilayah tersebut. Pada negara-negara maju seperti Singapura, Hongkong, dan Jepang, reklamasi telah lama dilakukan. Kebutuhan lahan merupakan salah satu masalah pokok saat meningkatnya kegiatan ekonomi dan sosial bagi masyarakat serta tuntutan perkembangan fisik kota naik. Ketersediaan lahan dapat diatasi dengan adanya reklamasi.

Metode reklamasi yang paling umum digunakan di Indonesia adalah sistem timbunan bertahap. Konstruksi timbunan merupakan salah satu metode untuk menyesuaikan elevasi permukaan tanah. Metode reklamasi dengan sistem timbunan dilakukan dengan cara menimbun perairan hingga elevasi timbunan

berada di atas muka air laut tinggi (*high water level*). Pemberian beban timbunan di atas tanah lunak akan memberikan tambahan tegangan (σ) yang mengakibatkan deformasi dan konsolidasi sekaligus menambah besar kuat geser tanah. Penelitian ini akan dilakukan simulasi secara numerik, dengan *software* berbasis elemen hingga. Analisis menggunakan metode elemen hingga dilakukan untuk memperkirakan besar penurunan.

Dari uraian yang dikemukakan, penulis melakukan penelitian dengan judul **“Analisa Numerik Penurunan Tanah Pada Area Reklamasi”**.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan Rumusan Masalah di atas maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Bagaimana penurunan tanah akibat timbunan pada area reklamasi dengan tinggi timbunan awal (H_{inisial}) dengan analisa numerik?
2. Bagaimana penurunan tanah setelah akibat timbunan bertahap (*preloading*) pada area reklamasi dengan tinggi timbunan akhir (H_{final}) dengan analisa numerik?
3. Bagaimana stabilitas timbunan setelah dilakukan timbunan bertahap dengan analisa numerik?
4. Bagaimana perbandingan antara penurunan tanah yang dianalisis menggunakan metode numerik dengan metode analitis?

1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan

Secara umum penelitian ini bertujuan untuk memperkaya wawasan tentang perhitungan penurunan tanah menggunakan metode elemen hingga (*finite element method*). Secara khusus penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana penurunan tanah pada area reklamasi, Secara rinci penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Menghitung besar penurunan tanah akibat timbunan pada area reklamasi dengan tinggi timbunan awal (H_{inisial}) dengan analisa numerik.

2. Menghitung penurunan tanah setelah akibat timbunan bertahap (*preloading*) pada area reklamasi dengan tinggi timbunan akhir (H_{final}) dengan analisa numerik.
3. Menganalisis stabilitas timbunan setelah dilakukan timbunan bertahap menggunakan nilai *safety factor* dengan analisa numerik.
4. Membandingkan besar penurunan yang dianalisis menggunakan metode numerik dengan metode analitis.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini yaitu sebagai sumber dan bahan masukan bagi peneliti lain untuk menggali dan melakukan penelitian tentang penurunan tanah lunak pada area reklamasi menggunakan *software* bantu Plaxis dua dimensi (2D).

1.5 Ruang Lingkup/Asumsi perancangan

Penelitian ini mencakup pengolahan data penurunan tanah pada area reklamasi dengan menggunakan metode elemen hingga melalui *software* Plaxis, dan pemodelannya secara dua dimensi (2D). Dalam pelaksanaannya dilakukan beberapa batasan dan asumsi, diantaranya adalah:

1. Desain dan analisis deformasi menggunakan bantuan *software* berbasis elemen hingga (Plaxis)
2. Menggunakan pemodelan struktur tanah dua dimensi (2D)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Reklamasi

Pedoman Pengembangan Reklamasi Pantai dan Perencanaan Bangunan Pengamanannya (2004), reklamasi pantai adalah meningkatkan sumberdaya lahan dari yang kurang bermanfaat menjadi lebih bermanfaat ditinjau dari sudut lingkungan, kebutuhan masyarakat dan nilai ekonomis.

Persediaan tanah di perkotaan sangat terbatas, sedangkan kebutuhan akan tanah sangat besar seiring dengan meningkatnya kegiatan pembangunan yang dilakukan oleh perseorangan atau badan hukum. Dalam keadaan seperti ini terjadi ketidakseimbangan antara persediaan tanah dengan permintaan akan tanah untuk berbagai macam kepentingan dan keperluan (Santoso, 2015).

Reklamasi mampu meningkatkan manfaat sumber daya lahan ditinjau dari sudut lingkungan dan sosial ekonomi dengan cara pengurugan, pengeringan lahan ataupun drainase. Proses ini menjadikan lahan layak guna sehingga lahan dapat dimanfaatkan sebagai kawasan pemukiman, industri, hingga objek wisata.

2.2 Timbunan

Timbunan (*embankment*) merupakan salah satu jenis lereng buatan manusia yang memiliki kemiringan tertentu dan dapat runtuh jika tidak dirancang dengan baik. Sifat, material, metode konstruksi yang digunakan harus dirancang agar tidak terjadi keruntuhan pada timbunan. Percancangan timbunan didesain berdasarkan parameter kuat geser tanah. Terkadang suatu timbunan dibuat di atas lapisan tanah asli berupa lempung. Keruntuhan dapat terjadi pada tanah di bawah timbunan tersebut. (Sukiman, 2017)

Tanah timbunan biasanya lebih kaku dan kuat dibandingkan dengan tanah di bawahnya. Hal tersebut memungkinkan timbunan akan patah saat lapisan tanah di bawahnya mengalami deformasi. Ketika tanah asli mengalami deformasi maka dapat terjadi keruntuhan akibat tegangan dan regangan antara timbunan dan lapisan tanah lempung.

Pemberian beban pada tanah berarti memberikan tambahan tegangan (σ) pada tanah dan menambah besar kuat geser tanah. Penambahan beban di lapangan untuk meningkatkan kekuatan tanah bisa dilakukan dengan pemberian timbunan. Penggunaan timbunan umumnya bersifat permanen karena timbunan juga digunakan untuk mencapai elevasi yang diinginkan.

Umumnya penimbunan dilakukan secara bertahap menyesuaikan dengan daya dukung tanah asli agar ketika dilakukan penimbunan tidak terjadi keruntuhan. Selain meningkatkan kekuatan tanah pemberian beban timbunan juga berfungsi membantu mempercepat proses konsolidasi dan kenaikan kuat geser tanah akan terjadi setelah selesainya proses konsolidasi, saat air pori telah terdesipasi dari lapisan tanah.

Jika pemberian beban timbunan dilakukan secara bertahap, perhitungan kenaikan kekuatan tanah dihitung dengan akumulasi setiap tahapan penimbunan. Timbunan bertahap dilakukan untuk menghindari kegagalan daya dukung tanah dasar.

Tinggi timbunan dibedakan menjadi tinggi timbunan rencana, tinggi timbunan pelaksanaan, dan tinggi timbunan kritis. Adapun penjelasan sebagai berikut.

1. Tinggi timbunan rencana

Tinggi timbunan rencana adalah tinggi dari permukaan tanah timbunan yang akan direncanakan. Tinggi timbunan didasarkan pada parameter-parameter yaitu tinggi gelombang signifikan, tunggang pasang surut, serat nilai *freeboard*.

2. Tinggi timbunan pelaksanaan

Tinggi timbunan pelaksanaan memperhatikan dengan besar penurunan yang terjadi akibat beban dari timbunan awal. Tinggi timbunan pelaksanaan perlu diperhitungkan agar diperoleh elevasi timbunan yang sesuai dengan perencanaan.

$$H_{pelaksanaan} = H_{awal} + S_{total} \quad (1)$$

(Mochtar, 2000)

3. Tinggi timbunan kritis

Tinggi timbunan kritis adalah tinggi timbunan yang mampu didukung oleh tanah dasar yang tidak mengakibatkan keruntuhan. Tinggi timbunan kritis pada

prinsipnya sama dengan perhitungan daya dukung fondasi dangkal pada kondisi *short term* (kondisi paling kritis).

$$H_{kritis} = \frac{\text{kekuatan penahan}}{\text{kekuatan penggerak}} = \frac{(\pi+2)c_u}{\gamma \times H_{timbunan}} \quad (2)$$

Jika timbunan reklamasi relatif sangat lebar bila dibandingkan dengan tebal lapisan *compressible*, maka:

$$H_{kritis} = \frac{c_u \times N_c}{\gamma \times H_{timbunan}} \quad (3)$$

Dimana:

- c_u = kohesi tanah *undrained*
 γ = Berat isi timbunan

Bila tinggi pelaksanaan timbunan lebih kecil dari tinggi kritis timbunan, maka penimbunan dapat dilakukan setiap minggu tanpa penundaan. Tetapi bila tinggi pelaksanaan lebih besar dari tinggi kritis timbunan maka penimbunan harus dilaksanakan berdasarkan peningkatan daya dukung tanah dasarnya.

2.3 Daya Dukung Tanah

Kapasitas dukung ultimit (*ultimate bearing capacity*) (q_u) didefinisikan sebagai beban maksimum persatuan luas dimana tanah masih dapat mendukung beban tanpa mengalami keruntuhan. Bila dinyatakan dalam persamaan, maka:

$$q_u = \frac{P_u}{A} \quad (4)$$

Dimana:

- q_u = kapasitas dukung ultimit atau kapasitas dukung batas (kN/m^2)
 P_u = beban ultimit atau beban batas (kN)
 A = luas beban (m^2)

Bila tanah mengalami pembebanan, tanah akan mengalami distorsi dan penurunan. Jika beban ini berangsur-angsur ditambah, penurunan juga bertambah. Lama-kelamaan terjadi kondisi dimana pada beban tetap, terjadi penurunan yang sangat besar. Kondisi ini menunjukkan bahwa keruntuhan kapasitas dukung telah terjadi (Hardiyatmo, 2002)

Pada penggunaan persamaan kapasitas daya dukung tanah, perlu dipertimbangkan apakah tanah dasar merupakan tanah yang lolos air atau tidak.

