

TESIS

ANALISIS NUMERIK PERBANDINGAN PERILAKU TIMBUNAN DI ATAS TANAH LUNAK TANPA PERKUATAN DAN PERKUATAN SISTEM PELAT TERPAKU

**Diajukan Guna Melengkapi Syarat
Dalam Mencapai Magister Teknik (M.T)**



OLEH :

NAMA : BAMBANG SUPRAYOGI
NOMOR MAHASISWA : 173121008
BIDANG KAJIAN UTAMA : GEOTEKNIK & JALAN RAYA

**PROGRAM MAGISTER (S2) TEKNIK SIPIL
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS ISLAM RIAU
PEKANBARU
2021**

TESIS

**ANALISIS NUMERIK PERBANDINGAN PERILAKU
TIMBUNAN DI ATAS TANAH LUNAK TANPA PERKUATAN
DAN PERKUATAN SISTEM PELAT TERPAKU**

Yang dipersiapkan dan diajukan oleh :


BAMBANG SUPRAYOGI

NPM. 173121008

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
Pada tanggal 28 Desember 2021
dan dinyatakan LULUS

Dewan Penguji :

Ketua Penguji



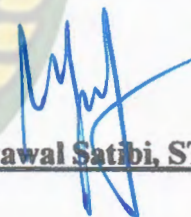
Dr. Anas Puri, ST., MT

Anggota Penguji I



Dr. Elizar, ST., MT

Anggota Penguji II

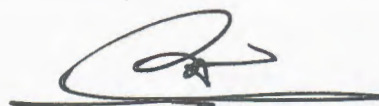


Dr. Ing. Syawal Satibi, ST., M.Sc

Mengetahui

Direktur

Program Pascasarjana Universitas Islam Riau



Prof. Dr. H. Yusri Munaf, SH., M.Hum

LEMBAR PENGESAHAN

TESIS

**ANALISIS NUMERIK PERBANDINGAN PERILAKU
TIMBUNAN DI ATAS TANAH LUNAK TANPA PERKUATAN
DAN PERKUATAN SISTEM PELAT TERPAKU**

Yang dipersiapkan dan diajukan oleh :

BAMBANG SUPRAYOGI

NPM. 173121008

Telah disetujui oleh :

Pembimbing utama,

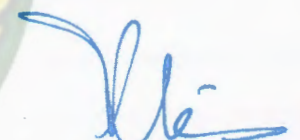


Dr. Anas Puri, ST., MT

Tanggal :

Pembimbing Pendamping,

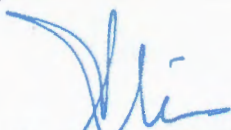
Dr. Elizar, ST., MT



Tanggal :

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
Untuk memperoleh gelar Magister Teknik

Tanggal :



Dr. Elizar, ST. MT

Ketua Prodi Magister Teknik Sipil

SURAT KEPUTUSAN DIREKTUR PASCASARJANA UNIVERSITAS ISLAM RIAU

NOMOR : 383 /KPTS/PPS/2022

TENTANG

PENUNJUKAN PEMBIMBING PENULISAN TESIS MAHASISWA
PROGRAM MAGISTER (S2) TEKNIK SIPIL

DIREKTUR PROGRAM PASCASARJANA UNIVERSITAS ISLAM RIAU

- Memang** :
1. Bahwa penulisan tesis merupakan tugas akhir dan salah satu syarat bagi mahasiswa dalam menyelesaikan studinya pada Program Magister (S2) Teknik Sipil PPS – UIR.
 2. Bahwa dalam upaya meningkatkan mutu penulisan dan penyelesaian tesis, perlu ditunjuk pembimbing yang akan memberikan bimbingan kepada mahasiswa tersebut.
 3. Bahwa nama – nama dosen yang ditetapkan sebagai pembimbing dalam Surat Keputusan ini dipandang mampu dan mempunyai kewenangan akademik dalam melakukan pembimbingan yang ditetapkan dengan Surat Keputusan Direktur Program Pascasarjana Universitas Islam Riau.

- Memang** :
1. Undang – Undang Nomor : 12 Tahun 2012 Tentang : Pendidikan Tinggi
 2. Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor : 8 Tahun 2012 Tentang Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia
 3. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor : 37 Tahun 2009 Tentang Dosen
 4. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor : 66 Tahun 2010 Tentang Pengelolaan dan Penyelenggaraan Pendidikan
 5. Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor : 63 Tahun 2009 Tentang Sistem Penjamin Mutu Pendidikan
 6. Peraturan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia Nomor : 49 Tahun 2014 Tentang Standar Nasional Pendidikan Tinggi
 7. Statuta Universitas Islam Riau Tahun 2018
 8. Peraturan Universitas Islam Riau Tahun Nomor : 001 Tahun 2018 Tentang Ketentuan Akademik Bidang Pendidikan Universitas Islam Riau

MEMUTUSKAN

- Menunjuk** :
1. Menunjuk

No	Nama	Jabatan Fungsional	Bertugas Sebagai
1	Dr. Anas Puri, ST., MT	Lektor Kepala	Pembimbing I
2	Dr. Elizar, S.T., M.T	Lektor	Pembimbing II


Untuk Penulisan Tesis Mahasiswa :

Nama : **BAMBANG SUPRAYOGI**
N P M : **173121008**
Program Studi : **MAGISTER TEKNIK SIPIL**
Judul Proposal Tesis : **ANALISIS NUMERIK PERBANDINGAN PERILAKU TIMBUNAN DI ATAS TANAH LUNAK TANPA PERKUATAN DAN PERKUATAN SISTEM PELAT TERPAKU**

2. Tugas – tugas pembimbing adalah memberikan bimbingan kepada mahasiswa Program Magister (S2) Teknik Sipil dalam penulisan tesis.
 3. Dalam pelaksanaan bimbingan supaya diperhatikan usul dan saran dari forum seminar proposal dan ketentuan penulisan tesis sesuai dengan Buku Pedoman Program Magister (S2) Teknik Sipil.
 4. Kepada yang bersangkutan diberikan honorarium, sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Islam Riau.
 5. Keputusan ini mulai berlaku pada tanggal ditetapkan dengan ketentuan bila terdapat kekeliruan segera ditinjau kembali.
- KUTIPAN** : Disampaikan kepada yang bersangkutan untuk dapat diketahui dan diindahkan.

DITETAPKAN DI : PEKANBARU
PADA TANGGAL : 13 April 2022

Direktur,


Prof. Dr. H. Yusri Munaf, S.H., M.Hum
NIP. 195408081987011002

Disampaikan kepada :

Rektor Universitas Islam Riau
Ketua Program Magister (S2) Teknik Sipil PPS UIR



PROGRAM PASCASARJANA UNIVERSITAS ISLAM RIAU

Jalan KH. Nasution No. 113 Gedung B Pascasarjana Universitas Islam Riau
Marpoyan Damai, Pekanbaru, Riau

SURAT KETERANGAN BEBAS PLAGIAT

Nomor: 033/A-UIR/5-PPS/2022

Program Pascasarjana Universitas Islam Riau menerangkan:

Nama : **BAMBANG SUPRAYOGI**
NPM : **173121008**
Program Studi : **Magister Teknik Sipil**

Telah melalui proses pemeriksaan kemiripan karya ilmiah (tesis) menggunakan aplikasi *Turnitin* pada tanggal 24 Februari 2022 dan dinyatakan memenuhi syarat batas maksimal tingkat kemiripan tidak melebihi 30 % (tiga puluh persen).

Demikian surat keterangan bebas plagiat ini dibuat sesuai dengan keadaan sebenarnya, agar dapat digunakan sebagaimana mestinya.



Mengetahui
Ketua Prodi. Magister Teknik Sipil


Dr. Elizar, S.T., M.T.

Pekanbaru, 24 Februari 2022
Staf Pemeriksa


Meini Giva Putri, S.Pd.

Lampiran :

- Turnitin Originality Report
- Arsip *meinigiva*

Processed on: 24-Feb-2022 11:50 WIB
 ID: 1769683197
 Word Count: 16523
 Submitted: 1

Similarity Index	Similarity by Source
30%	Internet Sources: 30%
	Publications: 1%
	Student Papers: 8%

ANALISIS NUMERIK PERBANDINGAN PERILAKU TIMBUNAN DI ATAS TANAH LUNAK TANPA PERKUATAN DAN PERKUATAN SISTEM PELAT TERPAKU By Bambang Suprayogi

6% match (Internet from 15-Jul-2018)

<https://www.scribd.com/document/377457063/123dok-Studi-Karakteristik-Kuat-Geser-Tanah-Lempung-Dari-Uji-Unconfined-Compressive-Strength-Dan-Uji-Triaks-pdf>

3% match (Internet from 18-Jul-2020)

<https://id.123dok.com/document/1y96wjvy-analisis-pemakaian-diaphragm-walls-pada-galian-basement-dengan-program-plaxis-studi-kasus-proyek-hotel-santika-medan.html>

2% match (Internet from 29-Jun-2021)

http://digilib.unhas.ac.id/uploaded_files/temporary/DigitalCollection/ZGY2ZTBkNjE3NmNhNDBiZTZINDg4ZTZmZDEzMmM3MTY4YWN

2% match (Internet from 26-Oct-2018)

<https://vdocuments.site/perkuatan-pelat-lantai-jurnal.html>

1% match (Internet from 24-Jun-2019)

<https://www.scribd.com/doc/113447498/Jurnal>

1% match (Internet from 18-Mar-2020)

<https://www.scribd.com/document/358703234/Prosiding-Knpts-2015-Anas-Puri>

1% match (Internet from 23-Mar-2020)

<https://www.scribd.com/document/245254388/Plaxis82-Indonesian-3-ModelMaterial-pdf>

1% match (Internet from 29-Oct-2021)

https://www.researchgate.net/publication/335100959_Analisis_Perkuatan_Timbunan_Di_Atas_Tanah_Lunak_Menggunakan_Dinding

1% match (Internet from 19-Sep-2018)

<http://ahiarantang.blogspot.com/2008/02/>

1% match (Internet from 18-Oct-2020)

<https://dspace.uir.ac.id/bitstream/handle/123456789/14027/05.3%20bab%203.pdf?isAllowed=y&sequence=8>

1% match (Internet from 09-Aug-2020)

<https://dspace.uir.ac.id/bitstream/handle/123456789/15259/05.3%20bab%203.pdf?isAllowed=y&sequence=7>

1% match (Internet from 14-Feb-2021)

<https://idoc.pub/documents/plaxis82indonesian3-modelmaterialpdf-gn856w0211n1>

1% match (Internet from 30-Sep-2021)

<https://123dok.com/document/y8p017wz-latihan-plaxis.html>

1% match (Internet from 16-Oct-2021)

<http://docplayer.info/32968704-Bab-iii-metode-analisis-plaxis.html>

1% match (Internet from 31-Dec-2013)

<http://m.aryapersada.com/metode-prapembebanan-untuk-konstruksi-jalan-di-atas-gambut.html?replytocom=25>

1% match (Internet from 05-Sep-2021)

<http://repository.ubb.ac.id/4221/3/BAB%20II.pdf>

1% match (student papers from 23-Aug-2018)

Submitted to Universitas Islam Indonesia on 2018-08-23

1% match (Internet from 06-Aug-2019)

<http://eprints.uny.ac.id/65045/4/Bab%202.pdf>

1% match (Internet from 21-Jan-2022)

<http://Repository.Umsu.Ac.Id/bitstream/123456789/16369/1/Skripsi.pdf>

1% match (Internet from 30-Dec-2021)

<https://Dspace.Uir.Ac.Id/bitstream/handle/123456789/34049/16511008%20Muhammad%20Alfi.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

1% match (Internet from 16-Jan-2020)

<https://pt.scribd.com/document/265065143/Tugas-Akhir-Ressi-Dyah-Adriani-15010071>

1% match (Internet from 31-Aug-2021)

<http://repositori.usu.ac.id/bitstream/handle/123456789/21929/100404106.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

1% match (Internet from 16-Sep-2021)

<https://vbook.pub/documents/mk-mekanika-tanah-1ppt-ko7dlg3m33o3>

Perpustakaan Universitas Islam Riau
 Dokumen ini adalah Arsip Milik :

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN

Saya mahasiswa Pascasarjana Universitas Islam Riau Program Magister Teknik Sipil peserta ujian konferehensif penelitian yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : BAMBANG SUPRAYOGI
NPM : 173121008
Program Studi : Magister Teknik Sipil
Jenis Pendidikan : Strata Dua (S2)
Judul Tesis : Analisis Numerik Perbandingan Perilaku Timbunan Di Atas Tanah Lunak Tanpa Perkuatan dan Perkuatan Sistem Pelat Terpaku

Atas naskah yang di dafatkan pada ujian konferehensif ini beserta seluruh dokumentasi persyaratan yang melekat padanya dengan ini saya menyatakan :

1. Bahwa, Naskah tesis ini adalah benar hasil karya saya sendiri (tidak karya plagiat) yang saya tulis sesuai dan mengacuh kaidah - kaidah metode penelitian ilmiah dan penulisan karya ilmiah;
2. Bahwa, keseluruhan persyaratan adminitrasi, akademik dan keuangan yang melekat padanya benar telah saya penuhi sesuai dengan ketentuan yang ditetapkan;
3. Bahwa, Apabila di kemudian hari ditemukan dan terbukti secara sah atau keseluruhan atas peryatan butir 1 dan butir 2 tersebut di atas, maka saya menyatakan bersedia menerima sanksi pembatalan hasil ujian konferehensif yang telah saya ikuti serta sanksi lainnya sesuai dengan ketentuan yang ada.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan tanpa tekanan daripihak manapun juga.

Pekanbaru,

Pelaku pernyataan,



BAMBANG SUPRAYOGI

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan baik. Tesis ini disusun guna memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Bidang Kajian Utama Geoteknik dan Jalan Raya Program Studi Teknik Sipil Program Pascasarjana Universitas Islam Riau. Penulis menyadari bahwa tesis ini dapat diselesaikan berkat dukungan dan bantuan dari berbagai pihak yang secara langsung dan tidak langsung memberikan kontribusi dalam penyelesaian tesis ini. Oleh karena itu penulis ingin menyampaikan rasa hormat dan ucapan terimakasih yang sebesar – besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. H. Syafrinaldy S.H, MCL, Rektor Universitas Islam Riau.
2. Bapak Prof. Dr. H. Yusri Munaf, S.H, M.Hum, Direktur Program Pascasarjana Universitas Islam Riau.
3. Bapak Dr. Anas Puri, ST., MT, selaku Dosen Program Pascasarjana Universitas Islam Riau dan sekaligus Dosen Pembimbing Utama, yang telah banyak memberikan masukan dan bimbingan selama penyusunan tesis ini.
4. Ibu. Dr. Elizar, S.T, M.T, selaku Dosen dan Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil Program Pascasarjana Universitas Islam Riau dan sekaligus Pembimbing Pendamping, yang telah banyak memberikan semangat, motivasi, masukan dan bimbingan selama penyusunan tesis ini.

5. Bapak Dr. Ing. Syawal Satibi, ST., MS.c, selaku Dosen dan sekaligus Dosen Penguji yang telah banyak memberikan masukan dan bimbingan demi kesempurnaan tesis ini
6. Seluruh Dosen dan Staff Tata Usaha Program Pascasarjana Teknik Sipil Universitas Islam Riau.
7. Orang tuaku tercinta Alm. Bapak Gimin Soegiarto dan Alm Ibu Siti Masriah yang telah mendidik dan selalu mendo'akan agar penulis dapat menjadi orang yang berguna.
8. Istriku tercinta Hayati dan anak-anak tersayang Faiz Yoga Prasetyo, Farah Aliya dan Muhammad Farrukh Gibran atas doa dan dukungannya.
9. Bapak Irryanto, Bapak Kasan, SE, Bapak Edi Susanto Masri selaku Pimpinan yang telah banyak memberikan kesempatan dan dukungannya.
10. Buat teman-teman di PT. Bina Pembangunan Adi Jaya yang telah banyak membantu dan memberikan dukungan
11. Rekan-rekan S-2 Program Studi Teknik Sipil Pascasarjana Universitas Islam Riau.

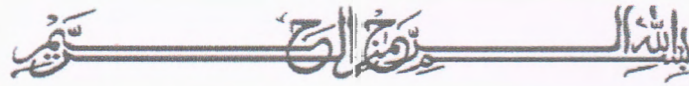
Semoga, tesis ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua dan dapat memberi kontribusi dalam bidang Geoteknik,, Aaaaamiiiit.

Pekanbaru, Desember 2021

Penulis

BAMBANG SUPRAYOGI

KATA PENGANTAR



Assalammu'alaikum Warahmatullahi Wabarokatuh

Alhamdulillahirabbil'alamin, segala puji dan syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini mengenai "Analisis Numerik Perilaku Timbunan Di Atas Tanah Lunak Tanpa Perkuatan Dan Perkuatan Sistem Pelat Terpaku". Tesis ini sebagai salah satu syarat untuk meraih gelar pascasarjana (S2) Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Riau.

Tesis ini berisi tentang rangkuman dan kesimpulan selama penulis melakukan penelitian dan Analisa. Rangkuman dan Kesimpulan disusun dalam beberapa bab. Bab-bab tersebut terdiri dari bab I yang berisi tentang Pendahuluan, bab II berisi tentang tinjauan Pustaka, bab III berisi tentang landasan teori, bab IV berisi tentang metode penelitian, bab V berisi tentang hasil dan pembahasan, dan bab VI berisi tentang kesimpulan dan saran.

Penulis berharap Tesis ini bisa memberikan manfaat bagi mahasiswa/i Teknik Sipil dan praktisi dalam bidang geoteknik. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan Tesis ini, oleh karenanya kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan agar kedepannya dapat lebih baik lagi.

Pekanbaru, Desember 2021

Penulis

BAMBANG SUPRAYOGI

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas kasih karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan tesis ini dengan baik. Penulisan Tesis ini merupakan salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik pada Program Pascasarjana Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Riau. Penulis menyadari bahwa tesis ini dapat diselesaikan berkat dukungan dan bantuan dari berbagai pihak yang secara langsung dan tidak langsung memberikan kontribusi dalam penyelesaian tesis ini. Oleh karena itu penulis ingin menyampaikan rasa hormat dan terimakasih yang sebesar – besarya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. H. Syafrinaldy S.H, MCL, Rektor Universitas Islam Riau.
2. Bapak Prof. Dr. H. Yusri Munaf, S.H, M.Hum, Direktur Program Pascasarjana Universitas Islam Riau.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Sugeng Wiyono, MMT, selaku Dosen Program Pascasarjana Universitas Islam Riau dan sekaligus Pembimbing I.
4. Ibu. Dr. Elizar, S.T, M.T, selaku Dosen dan Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil Dosen Program Pascasarjana Universitas Islam Riau dan sekaligus Pembimbing II.
5. Bapak Dr. Eng. Mohamad Syahminan, S.T, M.T, selaku Dosen Program Pascasarjana Teknik Sipil Universitas Islam Riau dan Penguji yang telah memberikan masukan dan saran pada saat seminar hasil tesis.

6. Seluruh Dosen dan Staff Tata Usaha Pogram Pascasarjana Teknik Sipil Universitas Islam Riau.
7. Istri Tercinta Novita Yosefa Hutajulu, Amd, dan anak - anak saya Angelina Yunita R, Beatric Febrica R, Chandra Imanuel R, Devina Margareth R, Ecclesia Arvita R, atas doa dan dukungannya.
8. Buat teman-teman seperjuangan dan teman-teman lainnya yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan Tesis ini.
9. Seluruh staf dan karyawan PT. Chandra Cipta Sarana yang telah membantu penelitian ini

Dengan keterbatasan pengalaman, ilmu maupun pustaka yang ditinjau, penulis menyadari bahwa tesis ini masih banyak kekurangan. Oleh sebab itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran agar tesis ini lebih sempurna serta sebagai masukan bagi penulis untuk penelitian dan penulisan ilmiah dimasa yang akan datanag.

Pekanbaru, Desember 2021

Penulis

ARON RUMAHORBO

KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, atas segala rahmad dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tesis ini. Tesis ini ditulis dalam rangka memenuhi syarat untuk mencapai gelar Megister Teknik di Program Pascasarjana Universitas Islam Riau. Adapun Judul penelitian ini adalah : “Kajian Pengaruh Variasi Kadar Pasir Dalam Campuran AC-WC Terhadap Sifat Marshall”.

Tesis ini berisi tentang rangkuman dan kesimpulan selama penulis melakukan penelitian dan Analisa. Pembahasan Rangkuman dan Kesimpulan disusun dalam beberapa Bab. Bab -bab tersebut terdiri dari bab I yang berisi tentang Pendahuluan, bab II berisi tentang tinjauan Pustaka, bab III berisi tentang landasan teori, bab IV berisi tentang metode penelitian, bab V berisi tentang hasil dan pembahasan, dan bab VI berisi tentang kesimpulan dan saran.

Penulis berharap agar tesis ini memberikan manfaat bagi kita semua terutama untuk pengembangan ilmu aspal beton.

Pekanbaru, Desember 2021

ARON RUMAHORBO

ABSTRACT

Soil has different properties and characteristics. One type of soil that has low bearing capacity and shear strength is soft soil. In the construction of roads, problems are often encountered in the type of soft soil, including low bearing capacity and large settlement when given a load. This is because soft soils generally have low shear strength and permeability and high compressibility. Because soft soils have low permeability, the time required for consolidation is longer. So we need a soil improvement method to overcome this problem.

This study aims to compare the behavior of the embankment on soft soil without reinforcement and with the reinforcement of the nailed slab system. The method used is a numerical method by creating an unreinforced embankment model and an embankment model with a nailed slab system reinforcement so that the magnitude of the settlement and stress-strain is obtained. The nailed slab system model is made with 15 cm thick plates and nails with a length of 1.5 m, a diameter of 20 cm and a distance between posts of 1.0 m. The embankment model on soft clay is modeled as high as 2.0 m with a soft clay soil depth of 6.0 m.

The results showed that the reduction of settlement and displacement in the embankment model with a nailed slab system compared to that without reinforcement where with a nailed slab system the max U_{tot} value was 4.115 cm, U_y max was 4.088 cm and U_x max was 1.573 cm and without reinforcement, the max U_{tot} value was 5.919 cm, U_y max of 5,149 cm and U_x max of 4,347 cm. The greatest reduction in total settlement (U_y) on the surface of the embankment is 22% and the settlement that occurs also becomes more uniform ΔS by 0.2 cm. Shear stresses and shear strains that occur in soft soil at 20 cm under the nailed slab system are also smaller than those without reinforcement.

Keywords: Soft soil, Nailed slab system, Settlement U_{tot} , U_y , Displacement U_x , Stress – Strain



Dokumen ini adalah Arsip Milik :

Perpustakaan Universitas Islam Riau

DAFTAR ISI

Lembar Judul	i
Lembar Pengesahan	ii
Pernyataan	iv
Ucapan Terima Kasih	v
Kata Pengantar	vii
Daftar Isi	viii
Daftar Tabel	xii
Daftar Gambar	xiv
Daftar Notasi	xix
Abstract	xxii
Abstrak	xxiii
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Manfaat Penelitian	3
1.5. Batasan Penelitian	4

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Penelitian-penelitian Terdahulu	5
2.2. Keaslian Penelitian	14
BAB III. LANDASAN TEORI	16
3.1. Klasiifikasi Tanah	16
3.2. Lempung (<i>Clay</i>)	25
3.3. Sistem Pelat Terpaku	28
3.4. Metode Prapembebanan Untuk Konstruksi Di Atas Tanah Lunak	31
3.5. Penurunan	32
3.5.1 Penurunan Segera (<i>Intermediate Settlement</i>)	34
3.5.2 Penurunan Konsolidasi Primer	35
3.5.3 Penurunan Konsolidasi Sekunder	36
3.5.4 Besar dan Waktu Penurunan Tanah	38
3.6. Metode Elemen Hingga	39
3.7. Metode Analisis Plaxis	39
3.8. Hubungan Tegangan - Regangan Pada Program Plaxis	48
3.8.1 Definisi Umum Dari Tegangan	49
3.8.2 Definisi Umum Dari Regangan	52
3.9. Jenis Material.....	54
3.10 Model Konstitutif Tanah	56

3.10.1 Model Elastis Linier	56
3.10.2 Model Mohr-Coulomb (Plastisitas Sempurna)	57
3.10.3 Model Hardening Soil (Isotropis)	63
3.11 Interface Antara Tanah dan Fondasi	64
BAB IV. METODE PENELITIAN	67
4.1. Umum	67
4.2 Lokasi Penelitian	67
4.3. Bahan Penelitian	67
4.4 Peralatan Penelitian	68
4.5. Tahapan Penelitian	68
BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN	76
5.1. Umum	76
5.2 Pemodelan	76
5.2.1 Parameter Tanah dan Parameter Sistem Pelat Terpaku .	76
5.2.2 Gambar Pemodelan	78
5.3. Hasil Analisa Perilaku Penurunan	79
5.3.1 Analisa perilaku penurunan pada timbunan tanpa perkuatan	79
5.3.2 Analisa perilaku penurunan pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku	84

5.3.3	Analisa perbandingan perilaku penurunan pada timbunan tanpa perkuatan dan timbunan dengan Perkuatan sistem pelat terpaku	90
5.4	Hasil Analisa Tegangan – Regangan Dalam Tanah	93
5.4.1	Analisa tegangan – regangan pada timbunan tanpa perkuatan	93
5.4.2	Analisa tegangan – regangan pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku	95
5.4.3	Analisa perbandingan tegangan – regangan pada timbunan tanpa perkuatan dan timbunan dengan perkuatan sitem pelat terpaku	97
BAB VI.	KESIMPULAN DAN SARAN	102
6.1.	Kesimpulan	102
6.2	Saran	103
 DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Berat jenis tanah (specific gravity) (Hardiyatmo, 2016)	19
Tabel 3.2	Derajat kejenuhan dan kondisi tanah (Hardiyatmo, 2016)	20
Tabel 3.3	Nilai-nilai tipikal n , e , w , γ_d dan γ_b untuk tanah keadaan asli di lapangan (Terzaghi, 1947)	21
Tabel 3.4	Nilai indeks plastisitas dan macam tanah (Hardiyatmo, 2006)	28
Tabel 3.5	Hubungan untuk indeks pemampatan C_c (Rendon Herrero, 1980)	37
Tabel 3.6	Faktor reduksi pada berbagai interaksi struktur dengan tanah menurut Waterman (2006) dalam Gomes (2013)	66
Tabel 5.1	Data parameter tanah	76
Tabel 5.2	Data untuk analisis sistem pelat terpaku (Puri, 2015)	77
Tabel 5.3	Sifat-sifat material struktur sistem pelat terpaku (Puri, 2015)	77
Tabel 5.4	Perbandingan penurunan total maksimum (U_{tot}), penurunan vertikal maksimum (U_y) dan perpindahan horizontal maksimum (U_x)	90
Tabel 5.5	Hasil perhitungan numerik deformasi vertikal (U_y) timbunan tanpa perkuatan dan timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku	93
Tabel 5.6	Perbandingan tegangan – regangan pada timbunan tanpa perkuatan Dan timbunan perkuatan sistem pelat terpaku	98

Tabel 5.7 Perbandingan perilaku tegangan – regangan 20 cm di bawah timbunan pada timbunan tanpa perkuatan dan dengan perkuatan sistem pelat terpaku 100



DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Diagram fase tanah	16
Gambar 3.2	Ilustrasi pengaruh pemasangan tiang sebagai “paku” pada perkerasan beton (Hardiyatmo, 2008)	30
Gambar 3.3	Tipikal perkerasan kaku menggunakan sistem pelat terpaku (Hardiyatmo, 2008)	31
Gambar 3.4	Hubungan waktu dan pemampatan (Das, 1992)	37
Gambar 3.5	Sistem koordinat umum tiga dimensi dan perjanjian tanda pada tegangan (Manual Plaxis Version 8, 2007)	50
Gambar 3.6	Ruang tegangan utama (Manual Plaxis Version 8, 2007)	52
Gambar 3.7	Ide dasar dari suatu model elastis plastis sempurna (Manual Plaxis Version 8, 2007)	59
Gambar 3.8	Bidang leleh Mohr-Coulomb dalam ruang tegangan utama ($c = 0$) (Manual Plaxis Version 8, 2007)	61
Gambar 3.9	Definisi E_0 dan E_{50} untuk hasil uji (Manual Plaxis Version 8, 2007)	62
Gambar 3.10	Lingkar-lingkar tegangan saat mengalami leleh (Manual Plaxis Version 8, 2007)	63
Gambar 4.1	Geometrik timbunan tanpa perkuatan	69
Gambar 4.2	Geometrik timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku	69
Gambar 4.3	Sketsa ukuran boundary pemodelan	70

Gambar 4.4	Hasil pengecekan tegangan efektif rata-rata maksimum (p') pada kondisi awal dan setelah perhitungan pada timbunan tanpa perkuatan	70
Gambar 4.5	Hasil pengecekan tegangan efektif rata-rata maksimum (p') pada kondisi awal dan setelah perhitungan pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku	71
Gambar 4.6	Hasil pengecekan tegangan efektif rata-rata maksimum (p') pada kondisi awal dan setelah perhitungan pada timbunan tanpa perkuatan untuk mengecek pengaruh lapisan pasir padat di bawah lapisan lempung	72
Gambar 4.7	Hasil pengecekan tegangan efektif rata-rata maksimum (p') pada kondisi awal dan setelah perhitungan pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku untuk mengecek pengaruh lapisan pasir padat di bawah lapisan lempung	73
Gambar 4.8	Bagan alir penelitian	75
Gambar 5.1	Idealisasi geometri untuk analisis plain strain	77
Gambar 5.2	Pemodelan timbunan tanpa perkuatan	78
Gambar 5.3	Pemodelan timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku	79
Gambar 5.4	Deformed mesh dan penurunan awal (segera) maksimum akibat beban timbunan pada timbunan tanpa perkuatan	79
Gambar 5.5	Deformed mesh dan penurunan maksimum setelah konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan	80

Gambar 5.6	Arah pergerakan dan deformasi akibat penurunan segera pada timbunan tanpa perkuatan	80
Gambar 5.7	Arah pergerakan dan deformasi yang terjadi akibat konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan	81
Gambar 5.8	Bidang keruntuhan yang terjadi akibat penurunan segera pada timbunan tanpa perkuatan	81
Gambar 5.9	Bidang keruntuhan yang terjadi akibat konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan	82
Gambar 5.10	Penurunan segera vertikal (U_y) maksimum akibat timbunan pada timbunan tanpa perkuatan	82
Gambar 5.11	Penurunan vertikal (U_y) maksimum akibat konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan	83
Gambar 5.12	Perpindahan segera horizontal (U_x) maksimum akibat timbunan pada timbunan tanpa perkuatan	83
Gambar 5.13	Perpindahan horizontal (U_x) maksimum akibat konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan	84
Gambar 5.14	Deformed mesh dan penurunan awal (segera) maksimum pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku	85
Gambar 5.15	Deformed mesh dan penurunan maksimum akibat konsolidasi pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku	85
Gambar 5.16	Arah pergerakan dan deformasi penurunan segera yang terjadi akibat timbunan pada timbunan dengan perkuatan	

	sistem pelat terpaku.....	86
Gambar 5.17	Arah pergerakan dan deformasi penurunan yang terjadi akibat konsolidasi pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku.....	86
Gambar 5.18	Bidang keruntuhan yang terjadi akibat penurunan segera pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku	87
Gambar 5.19	Bidang keruntuhan yang terjadi akibat konsolidasi pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku.....	87
Gambar 5.20	Penurunan segera vertikal (U_y) maksimum akibat timbunan pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku.....	88
Gambar 5.21	Penurunan vertikal (U_y) maksimum akibat konsolidasi pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku.....	88
Gambar 5.22	Perpindahan segera horizontal (U_x) maksimum akibat timbunan pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku.....	89
Gambar 5.23	Perpindahan horizontal (U_x) maksimum akibat konsolidasi pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku	89
Gambar 5.24	Perbandingan perilaku penurunan total (U_y) di permukaan timbunan tanpa perkuatan dan dengan perkuatan sistem pelat terpaku	91
Gambar 5.25	Tegangan geser maksimum pada tanah lempung akibat timbunan pada timbunan tanpa perkuatan	93
Gambar 5.26	Tegangan geser maksimum pada tanah lempung akibat konsolidasi	

	pada timbunan tanpa perkuatan	94
Gambar 5.27	Regangan geser maksimum pada tanah lempung akibat timbunan pada timbunan tanpa perkuatan	94
Gambar 5.28	Regangan geser maksimum pada tanah lempung akibat konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan	95
Gambar 5.29	Tegangan geser maksimum pada tanah lempung akibat timbunan pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku	95
Gambar 5.30	Tegangan geser maksimum pada tanah lempung akibat konsolidasi pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku	96
Gambar 5.31	Regangan geser maksimum pada tanah lempung akibat timbunan pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku	96
Gambar 5.32	Regangan geser maksimum pada tanah lempung akibat konsolidasi pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku	97
Gambar 5.33	Perbandingan perilaku tegangan 20 cm di bawah sistem pelat terpaku pada timbunan tanpa perkuatan dan dengan perkuatan sistem pelat terpaku	98
Gambar 5.34	Perbandingan perilaku regangan 20 cm di bawah sistem pelat terpaku pada timbunan tanpa perkuatan dan dengan perkuatan sistem pelat terpaku	99

DAFTAR NOTASI



B	=	lebar (m)
b	=	tebal (m)
c	=	kohesi (kN/m^2)
d	=	diameter (m)
Dr	=	kerapatan relatif
e	=	angka pori
E	=	modulus <i>Young</i> (kN/m^2)
<i>Eoed</i>	=	modulus <i>oedometer</i>
G	=	modulus Geser
Gs	=	berat jenis
K	=	<i>modulus Bulk</i>
k_x	=	permeabilitas horizontal (m/hari)
k_y	=	permeabilitas vertikal (m/hari)
L	=	panjang (m)
n	=	porositas
Rc	=	kepadatan relatif
S	=	derajat kejenuhan (%)
S	=	penurunan total (m)
<i>S_i</i>	=	penurunan segera (m)



S_c	=	penurunan konsolidasi primer (m)
S_s	=	penurunan konsolidasi sekunder (m)
SF	=	<i>safety factor</i>
V	=	volume tanah
V_s	=	volume butiran padat (gr)
V_w	=	volume air
V_a	=	volume udara
w	=	kadar air (%)
W	=	berat total (gr)
σ	=	tegangan (kN/m^2)
ϵ	=	regangan (%)
γ_b	=	berat volume basah (kN/m^3)
γ_d	=	berat volume kering (kN/m^3)
γ_s	=	berat volume butiran padat (kN/m^3)
γ_w	=	berat volume air (gr)
ν	=	<i>poisson ratio</i>
θ	=	sudut geser dalam tanah ($^\circ$)
Ψ	=	sudut dilatasi ($^\circ$)

LAMPIRAN

LAMPIRAN A : HASIL ANALISIS NUMERIK TIMBUNAN TANPA PERKUATAN

LAMPIRAN B : HASIL ANALISIS NUMERIK TIMBUNAN DENGAN PERKUATAN SISTEM PELAT TERPAKU



ABSTRAK

Tanah memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda-beda. Salah satu jenis tanah yang mempunyai sifat daya dukung dan kuat geser yang rendah adalah tanah lunak. Dalam pembangunan konstruksi jalan sering dijumpai permasalahan pada jenis tanah lunak antara lain daya dukung yang rendah dan penurunan (*settlement*) yang besar jika diberi beban. Hal ini disebabkan karena tanah lunak umumnya memiliki kuat geser dan permeabilitas yang rendah serta kompresibilitas yang besar. Karena tanah lunak memiliki permeabilitas yang rendah maka waktu yang diperlukan untuk konsolidasi lebih lama. Sehingga diperlukan suatu metode perbaikan tanah untuk mengatasi permasalahan ini.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan perilaku timbunan di atas tanah lunak tanpa perkuatan dan dengan perkuatan sistem pelat terpaku. Metode yang digunakan adalah metode numerik dengan membuat model timbunan tanpa perkuatan dan model timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku sehingga didapatkan berapa besar penurunan dan tegangan-regangan yang terjadi. Model pelat terpaku dibuat dengan pelat tebal 15 cm dan tiang-tiang dengan panjang 1,5 m, diameter 20 cm dan jarak antar tiang 1,0 m. Model timbunan di atas tanah lempung lunak dimodelkan setinggi 2,0 m dengan kedalaman tanah lempung lunak setebal 6,0 m.

Hasil penelitian diperoleh reduksi penurunan dan perpindahan pada model timbunan dengan sistem pelat terpaku dibandingkan dengan tanpa perkuatan dimana dengan sistem pelat terpaku nilai U_{tot} maks sebesar 4,115 cm U_y maks sebesar 4,088 cm dan U_x maks sebesar 1,573 cm sedangkan dengan tanpa perkuatan nilai U_{tot} maks sebesar 5,919 cm, U_y maks sebesar 5,149 cm dan U_x maks sebesar 4,347 cm. Nilai reduksi penurunan total (U_y) pada permukaan timbunan yang paling besar adalah sebesar 22% dan penurunan yang terjadi juga menjadi lebih seragam ΔS sebesar 0,2 cm. Tegangan geser dan regangan geser yang terjadi pada tanah lunak pada 20 cm di bawah sistem pelat terpaku juga lebih kecil dibandingkan dengan tanpa perkuatan.