Pada tanah yang mudah meloloskan air pada setiap pembebanannya relatif tidak terjadi kelebihan tekanan air pori, maka parameter kuat geser yang digunakan harus diperoleh dari pengujian dalam kondisi terdrainase atau digunakan parameter tegangan efektif.

Pada tanah berbutir halus yang terendam air, maka parameter kuat geser tanah yang digunakan pada tinjauan jangka pendek harus didasarkan pada kondisi tidak terdrainase karena tanah ini tidak mudah meloloskan air. Jadi, parameter kuat geser yang digunakan harus berupa parameter tegangan total dengan $\phi_u = 0$ dan kohesi tanah *undrained* = c_u . Setelah waktu yang lama tanah ini akan berkonsolidasi sehingga kuat geser tanah akan berangsur-angsur bertambah. Sehingga dalam tinjauan jangka panjang, analisis kapasitas dukung tanah harus didasarkan pada parameter kuat geser tegangan efektif (c' dan ϕ'). Dalam kondisi ini akan dihasilkan nilai kapasitas dukung tanah yang lebih tinggi daripada perhitungan kapasitas dukung tanah jangka pendek (Hardiyatmo, 2002).

Nilai estimasi sudut geser dalam dari hasil uji triaksial dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Nilai-nilai estimasi sudut geser dalam dari hasil uji triaksial

Jenis Tanah	Macam uji triaksial		
	UU	CU	CD
Kerikil			
Ukuran sedang	40°-55°	-	40°-55°
Berpasir	35°-50°	-	35°-50°
Pasir			
Kering dan tidak padat	28,5°-34°	-	-
Jenuh dan tidak padat	28,5°-34°	-	-
Kering dan padat	35°-46°	-	43°-50°
Jenuh dan padat	1°-2° kurang daripada pasir kering dan padat	-	43°-50°
Lanau atau pasir-berlanau			
Tidak padat	20°-22°	-	27°-30°
Padat	25°-30°	-	30°-35°
Lempung	0° (jika jenuh)	14°-20°	20°-42°

Sumber: Bowles, 1977

Pada fondasi berupa bujur sangkar, lingkaran, dan fondasi memanjang yang terletak pada tanah lempung jenuh, Skempton (1951) mengusulkan persamaan daya dukung ultimit dengan memperhatikan faktor kedalaman fondasi, sebagai berikut:

$$q_u = c_u N_c + D_f \gamma \quad (5)$$

dan daya dukung ultimit neto:

$$q_{un} = c_u N_c \quad (6)$$

Dimana:

- q_u = daya dukung ultimit (kN/m^2)
- q_{un} = daya dukung ultimit neto (kN/m^2)
- D_f = kedalaman fondasi (m)
- γ = berat volume tanah (kN/m^3)
- c_u = kohesi tanah *undrained* (kN/m^2)

Adapun variasi sudut geser dalam tanah dengan faktor kapasitas dukung terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Faktor kapasitas daya dukung dengan sudut geser

ϕ'	N_c	N_q	N_γ	ϕ'	N_c	N_q	N_γ
0	5,14	1,00	0,00	26	22,25	11,85	12,54
1	5,38	1,09	0,07	27	23,94	13,20	14,47
2	5,63	1,20	0,15	28	25,80	14,72	16,,72
3	5,90	1,31	0,24	29	27,86	16,44	19,34
4	6,19	1,43	0,34	30	30,14	18,40	22,40
5	6,49	1,57	0,45	31	32,67	20,63	25,99
6	6,81	1,72	0,57	32	35,49	23,18	30,22
7	7,16	1,88	0,71	33	38,64	26,09	35,19
8	7,53	2,06	0,86	34	42,16	29,44	41,06
9	7,92	2,25	1,03	35	46,12	33,30	48,03
10	8,35	2,47	1,22	36	50,59	37,75	56,31
11	8,80	2,71	1,44	37	55,63	42,92	66,19
12	9,28	2,97	1,69	38	61,35	48,93	78,03
13	9,81	3,26	1,97	39	67,87	55,96	92,25
14	10,37	3,59	2,29	40	75,31	64,20	109,41
15	10,98	3,94	2,65	41	83,86	73,90	130,22
16	11,63	4,34	3,06	42	93,71	85,38	155,55
17	12,34	4,77	3,53	43	105,11	99,02	186,54
18	13,10	5,26	4,07	44	118,37	115,31	224,64

19	13,93	5,80	4,68	45	133,88	134,88	271,76
20	14,83	6,40	5,39	46	152,10	158,51	330,35
21	15,82	7,07	6,20	47	173,64	187,21	403,67
22	16,80	7,82	7,13	48	199,26	222,31	496,01
23	18,05	8,66	8,20	49	229,93	265,51	613,16
24	19,32	9,60	9,44	50	266,89	319,07	762,89
25	20,72	10,66	10,88				

Sumber: Das, 2011

2.4 Penurunan Tanah

Penurunan tanah (*settlement*) disebabkan oleh tegangan yang meningkat akibat pambebanan yang menekan lapisan tanah. Penurunan tanah terbagi menjadi dua kategori yaitu *immediate settlement* dan *consolidation settlement*. *Immediate settlement* terjadi secara langsung setelah konstruksi dilakukan sedangkan *consolidation settlement* terjadi secara bertahap dari waktu ke waktu. *Total settlement* adalah jumlah dari *immediate settlement* dan *consolidation settlement* (Das, 2007)

Penurunan total yang terjadi pada tanah dapat dirumsukan sebagai berikut:

$$S_{total} = S_i + S_c + S_s \quad (7)$$

Dimana:

S_{total} = total settlement

S_i = immediate settlement

S_c = primary consolidation settlement

S_s = secondary consolidation settlement

Apabila *secondary consolidation settlement* (penurunan konsolidasi sekunder) diabaikan (umum), maka:

$$S_{total} = S_i + S_c \quad (8)$$

2.2.1 Penurunan Seketika

Penurunan seketika (*immediate settlement*) merupakan akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah dan jenuh air, tanpa adanya perubahan kadar air. Perhitungan penurunan seketika umumnya didasarkan pada penurunan yang diturunkan dari teori elastisitas. (Darwis, 2018)

Biarez (1998) menyajikan metode perhitungan besar *immediate settlement* dari lapisan tanah dengan persamaan:

$$S_i = q \sum_i \frac{h_i}{E'_{i_i}} \quad (9)$$

Dimana:

S_i	= <i>immediate settlement</i>	(m)
q	= tegangan yang bekerja pada permukaan tanah	(kN/m ²)
h_i	= tebal lapisan tanah i	(m)
E'_{i_i}	= modulus oedometrik pada lapisan i	(t/m ²)

Korelasi antara modulus young dengan modulus oedometrik adalah sebagai berikut :

$$E = E' \left(1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu} \right) \quad (10)$$

Dimana:

E	= nilai modulus Young
E'	= nilai modulus Oedometrik
μ	= nilai koefisien Poisson

2.2.2 Konsolidasi Primer

Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*) merupakan penurunan tanah akibat keluarnya air dari dalam pori tanah. Keluarnya air dari pori tanah disebabkan oleh beban yang bekerja di atas permukaan tanah (Hermansyah, 2018).

Primary consolidation (konsolidasi primer) ialah periode selama tekanan air pori secara lambat laun dipindahkan ke tegangan efektif yang disebabkan oleh keluarnya air dari pori-pori tanah. Penurunan tanah akibat konsolidasi primer dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang diberikan oleh Das (1985), sebagai berikut:

Untuk tanah terkonsolidasi normal (NC-*soil*)

$$S_{c\sim} = \frac{H}{1+e_o} \left[C_c \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma}{\sigma'_o} \right) \right] \quad (11)$$

Untuk tanah terkonsolidasi lebih (OC-*soil*)

$$\text{Bila } (\sigma'_o + \Delta\sigma \leq \sigma'_o')$$

$$S_{c\sim} = \frac{H}{1+e_0} \left[C_s \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma}{\sigma'_o} \right) \right] \quad (12)$$

Bila $(\sigma'_o + \Delta\sigma > \sigma'_c)$

$$S_{c\sim} = \left[\frac{H}{1+e_0} C_s \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} \right] + \left[\frac{H}{1+e_0} C_c \log \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma}{\sigma'_c} \right] \quad (13)$$

Dimana:

- S_c = pemampatan konsolidasi pada lapisan tanah yang ditinjau
- H = tebal lapisan tanah *compressible*
- e_0 = angka pori awal (*initial void ratio*)
- C_c = indeks kompresi
- C_s = indeks pengembangan
- $\Delta\sigma$ = beban *surcharge* / penambahan tegangan vertikal di titik yang ditinjau (di tengah-tengah lapisan) akibat penambahan beban.
- σ'_o = tekanan tanah vertikal efektif dari suatu titik di tengah-tengah lapisan ke-i akibat beban tanah sendiri di atas titik tersebut di lapangan (*effective overburen pressure*).
- σ'_c = tegangan konsolidasi efektif dari suatu titik di masa lampau (*effective past overburden pressure*).