Kata-kata Kunci : Tanah lunak, Sistem pelat terpaku, Penurunan U_{tot} , U_y , Perpindahan U_x , Tegangan – Regangan



Dokumen ini adalah Arsip Milik :

Perpustakaan Universitas Islam Riau

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Das (1995), menyatakan pengertian tanah secara umum, tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel padat tersebut. Tanah memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda-beda. Salah satu jenis tanah yang mempunyai sifat daya dukung dan kuat geser yang rendah adalah tanah lunak. Secara umum sifat tanah lunak antara lain tanah terdiri dari butiran-butiran yang halus, kandungan air yang tinggi, plastisitas tinggi, permeabilitas yang rendah, daya dukung yang relatif rendah, sifat kompresibilitas yang tinggi, sifat kembang susut yang tinggi dan potensi penurunan konsolidasi yang besar dalam waktu yang relatif lama.

Dalam pembangunan konstruksi jalan sering dijumpai permasalahan pada jenis tanah lunak, antara lain daya dukung tanah yang rendah dan penurunan (*settlement*) yang besar jika diberi beban. Hal ini disebabkan karena tanah lunak umumnya memiliki kuat geser dan permeabilitas yang rendah serta kompresibilitas yang besar. Karena tanah lunak memiliki permeabilitas yang rendah maka waktu yang dibutuhkan untuk konsolidasi lebih lama. Pada saat konsolidasi, tegangan tanah pada awal pembebanan ditanggung sepenuhnya oleh tegangan air pori.

Kemudian secara perlahan tegangan ini ditransfer ke tegangan efektif tanah, sehingga tanah mengalami peningkatan kekuatan dan daya dukung tanah. Dengan demikian, jika suatu konstruksi akan dibangun di atas tanah lunak, maka untuk menghindari penurunan yang besar pada bangunan tersebut dan memperoleh daya dukung tanah yang cukup baik maka proses konstruksi sebaiknya dilakukan setelah tanah telah terkonsolidasi secara sempurna. Oleh karena itu diperlukan suatu metode perbaikan tanah untuk mengatasi permasalahan ini.

Berbagai metode perbaikan tanah telah banyak tersedia. Pemilihan teknik perbaikan tanah umumnya dilakukan berdasarkan formasi geologi dari lapisan tanah, karakteristik tanah, biaya dan ketersediaan material serta pengalaman. Salah satu metode perbaikan atau perkuatan yang sangat baik untuk mengatasi deformasi tanah dasar ini adalah Sistem Pelat Terpaku (*Nailed Slab System*) yang ditemukan oleh Hardiyatmo (2008), yang merupakan pengembangan dari ilmu sistem cakar ayam, yaitu suatu perkerasan beton bertulang yang didukung oleh tiang-tiang beton mini, tiang-tiang dan pelat beton dihubungkan secara monolit dengan bantuan tulangan-tulangan dimana interaksi antara pelat beton dengan tiang dan tanah menjadi lebih kaku.

Berdasarkan permasalahan dan metode yang telah diuraikan di atas maka perlu dilakukan penelitian tentang kajian analisis numerik perbandingan perilaku timbunan di atas tanah lunak tanpa perkuatan dan dengan perkuatan sistem pelat terpaku.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan yang telah dipaparkan pada latar belakang di atas maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana penurunan yang terjadi pada tanah lempung lunak akibat beban timbunan yang ada di atasnya sebelum diberikan perkuatan dan setelah diberikan perkuatan sistem pelat terpaku ?
2. Bagaimana tegangan-tegangan yang terjadi di dalam tanah ?

1.3 Tujuan Penelitian

Maksud dan tujuan penelitian ini adalah :

1. Mengetahui penurunan yang terjadi pada tanah lempung lunak akibat beban timbunan yang ada di atasnya sebelum diberikan perkuatan dan setelah diberikan perkuatan sistem pelat terpaku
2. Mengetahui tegangan-tegangan yang terjadi di dalam tanah.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Dapat mengetahui efektivitas kinerja dan perilaku timbunan pada tanah lempung lunak tanpa perkuatan dan dengan perkuatan sistem pelat terpaku.
2. Dapat menjadi referensi ilmu pengetahuan untuk penyelesaian berbagai masalah pada tanah lempung.
3. Dapat menjadi rekomendasi bagi industri konstruksi jalan.

1.5 Batasan Penelitian

Mengingat luasnya permasalahan dalam suatu penelitian, baik itu tentang pengujian maupun bahan yang dipergunakan dan agar penelitian ini lebih terarah maka penelitian ini dibatasi sebagai berikut :

1. Analisis menggunakan analisis numerik
2. Data sekunder seperti parameter tanah timbunan dan tanah lempung lunak menggunakan hasil penelitian yang sudah diteliti oleh beberapa peneliti terdahulu.
3. Data sekunder parameter sistem pelat terpaku menggunakan data-data peneliti terdahulu.
4. Waktu penimbunan tidak diperhitungkan
5. Tidak menghitung *Safety Factor*
6. Tidak menghitung variasi dimensi pelat terpaku
7. Ketebalan timbunan tidak divariasikan
8. Tidak memperhatikan tahapan pelaksanaan



Dokumen ini adalah Arsip Miik :

Perpustakaan Universitas Islam Riau

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Dalam penulisan tinjauan pustaka ini dimaksudkan untuk menggali informasi-informasi tentang hal-hal yang telah dilakukan oleh penelitian terdahulu yang terkait dengan materi penelitian, aspek-aspek yang diteliti, prosedur-prosedur yang telah dilakukan, hasil dan hambatan yang ditemukan dalam penelitian dan perbedaan antara rumusan masalah yang ingin diungkapkan dengan masalah-masalah yang telah diungkapkan oleh peneliti terdahulu.

2.1 Penelitian-penelitian Terdahulu

Puri, Suhendro, Hardiyatmo, Rifa'i (2011) telah melakukan penelitian tentang kontribusi koperan dalam mereduksi lendutan sistem pelat terpaku pada lempung lunak, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana perilaku lendutan dan kontribusi koperan dalam mereduksi lendutan sistem pelat terpaku. Penelitian dilakukan dengan uji skala model di laboratorium menggunakan media lempung lunak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur koperan yang dipasang pada bagian pinggir pelat dapat mereduksi lendutan dengan signifikan oleh karena sistem ini mampu meningkatkan kekakuan sistem. Peningkatan kekakuan tersebut tampak pula pada peningkatan koefisien reaksi *subgrade* sistem.

Puri (2011) telah melakukan studi eksperimental lendutan pelat yang diperkuat tiang-tiang friksi pendek (*nailed slab system*) pada lempung lunak. Hasil

menunjukkan bahwa tiang-tiang berkontribusi terhadap peningkatan kekakuan serta lendutan yang terjadi lebih kecil dan terkonsentrasi hanya di sekitar beban.

Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., Rifa'I, A., (2013) telah melakukan analisis terhadap lendutan Pelat Terpaku pada model skala penuh dan komparasi dengan uji beban. Pada pengujian ini untuk menghitung lendutan pelat digunakan teori hitungan balok di atas fondasi elastic dengan menggunakan modulus reaksi subgrade ekuivalen dan kemudian hasil dari hitungan lendutan ini dibandingkan dengan hitungan Metode Elemen Hingga (MEH) dengan hasil pengamatan. Dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan bahwa metode penentuan tambahan modulus reaksi Subgrade dan modulus reaksi Subgrade ekuivalen dapat digunakan untuk perencanaan pelat terpaku dengan mendapatkan hasil pada zona aman, lebih praktis penggunaannya dan tidak membutuhkan waktu yang lama.

Yulianti (2014) telah melakukan penelitian tentang perkuatan pondasi dangkal pada tanah lempung lunak menggunakan kombinasi geotekstil woven dan grid bambu dengan bantuan program plaxis. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan antara besar daya dukung pondasi dangkal tanpa perkuatan dengan pondasi dangkal yang sudah diberi perkuatan dari setiap variasi lebar dan jarak. Penelitian ini menggunakan pemodelan numerik dengan bantuan program Plaxis 2D versi 8.2. Pemodelan menggunakan variasi kedalaman dan variasi lebar perkuatan untuk mendapatkan daya dukung ultimit dan persentase peningkatan dengan membandingkan daya dukung pondasi yang menggunakan perkuatan dan tanpa perkuatan. Hasil analisis menunjukkan bahwa kombinasi

geotekstil dan grid bambu dapat meningkatkan daya dukung tanah lempung lunak . pada uji pemodelan, nilai daya dukung terbesar terjadi pada pada pemodelan 0,25B, 4B sebesar 405,657 kPa. Sedangkan daya dukung terkecil terjadi pada pemodelan 1B;2B sebesar 367,813 kPa. Penelitian ini juga membuktikan bahwa semakin lebar perkuatan, maka daya dukung yang dihasilkan semakin besar dan sebaliknya semakin jauh letak perkuatan dari pondasi, maka nilai daya dukung yang dihasilkan semakin kecil. Dari nilai daya dukung , maka kombinasi geotekstil dan grid bambu layak digunakan sebagai bahan perkuatan pondasi dangkal pada tanah lempung lunak.

Puri (2015) telah melakukan penelitian perilaku perkerasan sistem pelat terpaku pada lempung lunak, penelitian ini bertujuan untuk mengamati perilaku sistem pelat terpaku pada tanah lempung lunak yang diberikan beban dan bagaimana pengaruh dari tiang-tiang pendek dalam meningkatkan kekakuan dan modulus ekuivalen tanah dasar. Metode analisis divalidasi menggunakan uji skala kecil dan uji skala penuh di laboratorium mekanika tanah Universitas Gadjah Mada. Pelat paku menggunakan beton bertulang yang diletakkan di atas tanah lempung lunak Pada uji model (skala model 1 : 5), dimensi pelat panjang 120 cm dan tebal 3 cm dan lebar pelat divariasikan 20 cm, 40 cm dan 60 cm. Masing-masing lebar pelat terdiri dari 2 model yaitu pelat dengan tiang-tiang di bawahnya dan pelat saja. Pelat dengan tiang-tiang di bawahnya terdiri dari tiga variasi jumlah baris tiang berturut-turut jumlah baris tiang 1, 2 dan 3. Tiang yang digunakan berdiameter 4 cm dengan variasi panjang 20 cm dan 40 cm. jarak tiang divariasikan dengan s/d rasio 2,5 ; 5 ; 7,5. Pemodelan skala penuh pelat terpaku menunjukkan perilaku pelat

datar yang terangkat bentuk mangkuk akibat pembebanan. Hal ini mengindikasikan bahwa semua tiang memberikan respon yang sama pada 3D. Tiang memobilisasi daya dukung tekan dan bertindak sebagai angkur untuk menahan gaya angkat pada pelat. Lendutan pelat berkurang hingga 35,04 % untuk pembebanan sentris dan lendutan negatif berkurang hingga 100 %. Lendutan maksimum pelat untuk beban interior dan tepi masing-masing berkurang 58,45 % dan 35,48 %. Pengujian skala penuh pelat terpaku memiliki kekakuan yang lebih tinggi dalam mendukung beban. Hal ini terbukti bahwa beban sentris hingga 160 KN memberikan respon defleksi linier elastis. Kekakuan yang lebih tinggi dari sistem ini juga ditunjukkan dengan defleksi yang kecil sekitar 4,35 mm untuk beban tepi (P) = 80 KN. Sistem pelat terpaku ini juga memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap getaran sehingga tiang memberikan respon yang baik yang ditunjukkan pada pengulangan pembebanan. Peningkatan jumlah baris tiang, jarak tiang dan panjang tiang termasuk penghalang dinding vertikal meningkatkan kekakuan yang didefinisikan sebagai modulus ekuivalen reaksi tanah dasar. Hasil menunjukkan bahwa kinerja pelat terpaku cukup menjanjikan untuk diaplikasikan.

Waruwu, dkk (2016) telah melakukan penelitian dan mengamati perilaku sistem paku-slab pada tanah gambut berserat. Sistem paku-lempengan yang terdiri dari lempengan dan tumpukan digunakan sebagai penguat untuk mendukung tanggul pada tanah gambut. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi perilaku sistem paku-slab melalui serangkaian pemuatan dalam model skala kecil. Pengujian terdiri dari uji beban langsung, tahap loadtest untuk durasi kenaikan beban 24 jam, dan bongkar muat pada pelat dengan dan tanpa tumpukan. Beban

tanggul dimodelkan dari bahan batangan besi berukuran 1,9 cm x 1,9 cm dan panjang 4 cm untuk menghasilkan penyelesaian yang signifikan. Pemukiman ini diamati di pusat muatan dan di beberapa titik lainnya. Hasil menunjukkan bahwa tumpukan monolitik mengurangi pelapisan lempengan pada tanah gambut. Selain itu, daya dukung sistem paku-lempengan dipengaruhi oleh waktu pemuatan dan prapembebanan. Stageloading dengan periode yang lebih lama menghasilkan daya dukung yang lebih tinggi dari pada beban langsung. Demikian juga, tanggul dengan bongkar-muat menghasilkan daya dukung yang lebih baik dari sistem paku-slab ditutup beban untuk durasi kenaikan beban 24 jam.

Diana (2016) telah melakukan uji model skala kecil dan analisi elemen hingga perkerasan sistem pelat terpaku pada tanah dasar ekspansif dengan menggunakan tanah lempung yang diambil dari desa Soko, Ngawi, Jawa Timur. Pasir dan Kerikil dari kali Krasak. Pelat dan tiang dari mortar semen yang diperkuat dengan kawat (diameter 3 mm), kawat anyaman (diameter kawat 2 mm jarak antar kawat 1 cm). bahan untuk model pelat dipakai juga pelat pleksiglass, dengan ketebalan 5 mm, berdasarkan hasil penelitiannya disimpulkan bahwa :

1. Sistem pelat dengan perkuatan tiang (Pelat Terpaku) menghasilkan *displacement* vertikal akibat pengembangan tanah yang lebih kecil dibandingkan pelat tanpa perkuatan tiang.
2. Semakin panjang tiang dan semakin rapat spasi antar tiang, *displacement* yang dihasilkan semakin kecil.

Fadliansyah (2017) telah melakukan penelitian tentang analisis penurunan timbunan pada tanah lunak dengan sistem *preloading* dan *prevebricated vertical*

drain (PVD) di *runway* bandara kualanamu, penelitian ini bertujuan melakukan pengkajian secara komprehensif terhadap beberapa parameter yang signifikan yang berhubungan dengan kemampuan timbunan di atas tanah lunak antara lain menganalisis tinggi *preloading* pada *runway* akibat beban pesawat sta 0+750, menganalisis besar dan laju disipasi tekanan air pori eksese, menganalisis besar dan laju penurunan tanah, menganalisis stabilitas timbunan. Hasil penelitian menunjukkan adanya kesesuaian respon baik antara data lapangan maupun dengan metode elemen hingga model mohr coulomb dan model soft soil, deformasi dan tekanan air pori eksese hasil prediksi Plaxis mendekati hasil sistem monitoring, prediksi penurunan metode Asaoka, metode Hyperbolic memberikan hasil prediksi yang mendekati hasil sistem monitoring dan Plaxis.

Permatasari dan Hamdhan (2017) telah melakukan penelitian pemodelan 3D pada perbaikan tanah lunak menggunakan metode *deep mixed column*. Pemodelan *deep mixed column* dilakukan dengan berbagai jenis variasi jarak (1,4 m ; 1,6 m ; 1,8 m dan 2 m) dan diameter (0,4 m ; 0,6 m dan 0,8 m) analisis dilakukan dengan menggunakan Program Plaxis 3D AE yang berbasis elemen hingga. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa penggunaan *deep mixed column* dapat mengurangi penurunan sebesar 93,44%.

Saputra, E.L., (2019) telah melakukan penelitian perilaku perkerasan sistem pelat terpaku pada gambut dengan perbaikan tanah campuran gambut di sekeliling tiang, pengujian model sistem pelat terpaku dilakukan dengan menggunakan model pengujian skala kecil (*small scale model*), dengan uji model dengan skala 1 : 5 menggunakan pelat 20 x 20 cm dengan tebal 5 cm. masing-masing variasi ukuran

pelat dibuat tanpa diperkuat tiang dan pelat yang diperkuat tiang tunggal. Tiang berdiameter, $d = 4$ cm, sedang panjangnya 30 cm. Diameter stabilisasi gambut semen di sekitar tiang dengan rasio 2 dan 4. Perbaikan gambut dengan penambahan semen 10%. Sejumlah instrumentasi dipasang untuk mengamati perilaku lendutan sistem pelat terpaku. Pembebanan berupa beban statis. Hasil penelitian menunjukkan model pelat terpaku tiang tunggal dapat mereduksi penurunan model pelat tanpa tiang pada gambut yaitu sebesar 37,41%, model pelat terpaku stabilisasi gambut semen $\varnothing 8$ cm di sekitar tiang dapat mereduksi penurunan pada pelat terpaku tiang tunggal pada gambut yaitu sebesar 16,7% dan stabilisasi gambut semen $\varnothing 16$ cm di sekitar tiang dapat mereduksi penurunan sebesar 28,75%. Model Pelat Terpaku stabilisasi gambut semen $\varnothing 16$ cm dapat mereduksi penurunan pelat terpaku sebesar 4,1%, artinya pengaruh besar diameter stabilisasi dapat meningkatkan kekakuan sistem pelat terpaku walaupun tidak signifikan.

Martius (2019) telah melakukan penelitian studi eksperimental perkerasan sistem pelat terpaku pada tanah timbunan di atas gambut dengan panjang tiang berbeda. Penelitian ini bertujuan untuk mengamati dan menghitung berapa penurunan pelat terpaku pada tanah timbunan di atas gambut dengan panjang tiang berbeda saat diberi beban, penelitian ini dilakukan dengan 2 cara yaitu uji beban di laboratorium dan hitungan menggunakan metode elemen hingga (MEH) model tanah mohr coulomb. Uji pembebanan pelat terpaku di laboratorium dilakukan dengan permodelan benda uji skala 1 : 5, tanah yang digunakan adalah tanah gambut dan tanah urugan pilihan yang diisikan ke dalam bak uji berukuran 1,5 x 1,2 x 1,2 m³, tanah gambut setebal ± 80 cm dan tanah timbun setebal ± 20 cm. pelat

yang diuji berupa pelat (20x20 cm) tanpa tiang dan pelat tiang tunggal panjang 30 dan 40 cm, pelat tanpa tiang model 1, pelat dengan satu baris tiang panjang berbeda model 2, 3, dan 4. Model 2 dengan 6 tiang panjang merata 30 cm, model 2, 2 tiang panjang 40 cm pada tepi kiri-kanan pelat dan 2 tiang panjang 30 cm di tengah, dan model 4, 2 tiang panjang 30 cm pada tepi kiri-kanan pelat dan 2 tiang panjang 40 cm di tengah pelat, diameter tiang 4 cm, dan jarak antar tiang ($s = 5d$). Pelat terpaku ditanam ke dalam tanah timbun di atas tanah gambut hingga pelat menyentuh permukaan tanah timbun secara merata. Beban diberikan secara bertahap mulai 0,05 KN hingga beban puncak 1,0 KN, dengan penambahan setiap 1 menit. Dari uji laboratorium terlihat pelat tanpa tiang mengalami penurunan besar dibanding pelat dengan tiang, baik pelat dengan tiang tunggal maupun pelat dengan satu baris tiang, ini menunjukkan tiang berkontribusi besar dalam mereduksi penurunan. Pelat tanpa tiang model 1 mengalami jungkit yang besar dibandingkan pelat dengan satu baris tiang model 2,3 dan model 4, ini menunjukkan tiang memiliki bidang kontak tanah-tiang, sehingga gaya gesek tanah-tiang dapat memperkecil kemungkinan terangkatnya ujung-ujung pelat. Dari keempat model pelat terpaku yang diujikan, pelat terpaku model 2 (2 tiang panjang 40 cm di tepi kiri-kanan dan 2 tiang panjang 30 cm di tengah) yang paling mendekati hasil perhitungan metode elemen hingga (MEH), pada beban tepi, pelat terpaku model 2 mengalami penurunan $\pm 35\%$ lebih kecil, dan mengalami jungkit $\pm 50\%$ lebih kecil dibanding model pelat terpaku lainnya, dan ketika beban tengah, pelat terpaku model 2 mengalami penurunan $\pm 10\%$ lebih besar dibanding model 3, namun mengalami jungkit $\pm 75\%$ lebih kecil dibanding model pelat terpaku lainnya.

Helmisyah (2019) telah melakukan penelitian tentang perilaku perkerasan sistem pelat terpaku dengan variasi panjang, jarak dan jumlah baris tiang pada tanah gambut akibat beban tekan (beban sentris dan tepi pelat). Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari perilaku sistem pelat terpaku (*nailed-slab*) skala model pada tanah gambut akibat pembebanan sehingga dapat diketahui bagaimana kontribusi tiang-tiang dalam meningkatkan kekakuan sistem ini. Uji skala model pada sistem pelat terpaku dengan dua baris tiang jarak variasi dengan ukuran pelat 120 cm x 40 cm dan tebal pelat 5 cm panjang tiang 30 cm dengan jumlah tiang 10 batang serta jarak antar tiang bervariasi dan ditambah koperan pada sisi-sisi ujung pelat yang berada di atas tanah gambut dengan beberapa instrumentasi yang diletakkan di atas pelat untuk membaca penurunan atau kenaikan pelat pada saat dibebani oleh beban maksimal 1 KN, pembebanan pada tengah (sentris) dan tepi pelat. Uji skala model pada sistem pelat terpaku juga dilakukan terhadap tiga baris tiang panjang bervariasi dengan ukuran tebal pelat 120 cm x 60 cm dan tebal pelat 5 cm, panjang tiang 30 cm dan 40 cm dengan jumlah tiang 18 batang serta panjang tiang bervariasi dan ditambah koperan pada sisi-sisi ujung pelat yang berada di atas tanah gambut. Dari hasil pengujian memperlihatkan perilaku lendutan pelat (*deflected bowl*) akibat beban tengah dan tepi pelat. Hal ini membuktikan bahwa semua tiang mampu memberikan respon terhadap beban yang diberikan di atas pelat dan hal ini dibuktikan juga dengan menggunakan Metode Elemen Hingga, tiang-tiang dan koperan mampu mengurangi regangan tanah dan mencegah terjadinya jungkit pada pelat.

Martiwi (2019) telah melakukan penelitian tentang perilaku perkerasan sistem pelat terpaku pada tanah gambut akibat beban cabut. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari perilaku Sistem Pelat Terpaku (*nailed-slab system*) skala model pada tanah gambut akibat beban cabut sehingga dapat diketahui bagaimana kontribusi tiang-tiang dalam meningkatkan kekakuan sistem ini, mendapatkan perbandingan lendutan antara pelat tanpa tiang dan dengan tiang pada tanah gambut di laboratorium. Hasil penelitian ini yaitu perbandingan hasil pengamatan dan hitungan dengan menggunakan analisis elemen hingga (FEM) menunjukkan selisih deformasi cabut untuk pelat tanpa tiang dan pelat terpaku tiang tunggal yang berkisar antara 99,91%. Dan selisih deformasi cabut pelat terpaku tiang tunggal berkisar antara 98,60% untuk model material *Mohr-Coulomb* dan 99,07% untuk model *Hardening Soil*.

Puri (2019) telah melakukan analisis tentang investigasi numerik perkerasan jalan sistem pelat terpaku terhadap variasi dimensi struktur. Hasil analisis menunjukkan bahwa variasi dimensi elemen struktur mempengaruhi lendutan pelat. Lendutan cenderung berkurang dengan peningkatan diameter dan panjang tiang serta tebal pelat. Hal ini disebabkan terjadinya peningkatan kekakuan global dari Sistem Pelat Terpaku.

2.2 Keaslian Penelitian

Penelitian tentang perbaikan tanah lunak telah banyak dilakukan dengan lingkup yang berbeda dan penelitian mengenai “**Analisis Numerik Perbandingan Perilaku Timbunan Di Atas Tanah Lunak Tanpa Perkuatan dan Dengan**

Perkuatan Sistem Pelat Terpaku” belum pernah diteliti di lingkungan Universitas Islam Riau.



Dokumen ini adalah Arsip Miik :

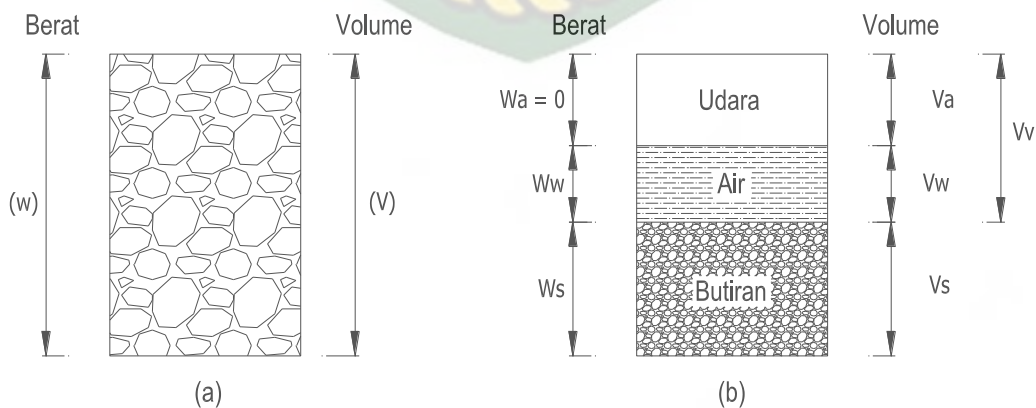
Perpustakaan Universitas Islam Riau

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Klasifikasi Tanah

Hardiyatmo (2006) menyatakan bahwa tanah adalah himpunan mineral, bahan organik dan endapan-endapan yang relatif lepas (*loose*), yang terletak di atas batuan dasar (*bedrock*). Ikatan antara butiran yang relatif lemah dapat disebabkan oleh karbonat, zat organik atau oksida-oksida yang mengendap di antara partikel-partikel. Ruang di antara partikel-partikel dapat berisi air, udara ataupun keduanya. Proses pelapukan batuan atau proses geologi lainnya yang terjadi membentuk tanah. Segumpal tanah dapat terdiri dari dua atau tiga bagian. Dalam tanah yang kering maka tanah hanya terdiri dari dua bagian, yaitu butir-butir tanah dan pori-pori udara. Dalam tanah yang jenuh juga terdapat dua bagian, yaitu bagian padat atau butiran dan air pori. Dalam keadaan tidak jenuh, tanah terdiri dari tiga bagian, yaitu bagian padat (butiran), pori-pori udara dan air pori. Bagian-bagian tanah dapat digambarkan dalam bentuk diagram fase seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram fase tanah

Gambar 3.1 (a) memperlihatkan elemen tanah yang mempunyai volume tanah (V) dan berat total (W), sedang Gambar 3.1 (b) memperlihatkan hubungan berat dengan volumenya.

Berdasarkan gambar tersebut dapat dibentuk persamaan :

$$W = W_s + W_w \dots\dots\dots(3.1)$$

Dan

$$V = V_s + V_w + V_a \dots\dots\dots(3.2)$$

$$V_v = V_w + V_a \dots\dots\dots(3.3)$$

Dengan,

W_s = berat butiran padat

W_w = berat air

V_s = volume butiran padat

V_w = volume air

V_a = volume udara

Berat udara (W_a) dianggap sama dengan nol. Hubungan – hubungan volume yang sering digunakan dalam mekanika tanah adalah kadar air (w), angka pori (e), porositas (n), dan derajat kejenuhan (S).

Kadar Air (w), perbandingan antara berat air (W_w) dengan berat butiran padat (W_s), dinatakan dalam persen.

$$w (\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \dots\dots\dots(3.4)$$

Porositas (n), adalah perbandingan antara volume rongga (V_v) dengan volume total (V), nilai n dapat dinyatakan dalam persen atau desimal.

$$n = \frac{V_v}{V} \dots\dots\dots (3.5)$$

Angka pori (e), adalah perbandingan volume rongga (V_v) dengan volume butiran (V_s), biasanya dinyatakan dalam desimal.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \dots\dots\dots (3.6)$$

Berat volume lembab atau basah (γ_b), adalah perbandingan antara berat butiran tanah termasuk air dan udara (W) dengan volume total (V)

$$\gamma_b = \frac{W}{V} \dots\dots\dots (3.7)$$

dengan $W = W_w + W_s + W_a$ (dengan $W_a = 0$). Bila ruang udara terisi oleh air seluruhnya ($V_a = 0$), maka tanah menjadi jenuh.

Berat volume kering (γ_d), adalah perbandingan antara berat butiran (W_s) dengan volume total (V) tanah.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \dots\dots\dots (3.8)$$

Berat volume butiran padat (γ_s), adalah perbandingan antara berat butiran padat (W_s) dengan volume butiran padat (V_s) tanah.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \dots\dots\dots (3.9)$$

Berat spesifik atau berat jenis (*specific gravity*) (G_s), adalah perbandingan antara berat volume butiran padat (γ_s), adalah dengan berat volume air (γ_w) tanah.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \dots\dots\dots (3.10)$$

G_s tidak berdimensi. Secara tipikal, berat jenis berbagai jenis tanah berkisar antara 2,65 sampai 2,75. Berat jenis $G_s = 2,67$ biasanya digunakan untuk tanah-tanah tidak berkoheksi atau tanah granular, sedang untuk tanah-tanah koheksif tidak mengandung bahan organik G_s berkisar antara 2,68 sampai 2,72. Nilai – nilai berat jenis dari berbagai jenis tanah diberikan dalam tabel 3.1.

Tabel 3.1. Berat jenis tanah (*specific gravity*) (Harduyatmo, 2006)

Macam Tanah	Berat Jenis (G_s)
Kerikil	2,65 – 2,68
Pasir	2,65 – 2,68
Lanau anorganik	2,62 – 2,68
Lempung organik	2,58 – 2,65
Lempung anorganik	2,68 – 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 – 1,80

Derajat kejenuhan (S), adalah perbandingan volume air (V_w) dengan volume total rongga pori tanah (V_v), biasanya dinyatakan dalam persen.

$$S = \frac{V_w}{V_v} \dots\dots\dots (3.11)$$

Bila tanah dalam keadaan jenuh air, maka $S = 100\%$. Tabel 3.2 menunjukkan berbagai macam derajat kejenuhan tanah untuk maksud klasifikasi.

Tabel 3.2 Derajat kejenuhan dan kondisi tanah (Hardiyatmo, 2006)

Macam Tanah	Berat Jenis (Gs)
Tanah kering	0
Tanah agak lembab	> 0 – 0,25
Tanah lembab	0,26 – 0,50
Tanah sangat lembab	0,51 – 0,75
Tanah basah	0,76 – 0,99
Tanah jenuh air	1

Dari persamaan-persamaan tersebut diatas, maka dapat dibentuk hubungan antara masing-masing persamaan, sebagai berikut :

- (a) Hubungan antara angka pori (e) dengan porositas (n)

$$e = \frac{n}{1-n} \dots\dots\dots (3.12)$$

$$n = \frac{e}{1+e} \dots\dots\dots (3.13)$$

- (b) Berat volume basah atau lembab dinyatakan dalam persamaan :

$$\gamma_b = \frac{G_s \gamma_w (1+w)}{1+e} \dots\dots\dots (3.14)$$

- (c) Berat volume jenuh air ($S = 100\%$)

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_w (1+w)}{1+e} \dots\dots\dots (3.15)$$

- (d) Untuk tanah kering sempurna, berat volume kering dinyatakan oleh persamaan :

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \dots\dots\dots (3.16)$$

- (e) Bila tanah terendam air, berat volume apung atau berat volume efektif dinyatakan sebagai γ' , dengan

$$\gamma' = \frac{(G_s - 1)\gamma_w}{1 + e} \dots\dots\dots (3.17)$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \dots\dots\dots (3.18)$$

dengan $\gamma_w = 1 \text{ t/m}^3$ atau $9,81 \text{ kN/m}^3$

Nilai-nilai porositas, angka pori dan berat volume pada keadaan asli di alam dari berbagai jenis tanah yang disarankan oleh Terzaghi (1947) ditunjukkan dalam Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Nilai-nilai tipikal n , e , w , γ_d dan γ_b untuk tanah keadaan asli di lapangan (Terzaghi, 1947)

Macam tanah	n (%)	e	w (%)	γ_d (kN/m^3)	γ_b (kN/m^3)
Pasir seragam, tidak padat	46	0,85	32	14,3	18,9
Pasir seragam, padat	34	0,51	19	17,5	20,9
Pasir berbutir campuran, tidak padat	40	0,67	25	15,9	19,9
Pasir berbutir campuran, padat	30	0,43	16	18,6	21,6
Lempung lunak sedikit organik	66	1,90	70	-	15,8
Lempung lunak sangat organik	75	3,00	110	-	14,3

Dalam tabel 3.3 terlihat bahwa untuk tanah lempung lunak angka pori ($e = V_v/V_s$) lebih dari satu, artinya volume rongga pori tanah (V_v), yang umumnya terisi oleh air, lebih besar dari volume butiran tanahnya (V_s).

- (f) Kerapatan relatif (*relative density*)

Kerapatan relatif (D_r) umumnya dipakai untuk menunjukkan tingkat kerapatan tanah granular (berbutir kasar) di lapangan. Kerapatan relatif dinyatakan dalam persamaan :

$$D_r = \frac{e_{mak} - e}{e_{mak} - e_{min}} \dots\dots\dots (3.19)$$

Dengan,

e_{mak} = kemungkinan angka pori maksimum

e_{min} = kemungkinan angka pori minimum

e = angka pori pada kondisi tertentu di lapangan

Kemungkinan angka pori terbesar atau kondisi terlonggar dari suatu tanah disebut *angka pori maksimum* (e_{mak}). Angka pori maksimum ditentukan dengan cara menuangkan pasir kering dengan hati-hati dengan tanpa getaran kedalam cetakan (*mould*) yang telah diketahui volumenya. Dari berat pasir di dalam cetakan, e_{mak} dapat dihitung. Secara sama, angka pori minimum e_{min} adalah kemungkinan kondisi terpadat dicapai oleh tanah. Nilai e_{min} dapat ditentukan dengan menggetarkan pasir kering yang diketahui beratnya, kedalam cetakan yang telah diketahui volumenya, dari sini kemudian dihitung angka pori minimum. Pada tanah pasir dan kerikil, kerapatan relatif (*relative density*) digunakan untuk menyatakan hubungan antara angka pori nyata dengan batas-batas maksimum dan minimum dari angka porinya.

Persamaan (3.19) dapat dinyatakan dalam berat volume tanah sebagai berikut

:

$$\gamma_d (\text{mak}) = \frac{G_s \gamma_w}{1+e_{\text{min}}} \dots\dots\dots (3.20)$$

Atau

$$e_{\text{min}} = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d (\text{mak})} - 1 \dots\dots\dots (3.21)$$

Dengan cara yang sama dapat dibentuk persamaan angka pori maksimum :

$$e_{\text{mak}} = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d (\text{min})} - 1 \dots\dots\dots (3.22)$$

Dan angka pori pada kondisi tertentu di lapangan :

$$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad \dots\dots\dots (3.23)$$

Dengan γ_d (mak) dan γ_d (min) berturut-turut adalah berat volume kering maksimum dan minimum, serta γ_d adalah berat volume kering keadaan tertentu di lapangan.

Substitusi persamaan (3.20) sampai (3.23) ke persamaan (3.19) diperoleh persamaan :

$$D_r = \left[\frac{\gamma_d(mak)}{\gamma_d} \right] \left[\frac{\gamma_d - \gamma_d(min)}{\gamma_d(mak) - \gamma_d(min)} \right] \quad \dots\dots\dots (3.24)$$

Kerapatan relatif biasanya dinyatakan dalam persen.

(g) Kepadatan relatif (*relative compaction*) (R_c)

Kepadatan relatif didefinisikan sebagai perbandingan antara berat volume kering tanah di lokasi dengan berat volume kering maksimum atau,

$$R_c = \frac{\gamma_d}{\gamma_d(mak)} \quad \dots\dots\dots (3.25)$$

Perbedaan antara kerapatan dan kepadatan relatif ditunjukkan dalam gambar 3.3.

Hubungan antara kerapatan relatif dan kepadatan relatif adalah

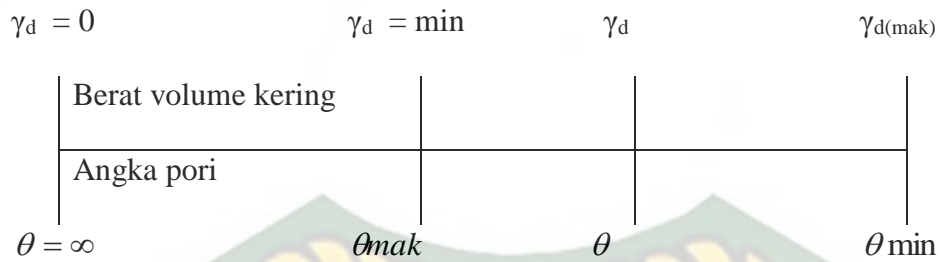
$$R_c = \frac{R_o}{1 - D_r (1 - R_o)} \quad \dots\dots\dots (3.26)$$

Dengan $R_o = \gamma_d$ (min) / γ_d (mak)

Lee dan Singh (1971) menyarankan hubungan antara kepadatan relatif dan kerapatan relatif sebagai berikut :

$$R_c = 80 + 0,20 D_r \quad \dots\dots\dots (3.27)$$

Dengan D_r dalam persen.