Cara-cara menentukan parameter-parameter tanah yang akan digunakan dalam perhitungan *consolidation settlement* menurut Das (1985) ialah:

1. Beban (*Surcharge*)

Surcharge ialah besarnya beban yang bekerja di atas permukaan tanah asli (*compressible soil*) dalam satuan tegangan. Penentuan persamaan tegangan dari distribusi tegangan tanah yang dialami.

$$P_o = \gamma_{tanah} \times H \quad \text{sek}$$

Untuk tanah terendam air, digunakan berat volume tanah efektif

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (14)$$

Dimana:

- γ_{tanah} = berat volume tanah
- H = tebal lapisan tanah
- γ_{sat} = berat isi jenuh
- γ_w = berat volume air

2. Distribusi tegangan tanah

Distribusi tegangan tanah (ΔP) dipengaruhi oleh lapisan tanah. Semakin dalam lapisan maka pengaruh ΔP yang diterima sedikit. Parameter ini dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

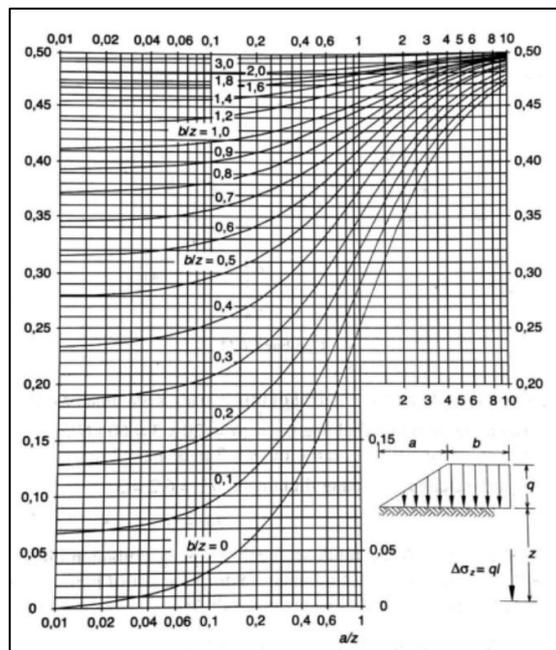
$$\Delta P = I \times q_0 \quad (15)$$

Dimana:

I = faktor pengaruh

q_0 = beban terbagi rata di atas (t/m^2)

3. Koefisien pengaruh I



Gambar 1 Grafik faktor pengaruh (I) akibat beban trapezium

Sumber : Darwis, 2018

Berdasarkan grafik Osterberg pada Gambar 1, besarnya nilai koefisien pengaruh (I) untuk perhitungan besarnya tegangan vertikal (ΔP) yang diterima oleh suatu titik tinjau tertentu dipengaruhi oleh a, b, dan z yang merupakan karakteristik geometrik dan bentuk timbunan reklamasi dan kedalaman tinjau.

4. *Compressible* dan *Swelling Index*

Compression index (C_c) dan *swelling index* (C_s) diperoleh dari hasil tes laboratorium (*consolidation test*).

5. Angka pori (*initial void ratio*)

Angka pori awal (e_0) diperoleh dari hasil tes laboratorium (*volumetric* dan *gravimetric*)

6. Tegangan *overburden* efektif (P_0')

Overburden pressure effective (P_0') adalah tegangan vertikal efektif dari tanah asli. Persamaan untuk menentukan tegangan vertikal efektif adalah sebagai berikut :

$$P_0' = \gamma' x h \quad (16)$$

Dimana:

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_{air} \text{ (bila berada di bawah permukaan air tanah)}$$

h = setengah dari lapisan lempung yang diperhitungkan

2.2.3 Konsolidasi Sekunder

Konsolidasi sekunder (*secondary consolidation*) adalah penurunan yang masih tetap terjadi setelah konsolidasi primer (setelah tekanan air pori sama dengan nol) sebagai akibat dari penyesuaian plastis butiran tanah (Das, 1995).

Secondary compression index (indeks pemampatan sekunder) dapat didefinisikan sebagai :

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta e}{\log(t_2/t_1)} \quad (17)$$

Dimana:

C_α = indeks pemampatan sekunder

Δe = perubahan angka pori

t_1 = waktu awal pemampatan sekunder

t_2 = waktu akhir pemampatan sekunder

2.2.4 Kondisi Tanah Saat Konsolidasi

Ada tiga kondisi tanah berdasarkan tegangan yang dialami saat proses konsolidasi:

1. *Normally Consolidated* (OCR = 1)

Pada kondisi ini, tegangan efektif *overburden* merupakan tegangan maksimum yang dialami oleh tanah.

2. *Over Consolidated* ($OCR > 1$)

Pada kondisi ini, tegangan efektif *overburden* lebih kecil daripada tegangan yang pernah dialami oleh tegangan tersebut. Tegangan efektif *overburden* maksimum yang pernah dialami sebelumnya disebut *preconsolidation pressure* (P_c).

3. *Under Consolidated* ($OCR < 1$)

Pada kondisi ini, tegangan efektif *overburden* belum mencapai maksimum, sehingga peristiwa konsolidasi masih berlangsung pada saat sampel tanah diambil.

2.2.5 Waktu Konsolidasi

Menurut Terzaghi, lama waktu konsolidasi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$t = \frac{T_v(H_{dr})^2}{C_v} \quad (18)$$

Beberapa parameter tanah yang digunakan untuk menentukan lamanya penurunan konsolidasi antara lain:

3.1 Faktor waktu (T_v)

Faktor waktu didefinisikan sebagai fungsi dari derajat konsolidasi ($U\%$) dan bentuk dari distribusi tegangan air pori (u) di dalam tanah (aliran satu arah atau dua arah).

3.2 Panjang aliran drainase

Jika tebal lapisan *compressible* (tanah lempung) adalah H , maka panjang aliran drainase adalah H_{dr} , dimana: $H_{dr} = \frac{1}{2} H$, jika aliran air selama proses konsolidasi adalah dua arah (ke atas dan ke bawah). $H_{dr} = H$, jika arah drainase adalah satu arah (ke atas atau ke bawah). Hal ini terjadi jika di atas atau di bawah lapisan lempung merupakan lapisan yang kedap air.

3.3 Koefisien konsolidasi vertikal (C_v)

Koefisien konsolidasi vertikal didapat dari grafik hubungan antara besarnya penurunan tanah dengan waktu (t), berdasarkan hasil konsolidasi *oedometric test*, yaitu :

$$C_v = \frac{1,197(H)^2}{t_{50}} \quad (19)$$

Apabila tanah memiliki lapisan yang heterogen dan mempunyai beberapa nilai C_v , maka perhitungan untuk nilai C_v yang digunakan dalam perencanaan adalah harga C_v rata-ratanya (ABSI 1965):

$$Cv_{rata-rata} = \frac{(\sum_i h_i)^2}{\left(\sum_i \frac{h_i}{\sqrt{Cv_i}}\right)} \quad (20)$$

Dimana:

- H = Tebal total lapisan *compressible*
 H_i = Tebal lapisan *compressible* lapisan ke-i
 C_{vi} = Harga C_v lapisan ke-i

Tabel 3 Hubungan derajat konsolidasi (U) dengan faktor waktu (T_v)

Derajat konsolidasi U (%)	Faktor waktu / T_v		
	Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3
0	0	0	0
10	0,008	0,048	0,050
20	0,031	0,090	0,101
30	0,071	0,115	0,157
40	0,126	0,207	0,220
50	0,197	0,281	0,294
60	0,287	0,371	0,384
70	0,403	0,488	0,501
80	0,567	0,652	0,665
90	0,848	0,933	0,946
100	∞	∞	∞

The diagram shows three cases of consolidation:

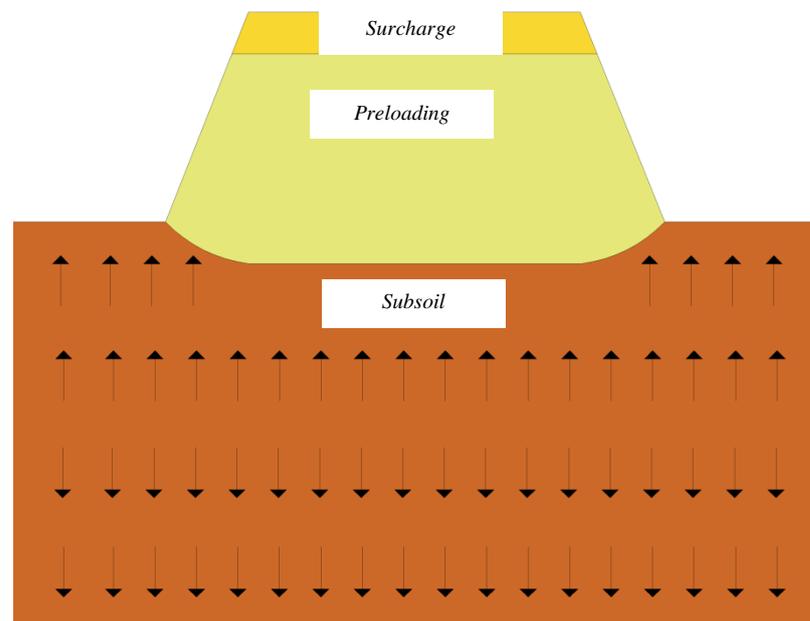
- Kasus 1:** A rectangular soil layer of thickness H with two vertical boundaries. The consolidation front is shown as a vertical line, indicating uniform consolidation.
- Kasus 2:** A rectangular soil layer of thickness H with one vertical boundary and one semi-infinite boundary. The consolidation front is shown as a semi-circle, indicating semi-infinite consolidation.
- Kasus 3:** A rectangular soil layer of thickness H with two vertical boundaries. The consolidation front is shown as a triangle, indicating finite consolidation.