Sebagaimana sistem klasifikasi lainnya yang digunakan di seluruh dunia, *USCS* mengklasifikasikan tanah berdasarkan ukuran dan distribusi ukuran partikel dan sifat-sifat butir halus yang dikandungnya. Sistem *USCS* ini menggolongkan tanah ke dalam tiga kategori utama, yaitu :

1. Tanah berbutir kasar atau tanah tidak kohesif
2. Tanah berbutir halus atau tanah kohesif
3. Tanah organik atau gambut

Tanah diidentifikasi sebagai tanah organik (OL/OH dalam sistem *USCS*) jika mengandung sejumlah partikel organik yang dapat mempengaruhi sifat-sifat tanah. Untuk membantu identifikasi dari tanah ini, karakteristik berikut harus diperhatikan :

1. Tanah organik biasanya mempunyai warna coklat gelap hingga hitam dan memiliki aroma organik.
2. Sering kali tanah organik akan mengalami perubahan warna, misalnya dari hitam menjadi coklat, bila bersentuhan terbuka terhadap udara.
3. Beberapa tanah organik akan berubah warna menjadi lebih muda secara signifikan bila kering udara.

4. Tanah organik umumnya tidak memiliki kekuatan (*toughness*) yang tinggi atau plastisitas, galur dari uji tingkat kekuatan dari tanah ini akan bersifat seperti sepon (*spongy*).

Pada system klasifikasi *USCS*, tanah diklasifikasikan ke dalam tanah berbutir kasar (kerikil dan pasir) jika kurang dari 50% lolos saringan nomor 200 dan tanah berbutir halus (lanau/lempung) jika lebih dari 50% lolos saringan nomor 200.

3.2 Lempung (*Clay*)

Tanah mempunyai sifat dan karakteristik yang berbeda-beda. Istilah pasir, lempung, lanau atau lumpur digunakan untuk menggambarkan ukuran partikel pada batas ukuran butiran yang telah ditentukan, akan tetapi istilah yang sama juga digunakan untuk menggambarkan sifat tanah yang khusus, sebagai contoh, lempung adalah jenis tanah yang bersifat kohesif dan plastis, sedang pasir digambarkan sebagai tanah yang tidak kohesif dan tidak plastis (Hardiyatmo, 2006).

Tanah lunak menurut Panduan Geoteknik (2001) merupakan tanah yang dapat menyebabkan masalah ketidakstabilan dan penurunan jangka panjang yang tidak dapat ditolerir, tanah tersebut mempunyai kuat geser yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi. Jenis tanah lunak dibedakan yaitu tanah lunak anorganik (lempung dimana kadar organiknya kurang dari 25 % dan tanah lunak organik (gambut).

Tanah lempung lunak merupakan jenis tanah yang mengandung mineral-mineral lempung dan air yang tinggi sehingga menyebabkan kuat gesernya rendah.

Terdapat kira-kira 15 macam mineral yang diklasifikasikan sebagai mineral lempung (Kerr, 1959) di antaranya terdiri dari kelompok-kelompok *montmorillonite*, *illite*, *kaolinite* dan *polygorskite*. Terdapat pula kelompok yang lain misalnya *chlorite*, *vermiculite* dan *halloysite*. Tanah lempung yang kandungan mineral *montmorillonite* tinggi memperlihatkan kapasitas menyerap air yang tinggi, sifat kembang susut tinggi, konsolidasi tinggi, permeabilitas rendah dan kekakuan tanah yang rendah

Ada dua istilah dalam geoteknik yaitu lempung lunak bilamana jenis tanah ini mempunyai kuat geser antara 12,5 – 25 KN/m², tanah ini mudah dibentuk dengan jari tangan, sedangkan tanah lempung yang sangat lunak mempunyai kuat geser < 12,5 KN/m² bila diremas dengan kepalan tangan akan keluar di sela-sela jari tangan (Panduan Teknik, 2000).

Para ahli memiliki definisi yang berbeda tentang tanah lempung, antara lain Hardiyatmo (1992) menjelaskan bahwa tanah lempung tersusun atas mineral-mineral hasil pelapukan tanah secara kimiawi yang berukuran diameter butiran lebih kecil dari 0,002 mm, sedangkan Holtz dan Kovacs (1981) menyatakan bahwa lempung adalah tanah yang mengandung mineral-mineral lempung dan memiliki plastisitas serta kohesifitas. Dalam standard *AASHTO* dan *ASTM*, penentuan klasifikasi tanah lempung ditentukan dari ukuran butir, indeks plastisitas dan batas cair. Standard *AASHTO* mensyaratkan lebih dari 35 % lolos saringan nomor 200 dengan indeks plastisitas minimum 11 % sedangkan standard *ASTM* mensyaratkan lebih dari 50 % lolos saringan nomor 200. Holtz dan Kovacs (1981) memberikan

garis besar identifikasi tanah lempung yaitu berbutir halus dan tidak dapat dilihat butiran tunggalnya, bersifat kohesi dan plastis.

Hardiyatmo (1992) menjelaskan perilaku teknis tanah berbutir halus khususnya tanah lempung sangat dipengaruhi oleh air karena pada tanah berbutir halus luas permukaan spesifik menjadi lebih besar variasi kadar air akan mempengaruhi plastisitas tanah. Distribusi ukuran butir bukan faktor yang mempengaruhi kelakuan tanah berbutir halus.. Tingkat kohesifitas tanah lempung sangat menentukan kuat geser tanah. Kedudukan fisis tanah berbutir halus pada kadar air tertentu disebut konsistensi (Hardiyatmo, 1992). Tingkat konsistensi tanah lempung menurut Bowles (1985) disampaikan sebagai berikut :

1. *Liquid Limit* (batas cair / *LL*)

Adalah suatu nilai kadar air yang apabila tanah di atas nilai kadar air ini maka tanah akan berperilaku sebagai viscous fluit (campuran antara tanah dan air dengan kuat gesernya tidak terukur)

2. *Plastic Limit* (batas plastis / *PL*)

Adalah suatu nilai kadar air, apabila tanah di bawah nilai kadar air ini maka tanah tidak berperilaku sebagai material plastis. Tingkat keplastisan tanah antara batas cair dan batas plastis disebut Indeks Plastis.

3. *Shrinkage Limit* (batas susut / *SL*)

Adalah suatu nilai kadar air, apabila tanah di bawah nilai kadar air ini, maka tanah tidak mengalami perubahan volume saat dikeringkan lebih lanjut.

Batasan mengenai indeks plastisitas, sifat , macam tanah dapat dilihat pada Tabel. 3.4.

Tabel 3.4. Nilai indeks plastisitas dan macam tanah (Hardiyatmo, 2006)

PI	Sifat	Macam Tanah	Kohesi
0	Non Plastis	Pasir	Non kohesif
< 7	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesif sebagian
7 – 17	Plastisitas sedang	Lempung berlanau	Kohesif
> 17	Plastisitas tinggi	Lempung	Kohesif

Dari Tabel 3.4 di atas menunjukkan bahwa lempung memiliki nilai plastisitas indeks (PI) yang paling besar di antara pasir, lanau dan lempung berlanau dan bersifat kohesif.

Bowles (1984) memberikan identifikasi lapangan yang sederhana untuk membedakan antara lempung, pasir dan lanau yaitu :

1. Pasir dan lanau akan cepat mengering dan mudah dibersihkan dari telapak tangan, lempung cenderung mengakibatkan perubahan warna (*discoloration*) setelah mengering. Untuk memberiskannya butuh pembilasan dengan air.
2. Lempung juga cenderung menjadi halus (*smooth*) saat disentuh, juga dapat meninggalkan *smooth streak* saat *spatula blade* melewati massa tanah yang basah.

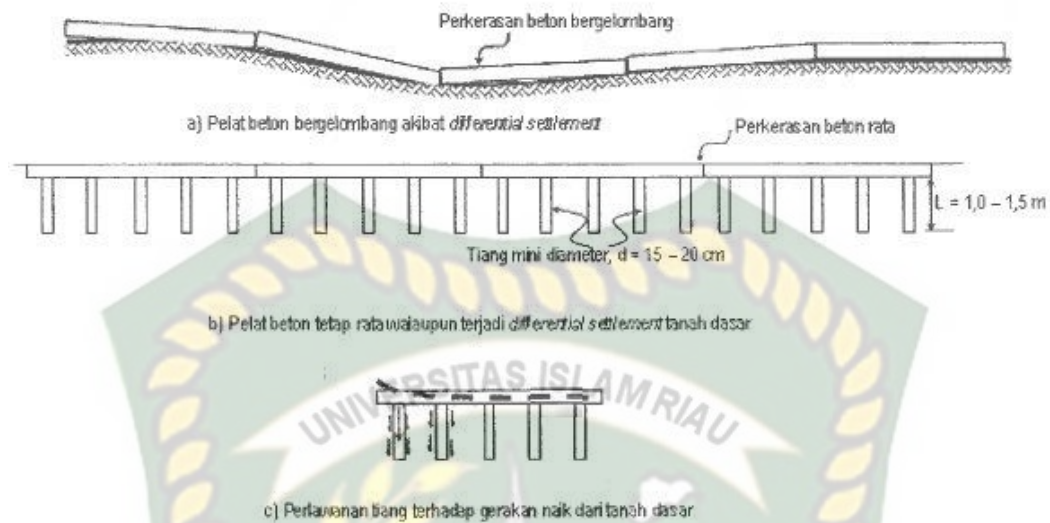
3.3 Sistem Pelat Terpaku

Hardiyatmo, dkk. (2002) telah meneliti perilaku pelat yang didukung oleh kelompok tiang pada tanah lunak dengan melakukan uji model di laboratorium. Model fondasi tiang menggunakan pipa baja berdiameter 1,5 cm yang diisi spesi. Modulus reaksi tanah dasar vertikal meningkat dan lendutan pile cap menurun oleh adanya perlawanan tanah di sekitar tiang. Pada tahun 2008 ditemukanlah Sistem

Pelat Terpaku (*Nailed Slab System*) oleh Hary Christady Hardiyatmo yaitu suatu perkerasan beton bertulang (tebal antara 12 – 20 cm) yang didukung oleh tiang-tiang beton mini (panjang 150 – 200 cm dan diameter 15 – 20 cm). Tiang-tiang dan pelat beton dihubungkan secara monolit dengan bantuan tulangan-tulangan. Interaksi antara pelat beton-tiang-tanah disekitarnya menciptakan suatu perkerasan yang lebih kaku, yang lebih tahan terhadap deformasi tanah dasar.

Fungsi tiang-tiang dalam Sistem Pelat Terpaku kecuali berguna untuk menaikkan daya dukung tanah dasar, juga menjaga agar pelat beton tetap dalam kontak yang baik dengan lapis pondasi bawah dan/atau tanah dasar di bawahnya, sehingga timbulnya rongga-rongga di bawah pelat beton yang mengurangi kekuatan struktur perkerasan dapat dicegah dan kekuatan jangka panjang struktur perkerasan lebih terjamin. Kenaikan daya dukung tanah dasar akibat pengaruh dukungan tiang-tiang pada pelat akan mengurangi kebutuhan tebal perkerasan beton dan memperkaku sistem perkerasan (Hardiyatmo, 2008).

Sistem Pelat Terpaku cocok digunakan untuk perkerasan yang tanah dasarnya dipengaruhi oleh penurunan tidak seragam karena interaksi tanah-tiang-pelat membuat pelat lebih kaku sehingga mengurangi terjadinya beda penurunan permukaan perkerasan (menciptakan permukaan perkerasan beton yang selalu rata). Pelat terpaku juga memungkinkan digunakan pada jalan yang tanah dasarnya berpotensi kembang-susut dan mengalami getaran yang kuat oleh beban lalu-lintas berat. Naik-turunnya tanah dasar tereduksi oleh kekakuan yang diciptakan oleh interaksi anatara pelat beton, tiang-tiang dan tanah dalam zona terkurung tiang-tiang (Hardiyatmo, 2008).

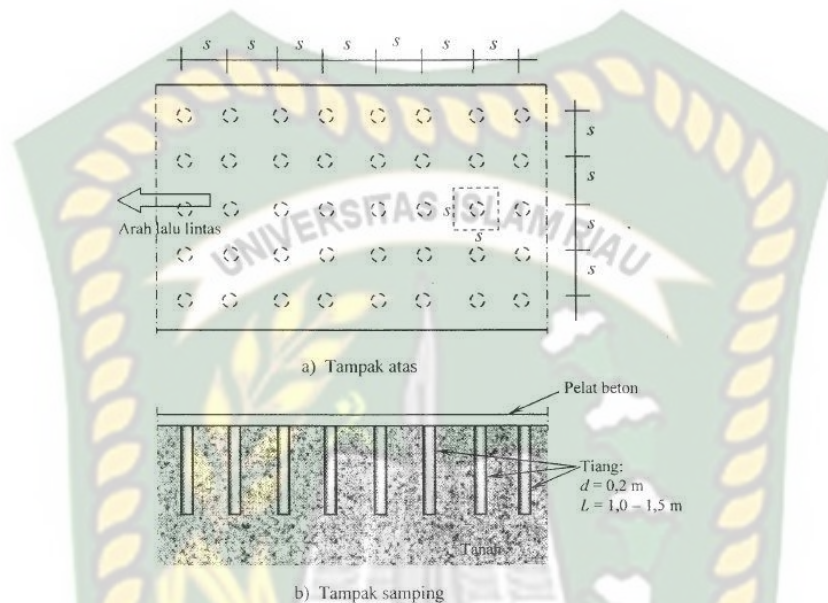


Gambar 3.2. Ilustrasi pengaruh pemasangan tiang sebagai “ paku” pada perkerasan beton (Hardiyatmo, 2008)

Pada Gambar 3.2 dapat dilihat pengaruh pemasangan tiang-tiang pada perkerasan beton. Tiang-tiang diharapkan dapat mereduksi perbedaan penurunan sehingga perkerasan tetap rata pada arah memanjang jalan. Demikian juga pada arah melintang jalan, perbedaan penurunan juga dapat direduksi, dimana tiang dapat berfungsi sebagai ankur sehingga pelat tidak mengalami jungkitan. Tiang-tiang tersebut berfungsi laksana paku bagi pelat beton. Tiang-tiang juga menambah kuat dukung sistem perkerasan dan mengurangi faktor kehilangan dukungan (*loss of support factor, LS*)

Hasil uji beban siklik pada pelat yang didukung tiang menunjukkan adanya reduksi penurunan yang signifikan oleh pemasangan tiang yang memaku pelat ke tanah dasar (Hardiyatmo, 2009). Pemasangan tiang yang monolit pada pelat beton juga menaikkan modulus reaksi tanah dasar (k). Selain itu, bila tanah-dasar terjadi penurunan tidak seragam (*differential settlement*), maka gerakan tanah dasar di

sekitar tiang-tiang akan mendapat perlawanan gesek tiang, sehingga beda penurunan akan menjadi kecil atau ketidakrataan pelat akan terkendalikan.



Gambar 3.3. Tipikal perkerasan kaku menggunakan Sistem Pelat Terpaku (Hardiyatmo, 2008)

Pada Gambar 3.3 menggambarkan tipikal perkerasan beton dengan Sistem Pelat Terpaku. Perkerasan beton bertulang (tebal antara 15 – 20 cm) yang didukung oleh tiang-tiang beton mini (panjang 150 – 200 cm dan diameter 20 cm). Tiang-tiang dan pelat beton dihubungkan secara monolit dengan bantuan tulangan-tulangan. Interaksi antara pelat beton-tiang-tanah di sekitarnya menciptakan suatu perkerasan yang lebih kaku yang lebih tahan terhadap deformasi tanah dasar.

3.4 Metode Prapembebanan Untuk Konstruksi Jalan Di Atas Tanah Lunak

Prapembebanan (*preloading*) adalah suatu metode konstruksi perbaikan tanah berupa penempatan timbunan pada lokasi yang akan distabilisasi dengan berat sekurang-kurangnya sama dengan berat struktur di masa yang akan datang

(beban permanen) dan akan dibuang pada saat konsolidasi yang diinginkan sudah tercapai (Hardiyatmo, 2006).

Penurunan pada tanah lempung selama masa layanan dapat dikurangi dengan prapembebanan (*preloading*). Laju konsolidasi umumnya diukur dengan pemantauan penurunan dan / atau pengukuran tekanan air pori lapangan. Berbeda dengan lempung yang proses konsolidasinya membutuhkan waktu yang lama, terutama jika ketebalan lapisan lempungnya besar. Penggunaan prapembebanan pada gambut yang permeabilitasnya tinggi menguntungkan karena waktu yang dibutuhkan singkat.

Penambahan kuat geser (*gain in strength*) akibat konsolidasi umumnya besar karena sudut geser lempung yang tinggi. Penurunan akibat konsolidasi sekunder selama masa layan yang dominan pada tanah lempung juga dapat dikurangi dengan beban tambahan (*surcharge*). Beban tambahan adalah beban di luar berat struktur di masa akan datang (beban permanen) yang bersifat sementara dan berfungsi untuk meminimalkan penurunan selama masa layan.

3.5 Penurunan

Menurut Hardiyatmo (2007), jika lapisan tanah dibebani maka tanah akan mengalami regangan atau penurunan (*settlement*). Regangan yang terjadi di dalam tanah ini disebabkan oleh dua akibat, yaitu berubahnya susunan tanah dan berkurangnya rongga pori di dalam tanah tersebut. Jumlah dari regangan di seluruh kedalaman lapisan tanah merupakan penurunan total tanah. Penurunan akibat beban adalah jumlah total dari penurunan segera dan penurunan konsolidasi. Penurunan

yang terjadi pada tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus, kering atau tidak jenuh terjadi dengan segera sesudah beban bekerja. Penurunan pada kondisi ini disebut penurunan segera (*immediate settlement*). Penurunan segera merupakan bentuk penurunan elastis. Dalam praktek sangat sulit memperkirakan besarnya. Hal ini tidak hanya karena tanah dalam kondisi alam tidak homogen dan anisotropis dengan modulus elastisitas yang bertambah sesuai kedalaman, tetapi juga terdapat kesulitan dalam mengevaluasi kondisi tegangan dan regangan yang terjadi di lapisan tanah. Penurunan konsolidasi terjadi pada tanah berbutir halus yang terletak di bawah muka air tanah dan memerlukan waktu yang lamanya tergantung pada kondisi lapisan tanah. Akibat adanya pembebanan akan terjadi konsolidasi penurunan yang berlangsung dalam 3 fase yaitu (Leonard, 1962 dalam Hardiyatmo, 2007) :

1. Fase Awal

Yaitu fase dimana penurunan terjadi dengan segera sesudah beban bekerja. Penurunan ini terjadi akibat proses penekanan udara yang keluar dari dalam pori tanah. Pada lempung jenuh kemungkinan ini sangat kecil, tetapi pada lempung tidak jenuh sangat besar pengaruhnya terhadap penurunan.

2. Fase konsolidasi primer atau konsolidasi hidrodinamis

Yaitu penurunan yang dipengaruhi oleh kecepatan aliran air yang meninggalkan rongga pori tanah akibat adanya tambahan tekanan. Proses konsolidasi ini sangat dipengaruhi oleh sifat tanah seperti, permeabilitas, kompresibilitas, angka pori, bentuk geometri tanah termasuk tebal lapisan mampat,

pengembangan arah horizontal dari zona mampat, dan batas lolos air, dimana air keluar menuju lapisan yang lolos air ini.

3. Fase konsolidasi sekunder

Merupakan proses lanjutan dari konsolidasi primer, dimana prosesnya berjalan sangat lambat. Pada tanah-tanah anorganik penurunan konsolidasi sekunder jarang diperhitungkan karena pengaruhnya sangat kecil., kecuali pada jenis tanah organik tinggi dan beberapa lempung anorganik yang sangat mudah mampat.

Penurunan akibat beban adalah jumlah total dari penurunan segera dan penurunan konsolidasi yang dinyatakan dengan persamaan 3.28 :

$$S = S_i + S_c + S_s \quad \dots\dots\dots (3.28)$$

Dimana :

S = penurunan total

S_i = penurunan segera

S_c = Penurunan akibat konsolidasi primer

S_s = penurunan akibat konsolidasi sekunder

3.5.1 Penurunan Segera (*Intermediate Settlement*)

1. Penurunan segera akibat beban terbagi rata di luasan lingkaran fleksibel

$$S_t = q \cdot R \cdot I_r / E \quad \dots\dots\dots (3.29)$$

2. Penurunan segera pada fondasi segi empat persegi panjang fleksibel.

$$S_i = q_n \cdot B(1-\mu^2) \cdot I_p / E \quad \dots\dots\dots (3.30)$$

3. Penurunan segera akibat beban terbagi rata luasan fleksibel pada lapisan dengan tebal terbatas.

$$S_i = q_n \cdot I_p \cdot B / E \quad \dots\dots\dots (3.31)$$

$$I_p = (1 - \mu^2) \cdot F_1 + (1 - \mu - 2\mu^2) \cdot F_2 \quad \dots\dots\dots (3.32)$$

Dalam menentukan tambahan tegangan vertikal yang terjadi akibat tambahan beban terbagi rata berbentuk trapezium dengan panjang tak terhingga maka tambahan tegangan vertikal akibat beban terbagi rata berbentuk trapezium memanjang tak terhingga menjadi :

$$\Delta\sigma_z = q / \pi \left(\frac{\alpha + b}{\alpha} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - (b / \alpha) \alpha_2 \quad \dots\dots\dots (3.33)$$

$$\Delta\sigma_z = q \cdot I \quad \dots\dots\dots (3.34)$$

Dimana :

$$I = 1 / \pi \left(\frac{\alpha + b}{\alpha} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - (b / \alpha) \quad \dots\dots\dots (3.35)$$

3.5.2 Penurunan Konsolidasi Primer

$$S_c = \Delta e \cdot H / (1 + e_0) = (e_1 - e_0) \cdot H / (1 + e_0) \quad \dots\dots\dots (3.36)$$

Dimana :

e_0 = angka pori awal

e_1 = angka pori saat berakhirnya konsolidasi

Δe = Selisih angka pori

H = Tebal lapisan tanah yang ditinjau

Jika penurunan konsolidasi dihitung berdasarkan indeks pemampatan (C_c) dan indeks pemampatan kembali (C_r) maka C_c dan C_r dihitung sebagaimana persamaan di atas.

3.5.3 Penurunan Konsolidasi Sekunder

Penurunan konsolidasi sekunder terjadi pada tegangan efektif konstan, yaitu setelah penurunan konsolidasi primer berhenti. Besar penurunannya merupakan fungsi waktu (t) dan kemiringan kurva indeks pemampatan sekunder (C_α) yang dinyatakan dengan persamaan 3.37 :

$$C_\alpha = \Delta_e / \log (t_2 / t_1) \dots\dots\dots (3.37)$$

$$S_s = C_\alpha / (1+e_p) \cdot H \cdot \log(t_2/t_1) \dots\dots\dots (3.38)$$

Dimana :

C_α = Indeks pemampatan sekunder

S_s = penurunan konsolidasi swekunder

H = tebal benda uji awal atau tebal lapisan lempung

e_p = angka pori saat akhir konsolidasi primer

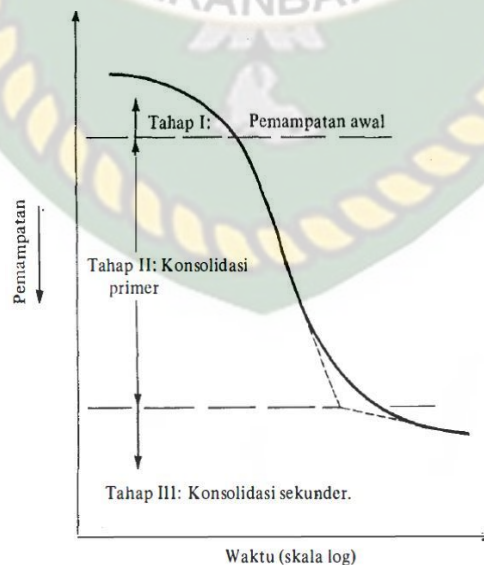
t_2 = $t_1 + \Delta t$

t = saat waktu setelah konsolidasi primer berhenti

Tabel 3.5 Hubungan Untuk Indeks Pemampatan C_C (Rendon Herrero, 1980)

Persamaan	Acuan	Daerah Pemakaian
$C_C = 0,007 (LL - 7)$ $C_C = 0,01 W_N$	Skempton	Lempung yang terbentuk kembali (remolded)
$C_C = 1,15 (e_0 - 0,27)$	Nishida	Lempung Chicago
$C_C = 0,30 (e_0 - 0,27)$	Hough	Semua Lempung Tanah kohesif anorganik : lanau, lempung berlanau, lempung
$C_C = 0,0115 W_N$ $C_C = 0,0046 (LL - 9)$ $C_C = 0,75 (e_0 - 0,5)$		Tanah organic, gambut, lanau organic, dan lempung
$C_C = 0,208e_0 + 0,0083$		Lempung Brazilia
$C_C = 0,156e_0 + 0,010$		Tanah dengan plastisitas rendah Lempung Chicago Semua lempung

Catatan : e_0 = angka pori di lapangan
 W_N = kadar air tanah di lapangan
 LL = liquid limit (batas cair dalam persen)



Gambar 3.4 Hubungan waktu dan pemampatan (Das, 1992)

Pada Gambar 3.4 dapat dilihat tahap-tahap pemampatan versus waktu yang terdiri dari tiga tahapan yang berbeda yaitu tahap I pemampatan awal (*initial compression*), yang umumnya disebabkan oleh pembebanan awal (*preloading*), pada tahap II konsolidasi primer (*primary consolidation*), yaitu periode selama tekanan air pori secara lambat laun dipindahkan ke dalam tegangan efektif, sebagai akibat dari keluarnya air dari pori-pori tanah dan tahap III konsolidasi sekunder (*secondary consolidation*) yang terjadi setelah tekanan air pori hilang seluruhnya. Pemampatan yang terjadi di sini adalah disebabkan oleh penyesuaian yang bersifat plastis dari butir-butir tanah.

3.5.4 Besar dan Waktu Penurunan Tanah

Penurunan total (S_t) yang dihitung meliputi penjumlahan perhitungan segera (S_i) dan perhitungan akibat konsolidasi (S_c) (Hardiyatmo, 2002).

Penurunan segera :

$$S_i = \frac{H}{c} \ln + \frac{p_0' + \Delta p}{p_0'} \dots\dots\dots (3.39)$$

$$C = \frac{1.5 qc}{p_0'} \dots\dots\dots (3.40)$$

$$S_c = \frac{c_c x H}{1 + e_0} \log + \frac{p_0' + \Delta p}{p_0'} \dots\dots\dots (3.41)$$

Dengan :

$$\Delta p = Q^* \text{isobar boussineq value}$$

Untuk memperkirakan lamanya waktu penurunan tanah yang akan terjadi digunakan formula sebagai berikut :

$$t = \frac{H^2 T_v}{c_v} \dots\dots\dots (3.42)$$

3.6 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga saat ini merupakan metode paling populer yang digunakan oleh berbagai software geoteknik. Metode ini menggunakan perhitungan numerik untuk mendapatkan solusi dari permasalahan (model) yang kompleks. Dengan metode ini hampir semua permasalahan boundary (kondisi batas) dapat diperoleh solusinya secara cepat dan baik. 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. Batasan pertama adalah bagaimana permodelan material yang akan digunakan. Penggunaan modulus *young* dan angka *poisson* menyajikan perilaku tanah dan batuan yang cukup kasar.

3.7 Metode Analisis Plaxis

Aplikasi dalam geoteknik umumnya membutuhkan permodelan struktur tanah untuk kemudian disimulasikan perilaku tanah secara *non linear* dan *time-dependent*.

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.

Perhitungan dengan software Plaxis

1. Geometry Modelling

Analisis dengan Metode Elemen Hingga dimulai dengan pembuatan model geometri. Pembuatan model geometri meliputi ;

- a. Pemodelan topografi, kontur, penampang, dan geometry
- 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

Inputnya dilakukan dengan menggunakan pilihan material data sets yang terdiri atas :

2.1 *Soil and interfaces*, pemodelannya dalam Plaxis meliputi :

a. *Material model*, material model digunakan untuk mensimulasikan model tanah berdasarkan karakteristik regangan-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 memodelkan struktur *massif* seperti *gravity wall*.
- *Mohr-Coulomb*, yaitu pemodelan tanah yang paling umum digunakan. Perilakunya mengikuti *Mohr-Coulomb* kriteria. Terdapat 5 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 *normally 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,. Option ini dapat juga 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. *Option* ini biasanya digunakan untuk pemodelan struktur beton atau batu.

- c. *Properties* dan parameter, digunakan untuk mendefinisikan berbagai properti dan parameter dari tanah.
- d. *Interfaces*, 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*/kehalusan 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 *Ko-procedure (lateral coefficient at rest)*. Untuk memodelkan fase konstruksi, *option deactivating geometry components* dapat dipilih. Contoh kasus timbunan badan jalan, di mana 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 option, *phreatic line* dan *ground water flow*. *Phreatic line* 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. *Updated 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 *updated 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 parameters 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 yang 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.)
- McontrA : untuk mengaktifkan *contraction* pada *tunnel lining*
- McontrB : untuk mengaktifkan *contraction* pada *tunnel lining*
- Mload A : untuk mengaktifkan *traction load* atau *point load*
- Mload B : untuk mengaktifkan *traction load* atau *point load*
- 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. Dalam kalkulasi ini kita dapat mengaktifkan / mematikan model geometri atau model struktur, mengganti properties material, atau mengubah distribusi tekanan air. Contoh untuk analisis ini adalah konstruksi timbunan dan galian bertahap.

13. Phi-c Reduction (SF)

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

$$SF = \frac{c + \sigma \cdot \tan \phi}{c_r + \sigma \cdot \tan \phi_r} \dots\dots\dots(3.43)$$

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

14. Output perhitungan Plaxis

Output dari perhitungan Plaxis antara lain :

- a. Kalkulasi angka keamanan (kurva ΣM_{SF} vs displacement)
- b. Deformasi yang terjadi pada permodelan jaringan elemen hingga
- c. Tegangan yang terjadi pada permodelan jaringan elemen hingga

15. Angka Keamanan Plaxis

Angka keamanan yang dihitung dalam program Plaxis disajikan dalam bentuk kurva ΣM_{SF} vs *displacement* yang terdapat pada modul *load displacement curves* untuk titik-titik referensi yang telah dimasukkan pada input data.

Untuk menghitung angka keamanan, 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 :

$$\tan \phi_r = \frac{\tan \phi}{\Sigma M_{SF}} \dots\dots\dots(3.44)$$

Dan

$$c_r = \frac{c}{\Sigma M_{SF}} \dots\dots\dots(3.45)$$

Pada kondisi runtuh, angka keamanan sama dengan ΣM_{SF} , hasil kalkulasi tersebut hanya terpenuhi bila tercapai kondisi *steady-state*. Kondisi *steady-state* ditunjukkan oleh kurva ΣM_{SF} vs *displacement* dimana tercapai keseimbangan antara gaya yang meruntuhkan dan daya tahan kuat geser tanah pada lereng tersebut.

3.8 Hubungan Tegangan – Regangan pada Program Plaxis

Model material merupakan suatu persamaan matematis yang menyatakan hubungan antar 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 tegangan (ε). Hubungan tegangan-regangan dapat dituliskan seperti persamaan (3.46a)

$$\underline{\sigma}' = \underline{\underline{C}} \cdot \underline{\varepsilon} \dots\dots\dots(3.46a)$$

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

$$\underline{\sigma}' = (\sigma'_{xx} \sigma'_{yy} \sigma'_{zz} \sigma'_{xy} \sigma'_{yz} \sigma'_{zx})^T \dots\dots\dots(3.46b)$$

$$\underline{\varepsilon}' = (\varepsilon'_{xx} \varepsilon'_{yy} \varepsilon'_{zz} \varepsilon'_{xy} \varepsilon'_{yz} \varepsilon'_{zx})^T \dots\dots\dots(3.46c)$$

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

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

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

$\epsilon'_{xy} \epsilon'_{yz} \epsilon'_{zx}$ = pertambahan tegangan 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*.

3.8.1 Definisi Umum dari Tegangan

Tegangan merupakan suatu tensor yang dapat dinyatakan oleh sebuah matriks dalam koordinat Cartesius seperti persamaan (3.47) :

$$\underline{\underline{\sigma'}} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.47)$$

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 :

$$\underline{\sigma} = (\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{zz} \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{zx})^T \dots\dots\dots(3.48)$$

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 :

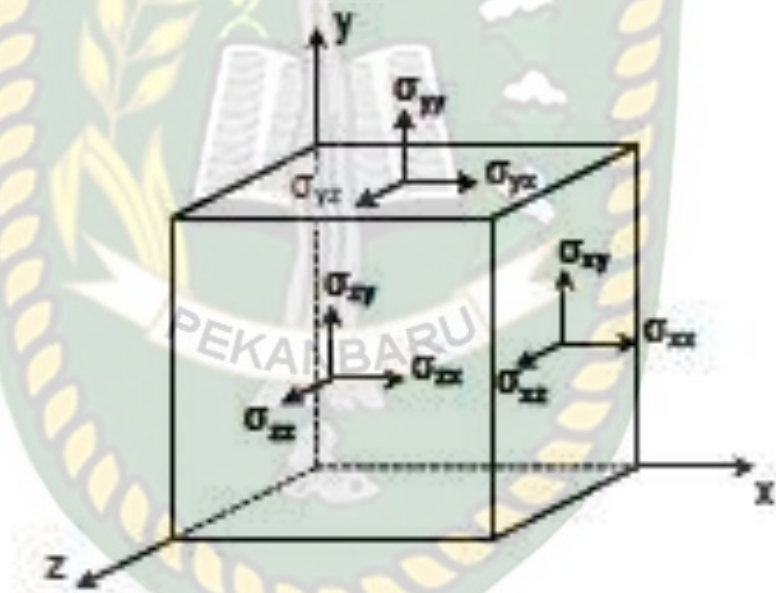
$$\underline{\sigma} = \underline{\sigma}' + \sigma_w \dots\dots\dots(3.49)$$

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 negatif 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 simbol tegangan) seperti persamaan (3.50) :

$$\underline{\sigma}' = (\sigma'_{xx} \ \sigma'_{yy} \ \sigma'_{zz} \ \sigma'_{xy} \ \sigma'_{yz} \ \sigma'_{zx})^T \quad \dots\dots\dots(3.50)$$



Gambar 3.5 Sistem koordinat umum tiga dimensi dan perjanjian tanda pada tegangan (Manual Plaxis version 8, 2007)

Seringkali lebih menguntungkan menggunakan tegangan utama dibandingkan komponen tegangan *Cartesius* dalam formulasi model material. Tegangan utama adalah tegangan di dalam sistem koordinat dimana seluruh komponen tegangan

geser adalah nol. Sebenarnya tegangan utama adalah nilai eigen dari tensor tegangan. Tegangan efektif utama dapat ditentukan dengan cara berikut :

$$\det = \left(\underline{\underline{\sigma}}^1 - \underline{\underline{\sigma}}^1 I \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (3.51a)$$

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 :

$$\sigma'_1 \leq \sigma'_2 \leq \sigma'_3 \quad \dots\dots\dots (3.51b)$$

Dimana σ'_1 merupakan tegangan tekan utama terbesar dan σ'_3 merupakan tegangan tekan utama terkecil. Dalam program *Plaxis*, model sering dinyatakan dengan mengacu pada ruang tegangan utama, seperti yang ditunjukkan dalam **Gambar 3.6**.

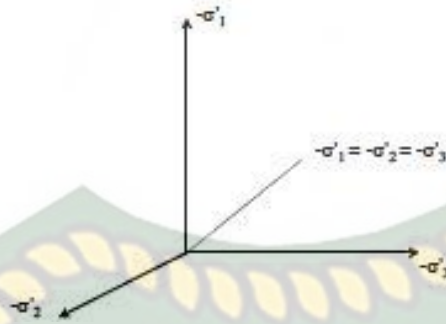
Selain tegangan utama, umumnya juga berguna untuk mendefinisikan invarian tegangan, yaitu besarnya tegangan yang tidak tergantung dari orientasi sistem koordinat. Dua buah invarian tegangan yang berguna adalah :

$$p' = -\frac{1}{3}(\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy} + \sigma'_{zz}) = -\frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) \quad \dots\dots\dots (3.52)$$

$$q =$$

$$\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left((\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy})^2 + (\sigma'_{yy} - \sigma'_{zz})^2 + (\sigma'_{zz} - \sigma'_{xx})^2 + 6 \cdot (\sigma'_{yz} + \sigma'_{zx}) \right)}. \quad (3.53)$$

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 3.6 Ruang tegangan utama (Manual Plaxis version 8, 2007)

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

$$-\sigma'_1 = p' + \frac{2}{3}q \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \dots\dots\dots (3.53a)$$

$$-\sigma'_1 = p' + \frac{2}{3}q \sin(\theta) \dots\dots\dots (3.53b)$$

$$-\sigma'_1 = p' + \frac{2}{3}q \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \dots\dots\dots (3.53c)$$

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

$$\theta = \frac{1}{3} \cdot \text{arc sin}\left(\frac{27}{2} \cdot \frac{J_3}{q^3}\right) \dots\dots\dots (3.54)$$

Dengan,

$$J_3 = (\sigma'_{xx} - p')(\sigma'_{yy} - p')(\sigma'_{zz} - p') - (\sigma'_{xx} - p')\sigma_{yz}^2 - (\sigma'_{yy} - p')\sigma_{zx}^2 - (\sigma'_{zz} - p')\sigma_{xy}^2 + 2 \sigma_{zy} \sigma_{yz} \sigma_{zx} \dots\dots\dots (3.55)$$

3.8.2 Definisi Umum dari Regangan

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

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.56)$$

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 $\epsilon_{xy}, \epsilon_{yx}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{zy}, \epsilon_{zx}$ dan ϵ_{xz} melainkan komponen regangan geser $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ yang digunakan. Di bawah kondisi di atas, regangan seringkali dituliskan dalam notasi vektor, yang melibatkan hanya enam buah komponen yang berbeda, yaitu :

$$\underline{\epsilon} = (\epsilon_{xx} \ \epsilon_{yy} \ \epsilon_{zz} \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx})^T \dots\dots\dots (3.57)$$

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \dots\dots\dots (3.58a)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \dots\dots\dots (3.58b)$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z} \dots\dots\dots (3.58c)$$

$$\gamma_{xy} = \epsilon_{xy} + \epsilon_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \dots\dots\dots (3.58d)$$

$$\gamma_{yz} = \epsilon_{yz} + \epsilon_{zy} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \dots\dots\dots (3.58e)$$

$$\gamma_{zx} = \epsilon_{zx} + \epsilon_{xz} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \dots\dots\dots (3.58f)$$

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).

$$\underline{\dot{\epsilon}} = (\dot{\epsilon}_{xx} \ \dot{\epsilon}_{yy} \ \dot{\epsilon}_{zz} \ \dot{\gamma}_{xy} \ \dot{\gamma}_{yz} \ \dot{\gamma}_{zx})^T \dots\dots\dots (3.59)$$

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

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

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

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad \dots\dots\dots(3.60)$$

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

$$\varepsilon = \underline{\varepsilon}^e + \underline{\varepsilon}^P \quad \dots\dots\dots(3.61)$$

3.9 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 :

$$\Delta U_w = \frac{K_w}{n} \Delta \varepsilon_v \quad \dots\dots\dots (3.62)$$

$$\frac{K_w}{n} = 100G \quad \dots\dots\dots (3.63)$$

$$G = \frac{E'}{2 \cdot (1 + \nu')} \quad \dots\dots\dots (3.64)$$

Besarnya kenaikan tegangan rata-rata efektif adalah :

$$\Delta P' = K' \Delta \varepsilon_v \quad \dots\dots\dots (3.65)$$

$$K' = \frac{E'}{2 \cdot (1 + \nu')} \quad \dots\dots\dots (3.66)$$

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.