Sumber: Syarifuddin dkk, 2013

2.4 Perbaikan Tanah dengan Pembebanan Awal (*Preloading*)

Metode pembebanan awal (*preloading*) adalah metode penimbunan beban yang besarnya sama dengan besar beban konstruksi yang akan dilaksanakan. *Preloading* umumnya mengacu pada kompresi tanah dibawah tekanan vertikal yang diterapkan sebelum konstruksi. *Preloading* dilaksanakan ketika tanah dasar memiliki daya dukung yang tidak cukup kuat. *Preloading* secara umum terbagi atas dua, yaitu *preloading* secara konvensional dan *preloading* dengan vakum. *Preloading* secara konvensional dilakukan dengan memberikan beban diatas tanah dasar. Ketika beban diterapkan pada tanah lunak, maka akan diterima oleh tekanan air pori terlebih dahulu. Ketika tanah memiliki permeabilitas yang rendah, tekanan air akan meningkat secara bertahap, karena air pori mengalir sangat lambat secara vertikal. Agar tidak terjadi kegagalan ataupun masalah stabilitas,

maka beban harus dibagi dalam beberapa tahap. Prinsip *preloading* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Prinsip *preloading*

Surcharge dapat dihilangkan ketika penurunan yang terjadi telah melewati perkiraan. Hal ini sebaiknya tidak terjadi sebelum *excess pore water pressure* (tekanan air pori berlebih) yang tersisa dibawah peningkatan tegangan yang diakibatkan oleh pembebanan. Dengan menambah waktu *temporary overloading* (beban berlebih sementara), atau ukuran beban berlebih, maka konsolidasi sekunder dapat dikurangi bahkan dihilangkan. Hal ini dikarenakan penggunaan *surcharge* yang lebih tinggi dari beban yang bekerja, maka tanah akan selalu berada dalam keadaan *overconsolidated* dan konsolidasi sekunder untuk tanah *overconsolidated* akan jauh lebih kecil dari tanah *normally consolidated*. Hal ini akan sangat bermanfaat untuk desain geoteknik selanjutnya (Chu dkk, 2004)

Sebagai akibat terjadinya konsolidasi pada suatu lapisan tanah, maka tanah tersebut akan menjadi lebih padat yang berarti kekuatan tanah juga meningkat. Apabila proses penimbunan dilakukan secara bertahap, maka daya dukung tanah juga akan meningkat secara bertahap akibat meningkatnya kuat geser *undrained* tanah karena peningkatan tegangan efektif pada tanah. Mesri (1975) merumuskan peningkatan kohesi tanah menggunakan persamaan .

$$\left(\frac{c_u}{\sigma_p}\right) = 0.22 \quad (21)$$

Adapun ketinggian timbunan harus dikendalikan agar terjadi konsolidasi yang memadai. Metode ini harus dipertimbangkan dengan desain tinggi kritis timbunan. Perubahan besar kekuatan tanah sama dengan beban dari timbunan yang diberikan. Peningkatan kuat geser tanah yang paling besar akan terjadi dibawah timbunan dengan tinggi yang paling tinggi.

Perhitungan besar penurunan akibat *preloading* atau timbunan bertahap dalam Mochtar (2012) dapat ditentukan dengan Persamaan 25 hingga Persamaan 27.

Jika $P_o' + \Delta P_1 \leq P_c$ maka:

$$S_c = \frac{C_s \cdot H}{1+e_0} \log \left(\frac{P'_{o'} + \Delta P_1}{P_o'} \right) \quad (22)$$



Gambar 3 Timbunan bertahap

Sumber: Mochtar, 2012

Jika $P_o' + \Delta P_1 + \Delta P_2 > P_c$ maka:

$$S_c = \frac{C_s \cdot H}{1+e_0} \log \left(\frac{P'_{o'}}{P_o' + \Delta P_1} \right) + \frac{C_s}{1+e_0} \log \left(\frac{P_o' + \Delta P_1 + \Delta P_2}{P'_{o'}} \right) \quad (23)$$

Jika $P_o' + \Delta P_1 + \Delta P_2 > P_c$ maka:

$$S_c = \frac{C_c}{1+e_0} \log \left(\frac{P_o' + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3}{P_o' + \Delta P_1 + \Delta P_2} \right) \quad (24)$$

Dimana:

- H = Tebal lapisan lempung (m)
- e_0 = Angka pori awal
- C_c = Indeks pemampatan
- C_s = Indeks muai
- ΔP = Penambahan tekanan vertikal (t/m^2)

2.5 Stabilitas Timbunan

Stabilitas timbunan pada penelitian ini ditinjau dari faktor keamanan (SF). Pada struktur timbunan sebagian besar beban yang bekerja diakibatkan oleh berat sendiri tanah dan peningkatan berat tanah umumnya tidak mengakibatkan keruntuhan. SF dihitung dengan membagi kuat geser aktual dengan kuat geser minimal yang dibutuhkan pada kondisi seimbang (SF=1). Dengan demikian, definisi yang lebih tepat untuk faktor keamanan adalah.

$$SF = \frac{\tau_{ult}}{\tau_{all}} \quad (25)$$

Rasio dari kekuatan tanah yang tersedia terhadap kekuatan minimum yang dihitung untuk mencapai keseimbangan adalah faktor keamanan yang secara konvensional digunakan dalam Mekanika Tanah. Dengan menerapkan kondisi standar dari Coulomb, faktor keamanan dapat diperoleh dengan persamaan:

$$SF = \frac{c + \sigma \cdot \tan \phi}{c_r + \sigma \cdot \tan \phi_r} \quad (26)$$

Dimana c_r dan ϕ_r adalah parameter kuat geser terkurangi (*reduced shear strength*). Pengurangan parameter dilakukan secara bertahap sampai mencapai kondisi keruntuhan.

Faktor keamanan yang dihitung dalam program Plaxis disajikan dalam bentuk tabel dan model bidang gelincir pada timbunan. Untuk menghitung angka kewanaman, digunakan modul *load advancement number-of-steps* dengan memasukkan *increment* M_{SF} . Pada kalkulasi, nilai c dan ϕ akan dikurangi sesuai *increment* yang dimasukkan. Selama kalkulasi berlangsung kekuatan tanah adalah:

$$\tan \phi_r = \frac{\tan \phi}{\sum M_{SF}} \quad (27)$$

Dan

$$c_r = \frac{c}{\sum M_{SF}} \quad (28)$$

Pada kondisi runtuh, angka kewanaman sama dengan $\sum M_{SF}$, hasil kalkulasi tersebut hanya terpenuhi bila tercapai kondisi *steady-state*.

2.6 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan metode paling populer yang digunakan oleh berbagai *software* geoteknik. Metode ini menggunakan perhitungan numeric untuk mendapatkan solusi dari permasalahan (model) yang kompleks. Dengan metode ini hampir semua permasalahan *boundary* (kondisi batas) dapat diperoleh solusinya. Program Plaxis merupakan perangkat lunak berbasis pendekatan elemen hingga, tanah dapat dimodelkan untuk mengetahui perilaku tanah tersebut. Dalam penggunaan perangkat lunak Plaxis 2D, ada batasan-batasan yang akan ditentukan.

2.7 Plaxis

Plaxis adalah *software* berdasarkan metode elemen hingga dua dimensi yang digunakan secara khusus untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas untuk berbagai *software* dalam bidang geoteknik. *Software* ini menerapkan metode antarmuka grafis yang mudah digunakan sehingga pengguna dapat dengan cepat membuat model geometri dan jaring elemen berdasarkan panampang melintang dari kondisi yang ingin dianalisis. Kondisi sesungguhnya dapat dimodelkan dalam regangan bidang maupun secara *aximetris*. Plaxis terdiri dari empat buah sub-program (masukan, perhitungan, keluaran, dan kurva).

- a. Program masukan berfungsi membuat dan memodifikasi suatu model geometri, untuk membentuk jaring elemen hingga (*mesh*) dan membentuk kondisi-kondisi awal (*initial phase*).
- b. Program perhitungan memuat seluruh fasilitas untuk mendefinisikan dan memulai perhitungan elemen hingga. Setelah penyusunan model elemen hingga, perhitungan elemen hingga sesungguhnya dapat dilakukan.
- c. Program keluaran memuat seluruh fasilitas untuk menampilkan hasil dari data masukan yang telah dibentuk serta hasil dari perhitungan elemen hingga. Keluaran utama dari suatu perhitungan elemen hingga adalah perpindahan pada titik-titik nodal dan tegangan pada titik-titik tegangan.
- d. Program kurva memuat seluruh fasilitas untuk menggambarkan kurva beban-perpindahan, lintasan tegangan dan diagram tegangan-regangan. Program kurva dapat digunakan untuk menggambarkan kurva beban-perpindahan, kurva waktu-

perpindahan, diagram tegangan–regangan dan lintasan tegangan atau lintasan regangan dari titik-titik yang telah dipilih dalam geometri. Kurva-kurva ini menghasilkan tampilan dari perhitungan nilai-nilai tertentu selama berbagai tahapan perhitungan dilakukan, dan dapat memberikan gambaran mengenai perilaku global maupun lokal dari tanah.

Prosedur perhitungan dengan metode elemen hingga adalah sebagai berikut:

1. Membagi model fisis menjadi sejumlah elemen yang memiliki bentuk geometri tertentu, seperti: segitiga, trapezium atau persegi.
2. Menentukan titik-titik simpul elemen sebagai titik hubung antar elemen sehingga syarat keseimbangan dan kompatibilitas terpenuhi.
3. Menentukan fungsi perpindahan dari titik-titik dalam elemen.
4. Membentuk matriks kekakuan dan beban pada simpul untuk setiap elemen.
5. Menerapkan persamaan keseimbangan untuk tiap-tiap elemen dan menggabungkannya untuk seluruh model.
6. Melakukan perhitungan terhadap persamaan-persamaan yang telah terbentuk untuk menghasilkan perpindahan dan gaya elemen yang terjadi berdasarkan syarat-syarat batas yang telah ditentukan.
7. Melakukan perhitungan tegangan yang terjadi di dalam elemen setelah gaya elemen diketahui.

2.7.1 Perhiungan dengan *software* Plaxis, sebagai berikut:

1. *Geometry Modelling*

Analisis dengan metode elemen hingga dimulai dengan pembuatan model geometri. Pembuatan model geometri meliputi;

- a. Pemodelan topografi, kontur, penampang, dan geometri
 - b. Pemodelan stratigrafi tanah
 - c. Pemodelan struktur (pondasi tiang, dinding penahan tanah, dan sebagainya)
 - d. Pemodelan fase konstruksi
 - e. Pemodelan beban
 - f. Pemodelan *boundary condition*
- #### 2. *Material Properties*

Input *material properties* dilakukan dengan menggunakan pilihan material data sets yang terdiri atas:

Soil and interfaces, pemodelannya dalam Plaxis meliputi:

- a. *Material model*, digunakan untuk mensimulasikan model tanah berdasarkan karakteristik tegangan-regangan. Terdapat lima tipe material model, yaitu:
 - *Linear elastic*, yaitu untuk memodelkan material yang bersifat *linear elastic* (hukum Hooke). Input parameter meliputi *Modulus Young* (E) dan *Poisson's ratio* (ν). Tipe ini biasanya digunakan untuk meodelkan struktur *massif* seperti *gravity wall*.
 - *Mohr-Coulomb*, yaitu pemodelan tanah yang paling umum digunakan. Perilakunya mengikuti *Mohr-Coulomb* kriteria. Terdapat lima input parameter, yaitu *Modulus Young* (E), *Poisson's ratio* (ν), *cohesion* (c), *friction angle* (f), dan *dilatancy angle* (Ψ).
 - *Hardening soil*, yaitu untuk memodelkan perilaku tanah yang memiliki *friction hardening plasticity*. Model ini dapat digunakan untuk mensimulasikan perilaku *gravel* dan *overconsolidated clay*.
 - *Soft soil*, merupakan model *Cam Clay* yang digunakan untuk memodelkan perilaku tanah lunak seperti *consolidated clay* dan gambut (*peat*).
 - *Soft soil creep*, yaitu untuk memodelkan perilaku rangkak (*creep*) dan *time dependent* pada tanah lunak.
- b. *Material type*, digunakan untuk mensimulasikan interaksi air tanah. Terdapat tiga tipe perilaku, yaitu:
 - *Drained behavior*, model ini mensimulasikan kondisi dimana tidak terjadi *excess pore pressure*. Contohnya pada kasus tanah kering (*dry soil*) dan *full drainage* karena permeabilitas yang tinggi (pasir) atau kecepatan pembebanan yang rendah. Opsi ini dapat digunakan untuk mensimulasikan kondisi *long term*.
 - *Undrained behavior*, model ini untuk mensimulasikan kondisi dimana terjadi *excess pore pressure*. Contohnya pada kasus *no drainage* karena permeabilitas yang rendah (*clay*) atau kecepatan pembebanan yang tinggi.

- *Non porous behavior*, model ini untuk mensimulasikan kondisi dimana *initial pore pressure* dan *excess pore pressure* tidak diperhitungkan. Opsi ini biasanya digunakan untuk pemodelan struktur beton atau batu.
- c. *Properties* dan parameter, digunakan untuk mendefinisikan berbagai properti dan parameter tanah.
 - d. *Interface*, digunakan untuk mensimulasikan interaksi antara tanah dan struktur. Input meliputi *strength* dan permeabilitas di interfaces.
3. *Mesh Generation*
Mesh dibentuk secara otomatis oleh Plaxis. Jumlah *mesh* dapat ditentukan melalui *option global coarsenes*. Semakin halus *mesh*, perhitungan akan semakin akurat tetapi akan membutuhkan memori yang lebih besar dan waktu yang lebih lama.
 4. *Initial Condition*
Initial condition digunakan untuk memodelkan kondisi *initial effective stress* dan *initial geometry configuration*. *Initial effective stress* ditentukan menggunakan K_0 -procedure (*lateral coefficient at rest*). Untuk memodelkan fase konstruksi, *option deactivating geometry components* dapat dipilih. Contoh kasus timbunan, dimana pada kondisi *initial* timbunan belum ada, maka *geometry* timbunan dapat dinonaktifkan dengan *option* ini.
 5. *Water Condition*
Water Condition digunakan untuk memodelkan kondisi *initial active pore pressure*. Pemodelan dapat dilakukan dengan dua opsi, *phreatic level* dan *ground water flow*. *Phreatic level* digunakan untuk memodelkan kondisi hidrostatik. Sedangkan *ground water flow* digunakan untuk memodelkan aliran air.
 6. *Calculation*
 Bagian-bagian yang perlu diperhatikan dalam kalkulasi antara lain:
 - *General calculation setting*
 - *Calculation control parameters*
 - *Load multiplier*
 - *Staged construction*

- *Phi-c Reduction (SF)*

7. *General Calculation Setting*

Terdapat beberapa pilihan tipe kalkulasi yang dapat digunakan untuk pemodelan. Tipe kalkulasi tersebut adalah:

- a. *Plastic*, pilihan ini digunakan untuk analisis deformasi elastis-plastis. Analisis ini tidak memperhitungkan pengaruh waktu terhadap perilaku tegangan-regangan. Kalkulasi ini juga dapat digunakan untuk memodelkan perilaku *undrained* dan *drained* pada tanah lempung. Kalkulasi ini juga dapat digunakan untuk menghitung besarnya penurunan (*settlement*) pada akhir konsolidasi, namun tidak dapat digunakan untuk menghitung besarnya *time rate consolidation* dan tidak dapat menggambarkan historis pembebanan dan tegangan yang terjadi.
- b. *Consolidation*, pilihan ini digunakan untuk mensimulasikan proses disipasi eksese tekanan air pori pada tanah lempung jenuh sebagai fungsi dari waktu (proses konsolidasi). Dengan tipe ini dapat diketahui besarnya konsolidasi serta kecepatan konsolidasi (*time rate*).
- c. *Update Mesh*, pilihan ini digunakan untuk memodelkan pengaruh dari *large deformation*. Dalam beberapa kasus geoteknik, deformasi yang terjadi besar dan sangat mempengaruhi bentuk geometri. Kasus-kasus yang dimodelkan dengan *update mesh* ini antara lain analisis struktur perkuatan tanah, analisis beban saat runtuh pada pondasi *offshore* (*gravity platform*) dan studi perilaku tanah lunak.
- d. *Dynamic Analysis*, pilihan ini digunakan untuk analisis dinamik pada kasus-kasus geoteknik.

8. *Calculation Control Parameters*

Calculation control parameters ini digunakan untuk mendefinisikan parameter pengatur dari tahapan perhitungan tertentu serta prosedur penyelesaiannya. *Calculation control parameters* ini terdapat pada tab parameter di tampilan *calculation*.

- a. *Additional Steps*, pilihan ini menyatakan jumlah maksimum dari langkah perhitungan (langkah beban) yang dilakukan dalam tahapan perhitungan tertentu.
- b. *Reset displacements to zero*, pilihan ini dapat digunakan jika perpindahan yang tidak relevan dari langkah-langkah perhitungan sebelumnya akan diabaikan pada awal tahapan perhitungan saat ini, sehingga perhitungan baru dimulai dari kondisi perpindahan nol.
- c. *Ignore undrained behavior*, pilihan ini harus digunakan jika diinginkan untuk sementara mengabaikan efek perilaku *undrained* dalam situasi dimana dalam set data material yang digunakan diatur ke *undrained*.
- d. *Delete intermediate steps*, pilihan ini secara *default* telah diaktifkan untuk menghemat ruang dalam *hard disk*. Dengan pilihan ini maka seluruh langkah keluaran dalam perhitungan ini, kecuali satu langkah yang terakhir, akan dihapus setelah tahapan perhitungan tersebut berhasil diselesaikan. Umumnya langkah keluaran final memuat hasil yang paling relevan dari tahapan perhitungan tersebut, sedangkan langkah-langkah sebelumnya umumnya kurang penting.

9. *Iterative Procedure Control Parameters*

Prosedur iterasi, khususnya pada prosedur peningkatan beban, dipengaruhi oleh beberapa parameter pengatur. Parameter-parameter ini dapat diatur dalam bagian *iterative procedure*. Plaxis memiliki sebuah pilihan untuk menggunakan *standard setting* untuk parameter-parameter ini, yang umumnya menghasilkan kinerja yang baik dari prosedur iterasi.

10. *Loading Input*

Kotak *loading input* digunakan untuk menentukan jenis pembebanan yang akan digunakan dalam suatu tahapan perhitungan tertentu. Hanya satu jenis pembebanan saja yang dapat diaktifkan untuk tiap tahapan perhitungan.

11. *Load Multiplier*

Load multiplier digunakan sebagai pengaktif atau pengali terhadap input-input yang telah kita definisikan saat input program. *Load multiplier* meliputi:

- Mdisp : untuk mengaktifkan *prescribed displacement* (non zero displ.)
- Mweight : untuk mengaktifkan *gravity loading* (berat sendiri tanah)
- Maccel : untuk mengaktifkan *pseudo static forces* yang dinyatakan dalam *acceleration*

12. *Staged Construction*

Digunakan untuk mensimulasikan konstruksi bertahap. Dapat mengaktifkan / mematikan model geometri atau model struktur, mengganti properties material, atau mengubah distribusi tekanan air. Contoh untuk analisis ini adalah konstruksi timbunan bertahap.

13. *Phi-c Reduction (SF)*

Digunakan untuk menghitung besarnya angka keamanan (SF). SF dihitung dengan membagi kuat geser aktual dengan kuat geser minimal yang dibutuhkan pada kondisi seimbang (SF=1)

14. *Output* perhitungan Plaxis

Output dari perhitungan Plaxis antara lain:

- a. Kalkulasi nilai faktor kemanan ($\sum M_{SF}$)
- b. Deformasi yang terjadi pada pemodelan jaringan elemen hingga
- c. Tegangan yang terjadi pada pemodelan jaringan elemen hingga

2.7.2 Hubungan Tegangan-Regangan pada Program Plaxis

Model material merupakan suatu persamaan matematis yang menyatakan hubungan antara tegangan dan regangan. Model material seringkali dinyatakan dalam bentuk dimana suatu peningkatan tegangan tertentu (atau “perubahan tegangan”) dihubungkan dengan suatu peningkatan regangan tertentu (atau “perubahan regangan”). Seluruh model material di dalam program Plaxis didasarkan pada suatu hubungan antara perubahan tegangan efektif (σ'), dan perubahan regangan (ϵ). Hubungan tegangan-regangan dapat dituliskan seperti persamaan 30.

$$\underline{\underline{\sigma'}} = \underline{\underline{C}} \cdot \underline{\underline{\epsilon}} \quad (29)$$

Dimana : $\underline{\underline{C}}$ = Matrik konstitutif material

$$\underline{\sigma}' = (\sigma'_{xx} \sigma'_{yy} \sigma'_{zz} \sigma'_{xy} \sigma'_{yz} \sigma'_{zx})^T \quad (30)$$

$$\underline{\varepsilon}' = (\varepsilon'_{xx} \varepsilon'_{yy} \varepsilon'_{zz} \varepsilon'_{xy} \varepsilon'_{yz} \varepsilon'_{zx})^T \quad (31)$$

$\sigma'_{xx} \sigma'_{yy} \sigma'_{zz}$ = pertambahan tegangan normal efektif arah sumbu X-X, Y-Y dan Z-Z

$\sigma'_{xy} \sigma'_{yz} \sigma'_{zx}$ = pertambahan tegangan normal efektif arah sumbu X-Y, Y-Z dan Z-X

$\varepsilon'_{xx} \varepsilon'_{yy} \varepsilon'_{zz}$ = pertambahan regangan normal efektif arah sumbu X-X, Y-Y dan Z-Z

$\varepsilon'_{xy} \varepsilon'_{yz} \varepsilon'_{zx}$ = pertambahan regangan normal efektif arah sumbu X-Y, Y-Z dan Z-X

Dari persamaan hubungan tegangan-regangan terlihat jelas bahwa tekanan air pori tidak dimasukkan di dalam hubungan tegangan-regangan sehingga regangan yang terjadi adalah pada material yaitu pada butir tanah (*soil skeleton*). Analisis yang bisa dilakukan pada program Plaxis yaitu *plane strain* dan *axisymmetris*.