3.10 Model Konstitutif Tanah

Ada banyak model material yang bisa digunakan untuk analisis tegangan-regangan pada tanah, tetapi yang akan disajikan dalam tulisan ini hanya 3 (tiga jenis), yaitu :

1. Model *Elastik Linier*
2. Model *Mohr-Coulomb*
3. Model *Hardening Soil*

3.10.1 Model *Elastis Linier*

Umumnya model material tanah dan batuan dinyatakan sebagai hubungan antara peningkatan infinitesimal tegangan efektif (kecepatan tegangan efektif) dan peningkatan infinitesimal regangan efektif (kecepatan regangan efektif), dan dinyatakan dengan

$$\underline{\dot{\sigma}}' = \underline{\underline{M}} \underline{\dot{\epsilon}} \dots\dots\dots(3.67)$$

Dengan $\underline{\underline{M}}$: matriks kekakuan material

Tekanan air pori secara eksplisit dikeluarkan dari hubungan tegangan – regangan.

Model elastis linier tidak cocok untuk memodelkan tanah dengan perilaku yang sangat tidak linier, namun berguna untuk simulasi perilaku struktur seperti dinding beton yang tebal ataupun pelat dengan sifat kekuatannya sangat tinggi dibanding tanah. Untuk aplikasi-aplikasi semacam ini, model linier elastis akan sering digunakan bersamaan dengan jenis material *non-porous* untuk menghilangkan tekanan air pori dari elemen-elemen struktural ini.

Hukum *Hooke* untuk perilaku elastis linier isotropik

$$\begin{bmatrix} \sigma'_{xx} \\ \sigma'_{yy} \\ \sigma'_{zz} \\ \sigma'_{xy} \\ \sigma'_{yz} \\ \sigma'_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+2\nu')} \begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & 1-\nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & \nu' & 1-\nu' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-2\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

Hubungan antara modulus *Young* (E), dengan modulus-modulus kekakuan yang lain, seperti modulus geser (G), modulus *bulk* (K), dan modulus *oedometer* (E_{oed}), dinyatakan sebagai berikut :

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \dots\dots\dots(3.69)$$

$$K' = \frac{E}{3 \cdot (1-2\nu)} \dots\dots\dots(3.70)$$

$$E_{oed} = \frac{(1-\nu) \cdot E}{(1-2\nu) \cdot (1+\nu)} \dots\dots\dots(3.71)$$

Saat memasukkan parameter dari material untuk model linier elastis atau *Mohr-Coulomb*, nilai dari G dan E_{oed} ditampilkan sebagai parameter tambahan (alternatif). Dalam program *Plaxis* parameter alternatif tersebut dipengaruhi oleh nilai modulus *Young* (E) dan *Poisson ratio* (ν) yang dimasukkan ke dalam program *Plaxis*.

3.10.2 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 (Gambar 3.14).

Prinsip dasar dari elastoplastisitas adalah regangan yang terjadi merupakan gabungan dari elastis dan plastis, $\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}^e + \underline{\varepsilon}^p$ atau $\underline{\dot{\varepsilon}} = \underline{\dot{\varepsilon}}^e + \underline{\dot{\varepsilon}}^p$.

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

$$\underline{\dot{\sigma}}' = \underline{D}^e \cdot \underline{\dot{\varepsilon}}^e = \underline{D}^e \cdot (\underline{\dot{\varepsilon}} + \underline{\dot{\varepsilon}}^p) \quad \dots\dots\dots(3.72)$$

Berdasarkan teori *plasticity* klasik (Hill, 1950), bahwa penambahan 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 dilatansi. 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 penambahan regangan plastis ditulis sebagai berikut :

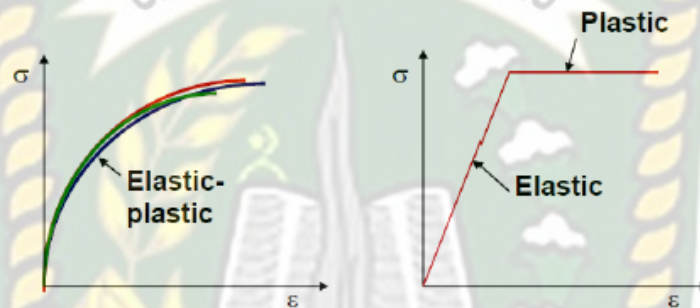
$$\underline{\dot{\varepsilon}}^p = \lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \quad \dots\dots\dots(3.73)$$

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

$$\lambda = 0 \text{ untuk : } f < 0 \text{ atau : } \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \cdot \underline{\underline{D}}^e \cdot \underline{\dot{\epsilon}} \leq 0 \text{ (Elastisitas) (3.74a)}$$

Sementara untuk tanah yang berperilaku dalam kondisi plastis :

$$\lambda > 0 \text{ untuk : } f = 0 \text{ atau : } \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \cdot \underline{\underline{D}}^e \cdot \underline{\dot{\epsilon}} > 0 \text{ (Plastisitas)(3.74b)}$$



Gambar 3.7 Ide dasar dari suatu model elastis plastis sempurna (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 :

$$\underline{\underline{\sigma}}' = \left(\underline{\underline{D}}^e - \frac{\alpha}{d} \cdot \underline{\underline{D}}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \cdot \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \cdot \underline{\underline{D}}^e \right) \cdot \underline{\dot{\epsilon}} \text{ (3.75a)}$$

Dimana :

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{\underline{D}}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \text{(3.75b)}$$

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 :

$$\underline{\dot{\epsilon}}^p = \lambda_1 \cdot \frac{\partial g_1}{\partial \underline{\sigma}'} + \lambda_2 \cdot \frac{\partial g_2}{\partial \underline{\sigma}'} + \dots \quad \dots\dots\dots(3.76)$$

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 seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.15.

$$f_{1a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_3) \cdot \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \leq 0 \quad \dots\dots\dots(3.77a)$$

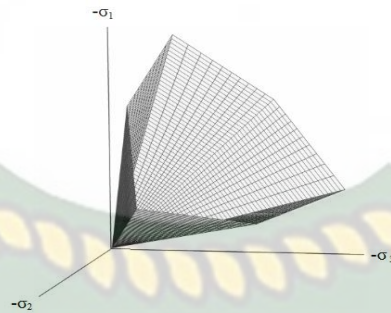
$$f_{1b} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_2) \cdot \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \leq 0 \quad \dots\dots\dots(3.77b)$$

$$f_{2a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_3 - \sigma'_1) \cdot \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \leq 0 \quad \dots\dots\dots(3.77c)$$

$$f_{2b} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_3) \cdot \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \leq 0 \quad \dots\dots\dots(3.77d)$$

$$f_{3a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_2) \cdot \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \leq 0 \quad \dots\dots\dots(3.77e)$$

$$f_{3b} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_2 - \sigma'_1) \cdot \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \leq 0 \quad \dots\dots\dots(3.77f)$$



Gambar 3.8 Bidang leleh *Mohr-Coulomb* dalam ruang tegangan utama ($c = 0$)
(*Manual Plaxis* version 8, 2007)

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

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

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

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

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

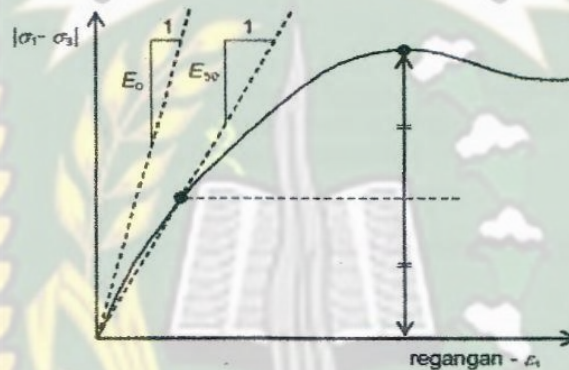
$$g_{3a} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_2) \cdot \sin \psi \quad \dots\dots\dots (3.78e)$$

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

Pada fungsi potensial plastis model *Mohr-Coulomb* dipengaruhi oleh besarnya sudut dilatansi (ψ), parameter ini diperlukan untuk memodelkan bahwa penambahan 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 :

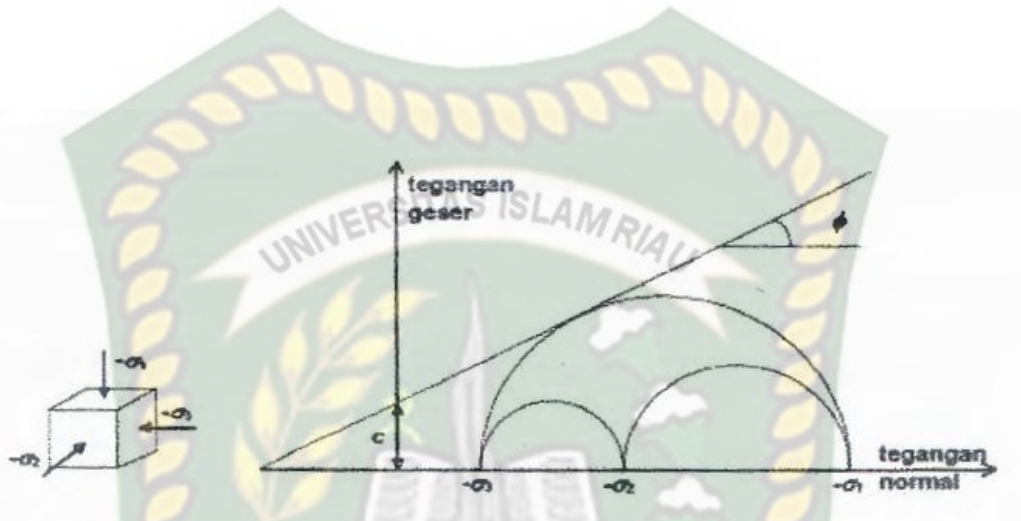
1. Modulus *Young* E (KN/m²). Dalam mekanika tanah kemiringan awal dari kurva tegangan regangan umumnya dinotasikan sebagai (E_0) digunakan bilamana material mempunyai rentang elastis linier yang besar dan untuk pembebanan umumnya digunakan modulus sekan pada 50% kekuatan material (E_{50}).



Gambar 3.9 Definisi E_0 dan E_{50} untuk hasil uji (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 (θ) dinyatakan dalam satuan derajat ($^{\circ}$). Sudut geser akan menentukan kuat geser seperti ditunjukkan pada Gambar dengan menggunakan lingkaran tegangan Mohr.



Gambar 3.10 Lingkaran-lingkaran tegangan saat mengalami leleh (Manual Plaxis V.8, 2007)

4. Kohesi (c) (KN/m^2). Dalam hal ini disarankan untuk memasukkan nilai kohesi yang kecil ($c > 0,2 \text{ kPa}$).
5. Sudut dilatansi (ψ). Tanah lempung yang terkonsolidasi cenderung tidak menunjukkan dilatansi sama sekali ($\psi = 0$). Sudut dilatansi dinyatakan dalam satuan derajat ($^{\circ}$).

3.10.3 Model *Hardening Soil* (Isotropis)

Berbeda dengan model elastis plastis sempurna, bidang leleh dari suatu model hardening plastis tidak tetap dalam ruang tegangan utama, tetapi dapat berkembang akibat peregangan plastis. Dibedakan antara dua buah jenis hardening, yaitu hardening geser dan hardening kompresi. Hardening geser digunakan untuk

memodelkan regangan yang tidak dapat kembali seperti semula akibat tegangan deviator. Hardening kompresi digunakan untuk memodelkan regangan plastis yang tidak dapat kembali seperti semula akibat kompresi primer pada pembebanan satu arah dan pembebanan isotropis.

Model *Hardening Soil* merupakan model tingkat lanjut untuk memodelkan perilaku dari berbagai jenis tanah, baik untuk tanah lunak maupun tanah yang keras (Schanz, 1998). Saat menerima beban deviator utama, tanah umumnya menunjukkan kekakuan yang semakin berkurang dan secara simultan terbentuk regangan plastis yang tidak dapat kembali seperti semula.

Beberapa karakteristik dasar dari model ini adalah :

- Kekakuan bergantung pada tegangan secara eksponensial Parameter m
- Peregangan plastis akibat beban deviator utama. Parameter E_{50}^{ref}
- Peregangan plastis akibat beban kompresi primer. Parameter E_{oed}^{ref}
- Pengurangan /pemberian beban elastis. Parameter E_{ur}^{ref} , ν_{ur}
- Keruntuhan sesuai model Mohr-Coulomb. Parameter c , ϕ dan ψ

Fitur dasar dari model *Hardening Soil* adalah kekakuan tanah yang bergantung pada tegangan yang bekerja. Pada hubungan tegangan-regangan dalam kondisi pembebanan satu arah, misalnya model menggunakan hubungan

$E_{oed} = E_{oed}^{ref} (\sigma/p^{ref})^m$. Dalam kasus pada tanah lunak, penggunaan $m = 1$ adalah cukup realistis.

3.11 Interface antara tanah dan fondasi

Selama ini permasalahan dalam bidang geoteknik diselesaikan dengan mengabaikan pengaruh *interface* antara tanah dan struktur. Untuk mengetahui nilai *interface* aktual dalam uji laboratorium disarankan menggunakan uji geser langsung dan uji tarik. Untuk mendapatkan prediksi tegangan – regangan yang lebih realistis, maka pengaruh *interface* antara tanah dan struktur perlu dipertimbangkan. *Interface* adalah elemen yang menunjukkan bahwa adanya gesekan antara dua buah permukaan struktur yang mengalami kontak satu sama lainnya. *Interface* diterapkan untuk mensimulasikan interaksi antara struktur dengan tanah karena tanpa *interface* struktur dan tanah terikat artinya tidak ada perpindahan relatif (*slipping / gapping*) yang terjadi antara struktur dan tanah. Sifat – sifat dari *interface* akan dihitung berdasarkan sifat – sifat kumpulan data tanah yang bersangkutan serta faktor reduksi kekuatan dengan menerapkan aturan – aturan berikut :

$$c_i = R_{inter} \cdot c_{tanah} \dots\dots\dots(3.79)$$

$$\tan \phi_i = R_{inter} \cdot \tan \phi_{tanah} \leq \tan \phi_{tanah} \dots\dots\dots(3.80)$$

$$\psi_i = 0^\circ \text{ untuk } R_{inter} < 1, \text{ selain itu } \psi_i = \psi_{tanah} \dots\dots\dots(3.81)$$

Selain kriteria tegangan geser dari *coulomb*, kriteria batas tegangan tarik juga berlaku pada elemen *interfacei* yaitu :

$$\sigma_n < \sigma_{t,i} = R_{inter} \cdot \sigma_{t,tanah} \dots\dots\dots(3.82)$$

dimana,

R_{inter} = faktor reduksi kekuatan *interface*

ψ = sudut dilatansi tanah ($^\circ$)

$\sigma_{t,tanah}$ = tegangan tarik dari tanah (kN/m²)

faktor reduksi kekuatan *interface* (R_{inter}) akan mereduksi kekuatan tanah disekitar *interface*. Waterman (2006) mengusulkan besarnya nilai faktor reduksi kekuatan (R_{inter}) pada berbagai interaksi struktur dengan tanah ditampilkan dalam tabel 3.6.

Tabel 3.6 Faktor reduksi pada berbagai interaksi struktur dengan tanah menurut Waterman (2006) dalam Gomes (2013)

Jenis interaksi	R_{inter}
Pasir- baja	0,7 – 0,6
Lempung – baja	0,5
Pasir – beton	1,0 – 0,8
Lempung – beton	1,0 – 0,7
Tanah – geogrid	1,0
Tanah - geotekstil	0,9 – 0,5

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Umum

Dalam bab metode penelitian ini diuraikan tentang, lokasi penelitian, bahan penelitian, alat penelitian dan tahapan pelaksanaan penelitian, agar penelitian ini berjalan dengan baik.

4.2 Lokasi Penelitian

Penelitian yang dilakukan ini bersifat kajian sehingga tidak bersifat spesifik pada satu kasus dan banyak mengkaji literatur-literatur serta penelitian-penelitian sebelumnya yang akan digunakan sebagai data-data sekunder, lokasi penelitian banyak dilakukan di Universitas Islam Riau.

4.3 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan untuk penelitian ini adalah

1. Data-data sekunder parameter tanah lempung dan tanah timbunan seperti model material yang digunakan untuk tanah lempung dan timbunan adalah *Hardening Soil*, jenis perilaku material untuk tanah lempung adalah *undrained* dan timbunan adalah *drained*, berat isi tanah di atas muka air tanah (γ_{unsat}), berat isi tanah di atas muka air tanah (γ_{sat}), permeabilitas horizontal (k_x), permeabilitas vertikal (k_y), modulus *young* (E_{ref}), angka poisson (ν), kohesi (c_{ref}), sudut geser (ϕ), sudut dilatansi (ψ), kekakuan sekan dari uji

triaksial terdrainase Data-data sekunder parameter tanah tersebut dapat dilihat pada lampiran.