2.7.3 Definisi Umum Tegangan

Tegangan merupakan suatu tensor yang dapat dinyatakan oleh sebuah matriks dalam koordinat Cartesius seperti persamaan 33.

$$\underline{\underline{\sigma}}' = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{yz} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Dalam teori deformasi standar, tensor tegangan adalah simetris sehingga $\sigma'_{xy} = \sigma'_{yx}$, $\sigma'_{yz} = \sigma'_{zy}$, $\sigma'_{zx} = \sigma'_{xz}$. Dalam situasi ini, tegangan sering dinyatakan dalam notasi vektor yang melibatkan hanya enam buah komponen saja, yakni:

$$\underline{\sigma} = (\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{zz} \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{zx})^T \quad (33)$$

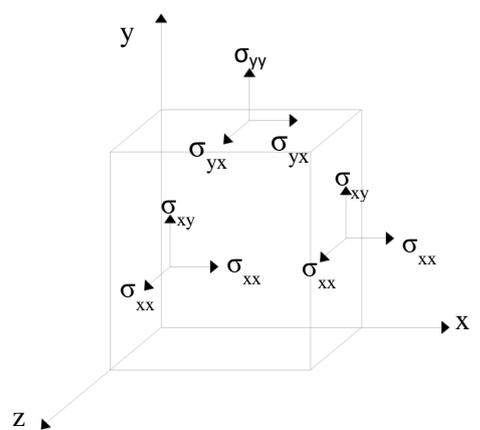
Namun dalam kondisi regangan bidang, $\sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0$. Menurut prinsip dari Terzaghi, tegangan dalam tanah menjadi tegangan efektif, $\underline{\sigma}'$ dan tekanan air pori $\underline{\sigma}_w$ sehingga dapat ditulis menjadi:

$$\underline{\sigma} = \underline{\sigma}' + \sigma_w \quad (34)$$

Air dianggap tidak dapat menahan gaya geser sama sekali. Karena itu, tegangan geser efektif adalah sama dengan tegangan geser total. Komponen

tegangan normal positif dianggap menyatakan tarik, sedangkan komponen tegangan normal negative menyatakan tegangan tekan. Model material untuk tanah dan batu umumnya dinyatakan sebagai hubungan antara peningkatan tegangan efektif tertentu terhadap peningkatan regangan. Dalam hubungan semacam itu, peningkatan tegangan efektif tertentu dinyatakan oleh perubahan tegangan (dinotasikan oleh sebuah titik di atas symbol tegangan) seperti persamaan 36.

$$\underline{\sigma}' = (\sigma'_{xx} \sigma'_{yy} \sigma'_{zz} \sigma'_{xy} \sigma'_{yz} \sigma'_{zx})^T \quad (35)$$



Gambar 4 Sistem koordinat umum tiga dimensi dan perjanjian tanda pada tegangan

Sumber: Manual Plaxis version 8, 2007

Tegangan utama adalah tegangan di dalam sistem koordinat dimana seluruh komponen tegangan geser adalah nol. Tegangan utama adalah nilai eigen dari tensor tegangan. Tegangan efektif utama dapat ditentukan dengan cara berikut:

$$\det = (\underline{\underline{\sigma}}^1 - \underline{\underline{\sigma}}^1 I) = 0 \quad (36)$$

Dimana $\underline{\underline{I}}$ adalah matrik identitas. Persamaan ini menghasilkan tiga buah solusi untuk σ' , yaitu tegangan-tegangan efektif ($\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$). Dalam Plaxis tegangan efektif utama diatur secara berurutan sebagai berikut:

$$\sigma'_1 \leq \sigma'_2 \leq \sigma'_3 \quad (37)$$

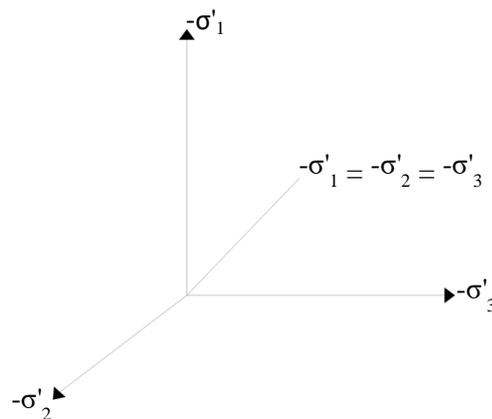
Dimana σ'_1 , merupakan tegangan tekan utama terbesar dan σ'_3 merupakan tegangan merupakan tegangan tekan utama terkecil. Dalam program Plaxis, model sering dinyatakan dengan mengacu pada ruang tegangan utama, seperti yang

ditunjukkan dalam Gambar . Selain tegangan utama, umumnya juga berguna untuk mendefinisikan invarian tegangan, yaitu besarnya tegangan yang tidak tergantung dari orientasi sistem koordinat. Dua buah invarian tegangan yang berguna adalah :

$$p' = -\frac{1}{3}(\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy} + \sigma'_{zz}) = -\frac{1}{3}(\sigma'_{1} + \sigma'_{2} + \sigma'_{3}) \quad (38)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy})^2 + (\sigma'_{yy} - \sigma'_{zz})^2 + (\sigma'_{zz} - \sigma'_{xx})^2 + 6(\sigma'_{yz}^2 + \sigma'_{zx}^2))} \quad (39)$$

Dimana p' adalah tegangan efektif isotropis atau tegangan efektif rata-rata, dan q adalah tegangan deviatorik atau tegangan geser ekuivalen. Perhatikan bahwa perjanjian tanda yang digunakan untuk p' adalah positif untuk tegangan tekan, berbeda dengan perjanjian tanda untuk tegangan lainnya. Tegangan geser ekuivalen q , mempunyai sifat penting dan berubah menjadi $q = |\sigma^1 - \sigma^3|$ untuk kondisi tegangan triaksial dengan $\sigma'_{2} = \sigma'_{3}$.



Gambar 5. Ruang tegangan utama

Sumber: Manual Plaxis version 8, 2007

Tegangan efektif utama dapat dituliskan sebagai fungsi dari invarian sebagai berikut :

$$-\sigma'_{1} = p' + \frac{2}{3}q \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (40)$$

$$-\sigma'_{1} = p' + \frac{2}{3}q \sin(\theta) \quad (41)$$

$$-\sigma'_{1} = p' + \frac{2}{3}q \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (42)$$

Dimana θ adalah sudut Lode (invarian ketiga), yang didefinisikan :

$$\theta = \frac{2}{3} \arcsin \left(\frac{27}{2} + \frac{J_3}{q^3} \right) \quad (43)$$

Dengan,

$$J_3 = (\sigma'_{xx} - p')(\sigma'_{yy} - p')(\sigma'_{zz} - p') - (\sigma'_{xx} - p')\sigma_{yz}^2 - (\sigma'_{yy} - p')\sigma_{zx}^2 - (\sigma'_{zz} - p')\sigma_{xy}^2 + 2\sigma_{zy}\sigma_{yz}\sigma_{zx} \quad (44)$$

2.7.4 Definisi Umum dari Regangan

Regangan merupakan sebuah tensor yang dapat dinyatakan oleh matriks dalam koordinat Cartesius :

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (45)$$

Sesuai dengan teori deformasi kecil, hanya jumlah dari komponen regangan geser Cartesius ε_{ij} dan ε_{ji} yang saling melengkapi saja yang menghasilkan tegangan geser. Jumlah ini dinotasikan sebagai regangan geser γ . Karena itu bukan ε_{xy} , ε_{yx} , ε_{yz} , ε_{zy} , ε_{zx} dan ε_{xz} melainkan komponen regangan geser γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{zx} yang digunakan. Di bawah kondisi di atas, regangan seringkali dituliskan dalam notasi vektor, yang melibatkan hanya enam buah komponen yang berbeda, yaitu :

$$\underline{\varepsilon} = (\varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} \varepsilon_{zz} \gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{zx})^T \quad (46)$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad (47)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad (48)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (49)$$

$$\gamma_{xy} = \varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \quad (50)$$

$$\gamma_{yz} = \varepsilon_{yz} + \varepsilon_{zy} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \quad (51)$$

$$\gamma_{zx} = \varepsilon_{zx} + \varepsilon_{xz} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \quad (52)$$

Sama dengan tegangan, komponen regangan normal positif menyatakan regangan tarik, sedangkan komponen regangan normal negatif menyatakan tekan.

Dalam formulasi model material, dimana digunakan peningkatan regangan tertentu, peningkatan ini dinyatakan oleh perubahan regangan (dinotasikan dengan sebuah titik di atas simbol regangan).

$$\underline{\dot{\varepsilon}} = (\dot{\varepsilon}_{xx} \dot{\varepsilon}_{yy} \dot{\varepsilon}_{zz} \dot{\gamma}_{xy} \dot{\gamma}_{yz} \dot{\gamma}_{zx})^T \quad (53)$$

Untuk kondisi regangan bidang, seperti digunakan dalam Plaxis Versi 8,

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{r} \cdot u_x \text{ dan } \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \text{ (r = jari-jari)}. \quad (54)$$

Invarian regangan yang sering digunakan adalah regangan volumetrik (ε_v) yang didefinisikan sebagai jumlah dari seluruh komponen regangan normal, seperti rumus berikut :

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (55)$$

Pada program Plaxis untuk model elastoplastik, strain yang terjadi adalah gabungan dari regangan elastik dan plastis yang dirumuskan sebagai berikut :

$$\varepsilon = \underline{\varepsilon}^e + \underline{\varepsilon}^p \quad (56)$$

2.7.5 Jenis Material

Ada 3 (tiga) jenis material pada program *Plaxis* yang bisa dipilih untuk masing-masing model tanah yang digunakan, yaitu :

1. Jenis material *drained*

Material *drained* digunakan untuk mengatur tidak ada kenaikan tekanan air pori (*pore water pressure*) pada material tersebut. Jenis ini diterapkan untuk kondisi tanah kering, tanah yang mempunyai permeabilitas besar seperti pasir, tanah yang mengalami pembebanan sangat lambat, serta untuk mensimulasikan perilaku tanah dalam jangka panjang.

2. Jenis material *undrained*

Material *undrained* digunakan untuk mengatur timbulnya kenaikan tekanan air pori (*excess pore water pressure*) pada material tanah. Jenis ini diterapkan pada kondisi tanah yang mempunyai koefisien permeabilitas (k) kecil seperti tanah lempung, sehingga sewaktu diberikan *excess pore water pressure* tidak langsung terdisipasi. Besarnya kenaikan tekanan air pori dihitung berdasarkan bulk modulus air :

$$\Delta U_w = \frac{K_w}{n} \Delta \varepsilon_v \quad (57)$$

$$\frac{K_w}{n} = 100G \quad (58)$$

$$G = \frac{E'}{2 \cdot (1 + \nu')} \quad (59)$$

Besarnya kenaikan tegangan rata-rata efektif adalah :

$$\Delta P' = K' \Delta \epsilon_v \quad (60)$$

$$K' = \frac{E'}{2 \cdot (1 + \nu')} \quad (61)$$

Dimana :

K' = bulk modulus untuk skelaton

K_w = bulk modulus air

D_{ev} = kenaikan regangan volume

n = porositas tanah

E' = *Young's modulus* efektif

ν' = *Poisson ratio* efektif, dibatasi maksimum 0,35

3. Jenis material *non-porous*

Digunakan untuk mengatur tidak ada kenaikan tekanan air pori pada material, jenis material *non-porous* untuk memodelkan material beton, batuan atau perilaku struktur lainnya.

2.7 Model Mohr-Coulomb (Plastisitas Sempurna)

Plastisitas mempunyai hubungan dengan terbentuknya regangan yang tidak dapat kembali seperti semula. Untuk mengevaluasi apakah plastisitas telah terjadi dalam perhitungan, sebuah fungsi leleh (*yield function, f*), digunakan 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 terpengaruh 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. Prinsip dasar dari elastoplastisitas adalah regangan yang terjadi merupakan gabungan dari elastis dan plastis, $\underline{\epsilon} = \underline{\epsilon}^e + \underline{\epsilon}^p$ atau $\dot{\underline{\epsilon}} = \dot{\underline{\epsilon}}^e + \dot{\underline{\epsilon}}^p$

Apabila tanah masih dalam kondisi elastis, maka persamaan (3.61) bisa dituliskan

sebagai berikut :

$$\dot{\sigma}' = \underline{D}^e \cdot \underline{\dot{\epsilon}}^e = \underline{D}^e \cdot (\underline{\dot{\epsilon}} + \underline{\dot{\epsilon}}^p) \quad (62)$$

Berdasarkan teori *plasticity* klasik (Hill, 1950), bahwa pertambahan regangan plastis adalah turunan dari fungsi leleh (*yield function*) 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 bila teori tersebut dipakai untuk fungsi leleh model *Mohr-Coulomb* yang diaplikasikan dalam Plaxis akan membuat prediksi yang berlebihan terhadap dilatasi. Karena itu, selain fungsi leleh (*yield function* (f)) digunakan juga sebuah fungsi potensial plastis (*plastic potential function* (g)) yang besarnya tidak sama dengan fungsi leleh tersebut ($f \neq g$), yang dinyatakan sebagai *non associated plasticity*). Secara umum pertambahan regangan plastis ditulis sebagai berikut :

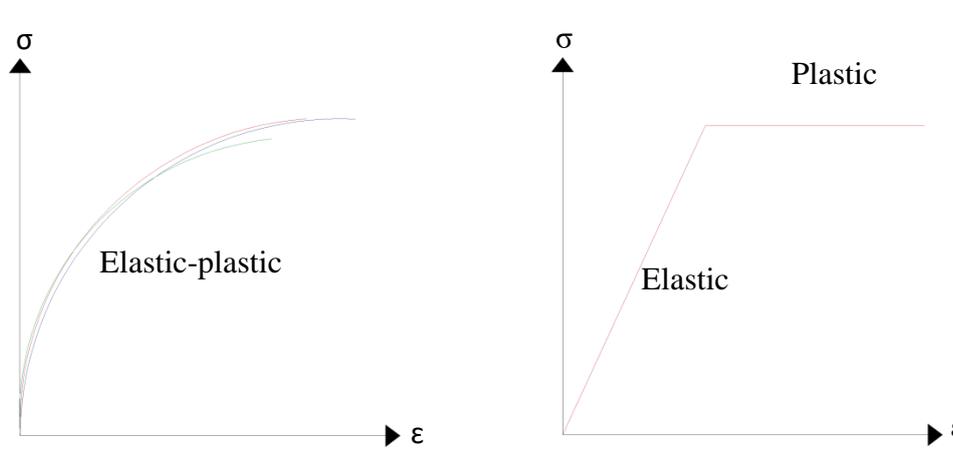
$$\underline{\dot{\epsilon}}^p = \lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \quad (63)$$

Dimana λ adalah faktor pengali plastis. Untuk tanah yang berperilaku elastis murni, λ adalah nol untuk perilaku plastis λ adalah positif.

$$\lambda = 0 \text{ untuk : } f < 0 \text{ atau : } \frac{\partial f^T}{\partial \sigma'} \cdot \underline{D}^e \cdot \underline{\dot{\epsilon}} \leq 0 \text{ (Elastisitas)} \quad (64)$$

Sementara untuk tanah yang berperilaku dalam kondisi plastis :

$$\lambda > 0 \text{ untuk : } f = 0 \text{ atau : } \frac{\partial f^T}{\partial \sigma'} \cdot \underline{D}^e \cdot \underline{\dot{\epsilon}} > 0 \text{ (Plastisitas)} \quad (65)$$



Gambar 6. Ide dasar dari suatu model elastis plastis sempurna

Sumber: Manual Plaxis version 8, 2007

Persamaan-persamaan ini dapat digunakan untuk mendapatkan hubungan antara pertambahan tegangan efektif dan pertambahan regangan pada elastoplastis (Smith & Griffith, 1982; Vermeer & de Borst, 1984) adalah :

$$\underline{\sigma}' = \left(\underline{D}^e - \frac{\alpha}{d} \cdot \underline{D}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \cdot \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \cdot \underline{D}^e \right) \cdot \underline{\dot{\epsilon}} \quad (66)$$

Dimana :

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{D}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \quad (67)$$

α = Parameter pengatur, bila tanah dalam kondisi elastis $\alpha = 0$ dan dalam kondisi plastis $\alpha = 1$

Teori plastisitas di atas terbatas untuk bidang leleh yang menerus dan mulus dan tidak meliputi multi bidang kontur 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, yakni :

$$\underline{\dot{\epsilon}}^p = \lambda_1 \cdot \frac{\partial g_1}{\partial \underline{\sigma}'} + \lambda_2 \cdot \frac{\partial g_2}{\partial \underline{\sigma}'} + \dots \quad (68)$$

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

Kondisi leleh *Mohr-Coulomb* secara penuh terdiri dari enam buah fungsi leleh saat diformulasikan dalam konteks tegangan utama dan dipengaruhi oleh parameter c dan φ (Smith & Griffith, 1982). Fungsi-fungsi leleh ini secara bersamaan membentuk kerucut heksagonal dalam ruang tegangan utama.

$$f_{1a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_3) \cdot \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \leq 0 \quad (69)$$

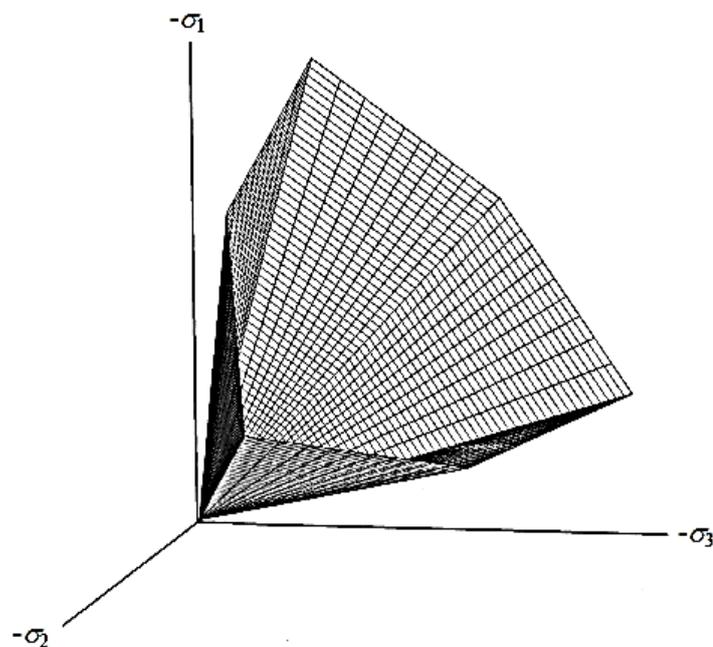
$$f_{1b} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_2) \cdot \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \leq 0 \quad (70)$$

$$f_{2a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_1) \cdot \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \leq 0 \quad (71)$$

$$f_{2b} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_3) \cdot \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \leq 0 \quad (72)$$

$$f_{3a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_2) \cdot \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \leq 0 \quad (73)$$

$$f_{3b} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_1) \cdot \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \leq 0 \quad (74)$$



Gambar 7 Bidang leleh *Mohr-Coulomb* dalam ruang tegangan utama ($c=0$)

Sumber: Manual Plaxis version 8, 2007

Selain fungsi leleh, didefinisikan enam buah fungsi potensial (g) plastis untuk model *Mohr-Coulomb* sebagai berikut :

$$g_{1a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_3) \cdot \sin \varphi \quad \dots\dots\dots(3.78a)$$

$$g_{1b} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_2) \cdot \sin \varphi \quad \dots\dots\dots(3.78b)$$

$$g_{2a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_1) \cdot \sin \varphi \quad \dots\dots\dots(3.78c)$$

$$g_{2b} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_3) \cdot \sin \varphi \quad \dots\dots\dots(3.78d)$$

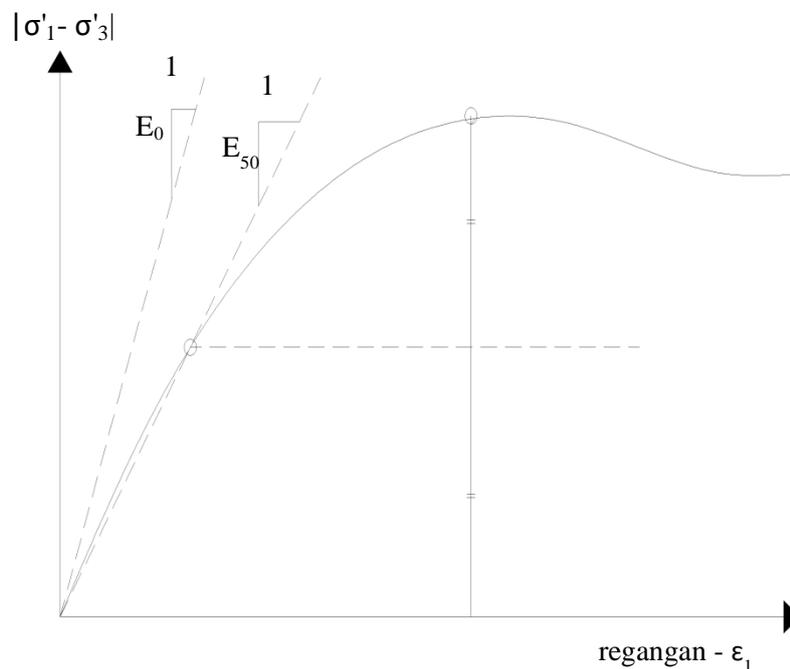
$$g_{3a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_2) \cdot \sin \varphi \quad \dots\dots\dots(3.78e)$$

$$g_{3b} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_1) \cdot \sin \varphi \quad \dots\dots\dots(3.78f)$$

Pada fungsi potensial plastis model *Mohr-Coulomb* dipengaruhi oleh besarnya sudut dilatansi (ψ), parameter ini diperlukan untuk memodelkan bahwa pertambahan regangan volume plastis (dilatansi) yang terjadi pada tanah padat. Maka secara keseluruhan parameter yang diperlukan untuk model *Mohr-Coulomb* pada program *Plaxis* adalah plastisitas (c, φ, ψ), modulus elastisitas *Young's* (E) dan *Poisson ratio* (ν). Model *Mohr-Coulomb* memerlukan sebanyak 5 (lima) parameter dasar yang dapat

digunakan, kelima parameter tersebut yaitu :

1. Modulus *Young* (E) (kN/m^2). Dalam mekanika tanah kemiringan awal dari kurva tegangan regangan umumnya dinotasikan sebagai (E_0) digunakan bilamana material mempunyai rentang elastis linier yang besar dan untuk pembebanan umumnya digunakan modulus sekan pada 50% kekuatan material (E_{50}).



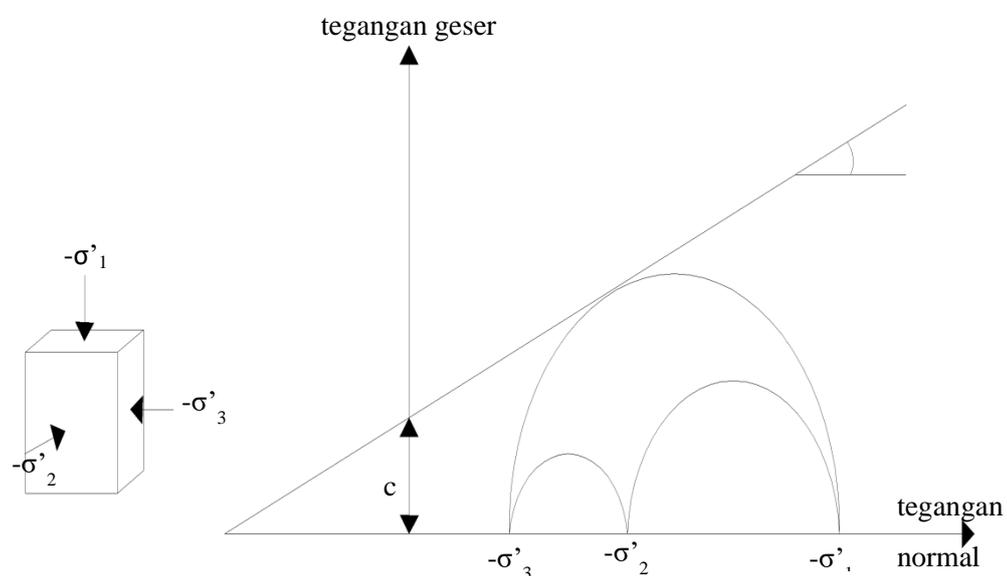
Gambar 8 Definisi E_0 dan E_{50} untuk hasil uji

Sumber: Manual Plaxis V. 8, 2007

2. Angka *Poisson* (ν). Uji triaksial terdrainase standar dapat menghasilkan

pengurangan volume yang signifikan pada awal pemberian beban aksial, sehingga akan menghasilkan nilai angka poisson awal (ν_0) yang rendah. Pada beberapa kasus, khususnya pada masalah pengurangan beban, mungkin realitas untuk menggunakan nilai awal yang rendah, tetapi pada penggunaan model Mohr-Coulomb, secara umum direkomendasikan menggunakan nilai yang tinggi. Dalam banyak kasus akan diperoleh nilai angka poisson (ν) antara 0,3 dan 0,4 maka angka poisson yang efektif yang digunakan harus lebih kecil dari 0,35.

3. Sudut geser (ϕ) dinyatakan dalam satuan derajat ($^\circ$). Sudut geser akan menentukan kuat geser seperti ditunjukkan pada Gambar dengan menggunakan lingkaran tegangan Mohr



Gambar 9 Lingkaran-lingkaran tegangan saat mengalami leleh

Sumber: Manual Plaxis V.8, 2007

4. Kohesi (c) (KN/m²). Dalam hal ini disarankan untuk memasukkan nilai kohesi yang kecil ($c > 0,2$ kPa).

5. Sudut dilatansi (ψ). Tanah lempung yang terkonsolidasi cenderung tidak menunjukkan dilatansi sama sekali ($\psi = 0$). Sudut dilatansi dinyatakan dalam satuan derajat ($^\circ$).

2.8 Penelitian Terdahulu

Tabel 4 Penelitian Terdahulu

Penulis	Judul	Hasil Penelitian	Publikasi
Brenda Mardwista, Gati, Edy Purwanto	Analisis Stabilitas Lereng Timbunan Badan Jalan dan Prediksi Timbunan yang Terjadi Menggunakan Program Plaxis	Analisis penurunan pada timbunan didapat bahwa semakin baik variasi permodelan maka penurunan yang terjadi selama 200 hari semakin kecil dan juga semakin tinggi timbunan maka penurunan yang terjadi akan semakin besar	Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia
Ferra Fahriani	Analisis Stabilitas Tanah Timbunan Dengan Perkuatan Sabut Kelapa	Hasil analisis angka keamanan lereng timbunan menunjukkan peningkatan kestabilan lereng timbunan pada tanah dengan tambaha 0 sampai 5% sabut kelapa yang ditunjukkan oleh angka keamanan lereng pada masing-masing permodelan.	Jurnal Fropil Vol 4 Nomor 2 Juli-Des 2016
Gracia Mizuno Elisa Sompie, O. B. B. Sompie, Steeva Rondonuwu	Analisis Stabilitas Tanah dengan Model Material Mohr Coulomb dan Soft Soil	Dari penelitian, diperoleh bahwa semakin tinggi muka air tanah maka semakin besar faktor kermanan.	Jurnal Sipil Statik Vol. 6 No. 10 Oktober 2018 (783-792) ISSN: 2337-6732
Ilham Jafar, Ahmad Bakri Muhiddin, Ardy Arsyad	Model Numerik Deformasi Embankment dengan Sistem Rakit-Caison Bambu pada Tanah Lunak	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan bambu dapat menurunkan <i>settlement</i> .	J. Sains & Teknologi, Desember 2017, Vol 6. No. 2: 171-178, ISSN 2303-3614

Fajrul Mutaqin, Dr. Ir. Hendriyawan, M.T.	Perencanaan Timbunan Reklamasi Untuk Pengembangan Terminal Curah Kering Pelabuhan Cigading, Banten	Berdasarkan analisis dan perhitungan, penggunaan PVD dengan pola <i>triangular spacing</i> 1 meter dapat mempercepat waktu konsolidasi tanah pada derajat konsolidasi 90% ($U=90\%$)	Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
---	--	--	--