2. Data sekunder untuk analisis sistem pelat terpaku

Data-data untuk pelat terpaku seperti model material untuk tiang adalah *linier-elastic* dan pelat adalah *floor*, perilaku material untuk tiang adalah *non-porous* dan pelat adalah *linier-elastic*, tebal atau diameter dari tiang dan pelat (d), berat volume (γ) dari tiang dan pelat, modulus young (E), modulus geser (G) dan rasio poisson (ν). Data-data parameter pelat terpaku tersebut dapat dilihat pada lampiran.

4.4 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi :

1. 1 (satu) unit komputer
2. Software Plaxis 2D V. 8.2

4.5 Tahapan Penelitian

Agar penelitian ini dapat lebih terarah maka penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan yaitu :

1. Persiapan

Persiapan yang dilakukan meliputi perumusan masalah dan studi pustaka.

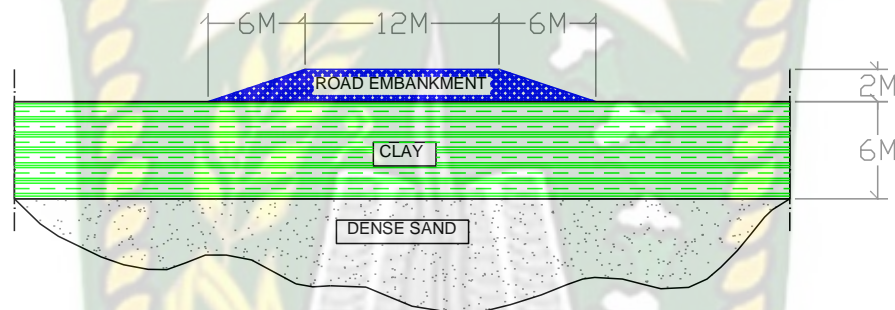
2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data meliputi pengumpulan data sekunder parameter tanah lempung dan tanah timbunan dan data sekunder pelat terpaku.

3. Menentukan parameter tanah dan parameter pelat terpaku.

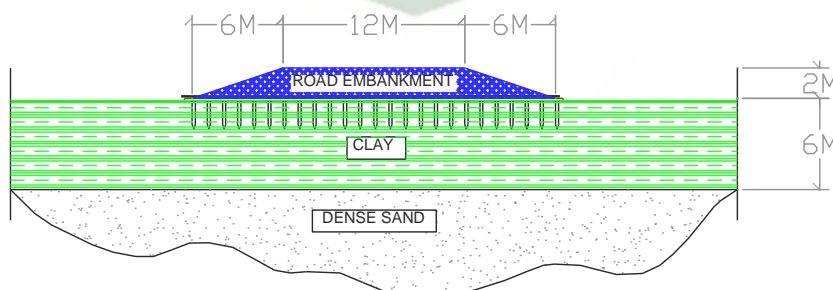
4. Pemodelan

Pemodelan terdiri dari 2 macam pemodelan yaitu pemodelan timbunan di atas tanah lempung lunak tanpa perkuatan dan pemodelan timbunan di atas tanah lempung lunak dengan perkuatan sistem pelat terpaku. Pada Gambar 4.1 dapat dilihat geometrik timbunan tanpa perkuatan dengan kondisi tanah dasar adalah tanah lempung dan konstruksi hanya menggunakan tanah timbunan.



Gambar 4.1 Geometrik timbunan tanpa perkuatan

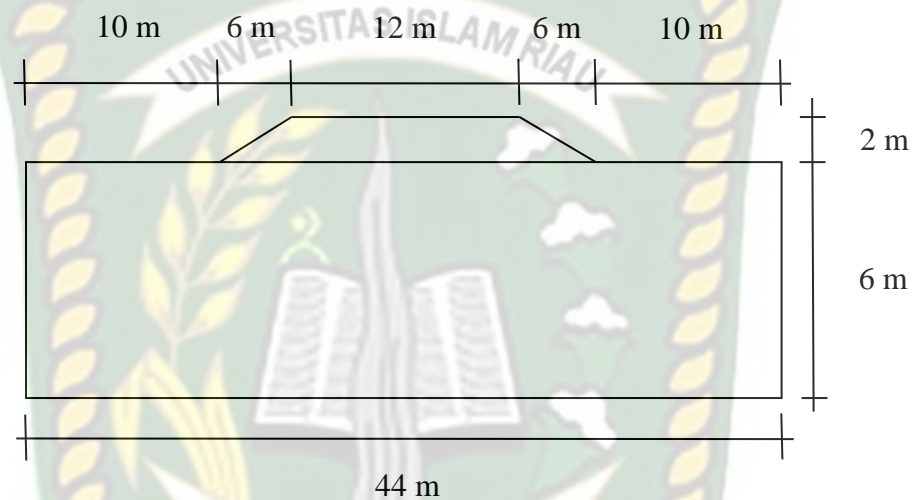
Model timbunan dengan perkuatan Sistem Pelat Terpaku seperti Gambar 4.2. Pada model ini pelat terpaku terletak di permukaan tanah lempung/*Clay* di bawah timbunan dengan ketinggian tanah lempung 6 m dan ketinggian timbunan 2 m



Gambar 4.2 Geometrik timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

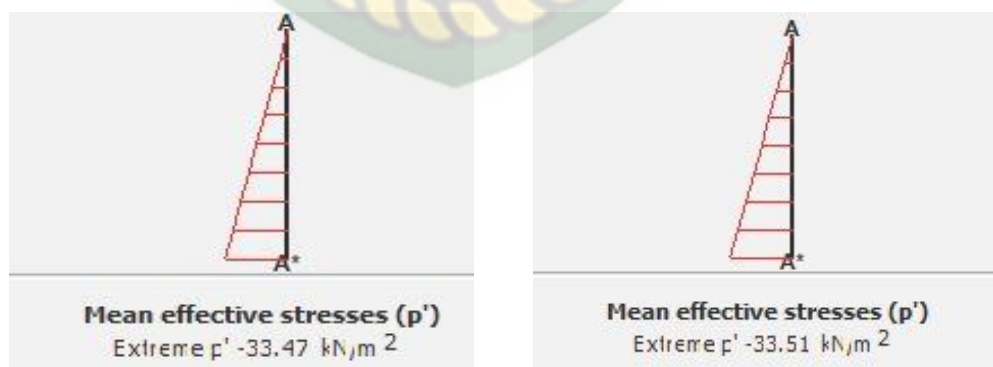
5. *Boundary* Pemodelan

Sebelum analisis dilakukan pengecekan terhadap *boundary* model agar *boundary* model yang digunakan tidak mempengaruhi dalam analisis selanjutnya. Adapun sketsa ukuran dari *boundary* dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Sketsa ukuran *boundary* pemodelan

Pada Gambar 4.4 dapat dilihat hasil pengecekan *boundary* dengan membandingkan tegangan efektif rata-rata maksimum pada kondisi awal dan setelah perhitungan yang dilakukan pada timbunan tanpa perkuatan



Gambar 4.4 Hasil pengecekan tegangan efektif rata-rata maksimum (p') pada kondisi awal dan setelah perhitungan pada timbunan tanpa perkuatan

Pada Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa pada timbunan tanpa perkuatan tegangan efektif rata-rata maksimum pada kondisi awal sebesar 33,47 kN/m² dan setelah perhitungan sebesar 33,51 kN/m². Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai tegangan efektif rata-rata maksimum setelah perhitungan dan pada kondisi awal tidak jauh berbeda dan selisih nilai tegangan efektif rata-rata maksimumnya kurang dari 5% sehingga *boundary* dapat digunakan dalam pemodelan.

Dan pada Gambar 4.5 dapat dilihat juga hasil pengecekan *boundary* pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku.

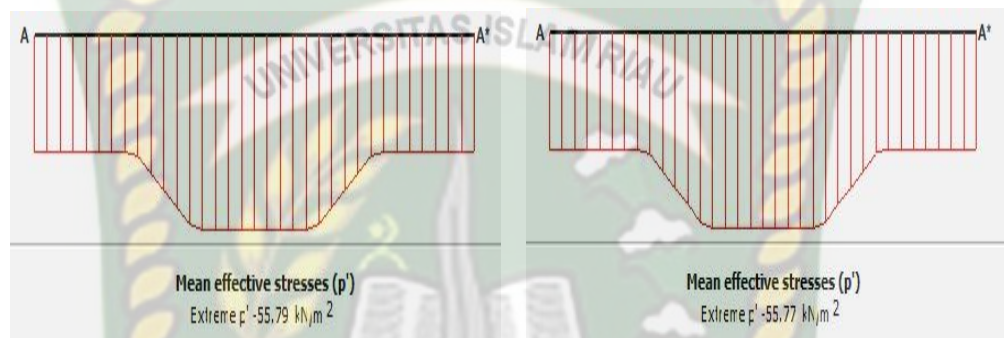


Gambar 4.5 Hasil pengecekan tegangan efektif rata-rata maksimum (p') pada kondisi awal dan setelah perhitungan pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Pada Gambar 4.5 dapat dilihat juga bahwa pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku tegangan efektif rata-rata maksimum pada kondisi awal sebesar 23,93 kN/m² dan setelah perhitungan sebesar 23,95 kN/m². Dari hasil tersebut menunjukkan juga bahwa pada timbunan dengan sistem pelat terpaku nilai tegangan efektif rata-rata maksimum setelah perhitungan dan pada kondisi awal tidak jauh berbeda dan selisih nilai tegangan efektif rata-

rata maksimumnya kurang dari 5% sehingga *boundary* dapat digunakan dalam pemodelan.

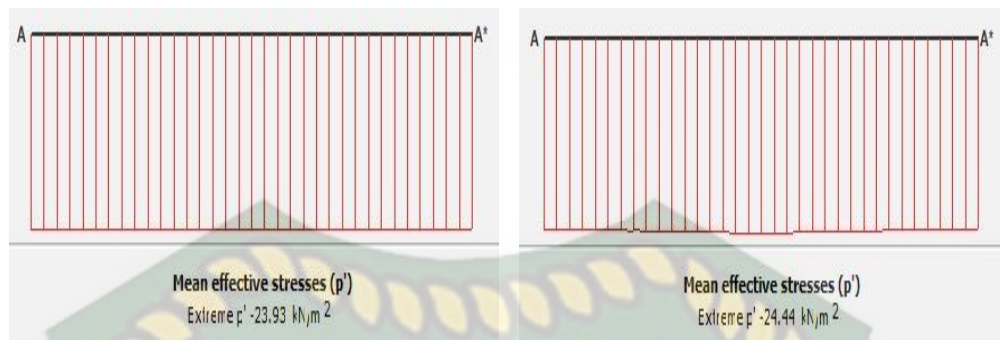
Selanjutnya dilakukan juga pengecekan untuk melihat pengaruh lapisan pasir padat di bawah tanah lempung pada timbunan tanpa perkuatan, hasil pengecekan dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Hasil pengecekan tegangan efektif rata-rata maksimum (p') pada kondisi awal dan setelah perhitungan pada timbunan tanpa perkuatan untuk mengecek pengaruh lapisan pasir padat di bawah lapisan lempung

Dari Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa tegangan efektif rata-rata maksimum pada kondisi awal sebesar $55,79 \text{ kN/m}^2$ dan setelah perhitungan sebesar $55,79 \text{ kN/m}^2$. Dari hasil tersebut menunjukkan nilai tegangan efektif rata-rata maksimum setelah perhitungan dan pada kondisi awal tidak jauh berbeda dan selisih nilai tegangan efektif rata-rata maksimumnya kurang dari 5% sehingga lapisan pasir padat di bawah tanah lempung pada timbunan tanpa perkuatan tidak mempengaruhi dalam analisis perhitungan dan lapisan pasir padat ini tidak dimodelkan dalam pemodelan.

Dan pada Gambar 4.7 dapat dilihat juga hasil pengecekan pengaruh lapisan pasir padat di bawah lapisan lempung pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku.



Gambar 4.7 Hasil pengecekan tegangan efektif rata-rata maksimum (p') pada kondisi awal dan setelah perhitungan pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku untuk mengecek pengaruh lapisan pasir padat di bawah lapisan lempung

Dari Gambar 4.7 dapat dilihat juga bahwa tegangan efektif rata-rata maksimum pada kondisi awal sebesar $23,93 \text{ kN/m}^2$ dan setelah perhitungan sebesar $24,44 \text{ kN/m}^2$. Dari hasil tersebut menunjukkan juga bahwa nilai tegangan efektif rata-rata maksimum setelah perhitungan dan pada kondisi awal tidak jauh berbeda dan selisih nilai tegangan efektif rata-rata maksimumnya kurang dari 5% sehingga lapisan pasir padat di bawah tanah lempung pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku tidak mempengaruhi dalam analisis perhitungan dan lapisan pasir padat ini tidak dimodelkan dalam pemodelan.

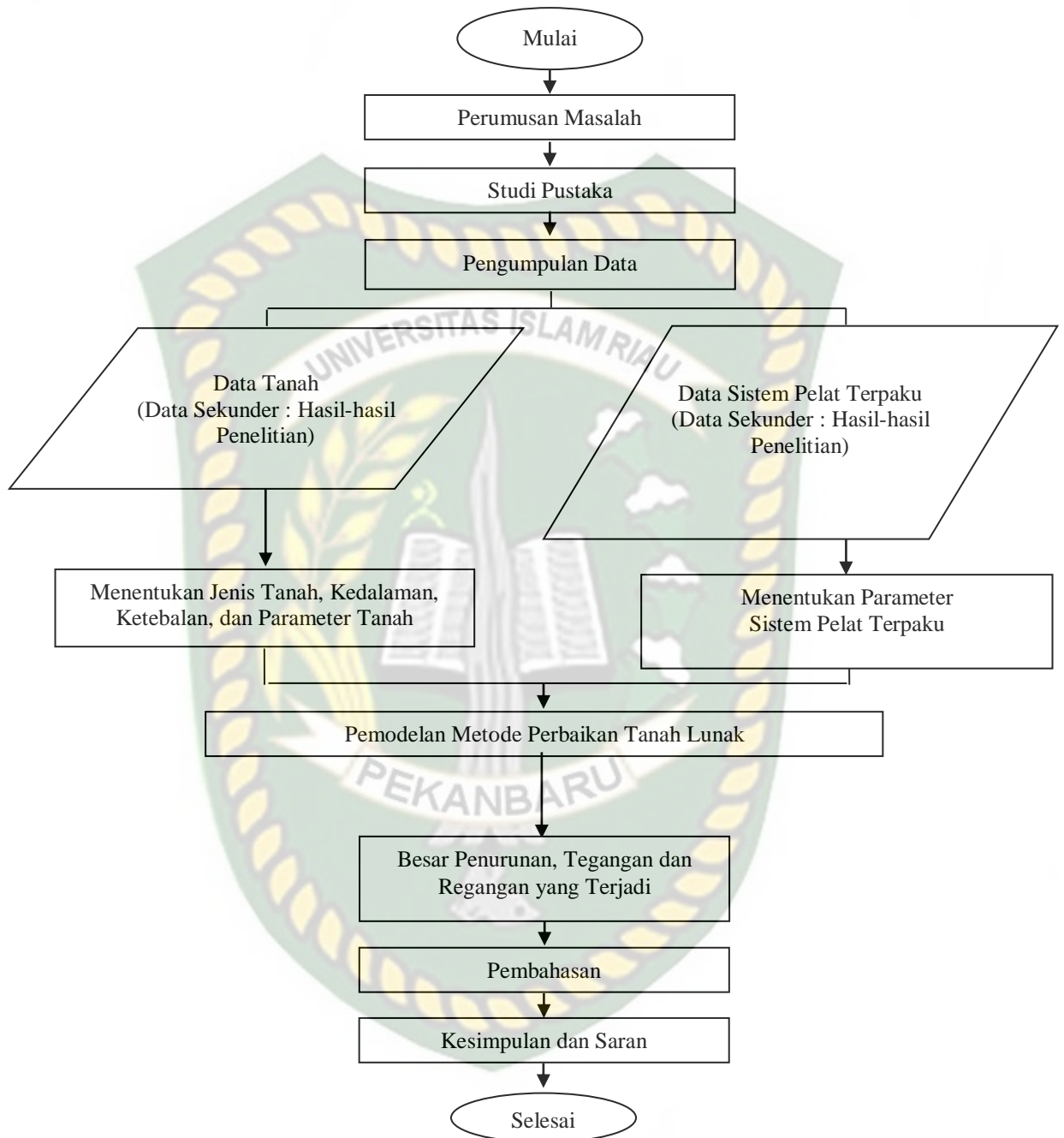
5. Analisa dan Pembahasan

Analisis yang dilakukan berupa analisis numerik dengan menggunakan software Plaxis 2D V. 8.2 dengan cara membandingkan hasil analisis dari kedua pemodelan tersebut.

6. Kesimpulan dan Saran

Tahapan penelitian dalam bentuk bagan alir seperti Gambar 4.5





Gambar 4.8 Bagan alir penelitian

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Umum

Pemodelan yang dilakukan dengan memvariasikan dua model yaitu timbunan tanpa perkuatan dan timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku. Dari hasil kalkulasi yang telah dilakukan, maka didapatkan beberapa hasil seperti penurunan, tegangan regangan yang terjadi di dalam tanah dan gaya-gaya yang bekerja pada struktur pelat terpaku.

5.2 Pemodelan

5.2.1 Parameter tanah dan parameter sistem pelat terpaku

Pada pemodelan ini parameter-parameter tanah yang digunakan dapat dilihat pada Tabel. 5.1

Tabel 5.1 Data parameter tanah

Parameter	Nama	Lempung	Pasir	Satuan	Keterangan
Model material	Model	HS	HS	-	
Jenis perilaku material	Jenis	Undrained	Drained	-	Puri (2015)
Br _t isi tanah di atas m.a.t	γ_{unsat}	15	16	kN/m ³	
Br _t isi tanah di bawah m.a.t	γ_{sat}	18	20	kN/m ³	
Permeabilitas horizontal	k_x	1.10^{-4}	1.0	m/hari	
Permeabilitas vertikal	k_y	1.10^{-4}	1.0	m/hari	
Modulus Young	E_{ref}	1000	3000	kN/m ²	
Angka Poisson	ν	0.2	0.3	-	
Kohesi	c_{ref}	5.0	1.0	kN/m ²	
Sudut geser	ϕ	27	30	-	
Sudut dilatasi	ψ	0.0	0.0	-	
Kekakuan Sekan	E_{50}^{ref}	25.000	45.000	kN/m ²	Satibi (2021)
Kekakuan Tangensial	$E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$	20.000	45.000	kN/m ²	
Kekakuan	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	65.000	135.000	kN/m ²	
Pengurangan/pembebanan	m	1.0	0.5		
Eksponen Tegangan	K_0^{nc}	0.546	0.384		
Nilai Ko Untuk Normally Consolidatet					
C_c		0.0172	0.0077		
C_s		0.0048	0.0023		

Dan parameter analisis sistem pelat terpaku dapat dilihat pada Tabel 5.2

Tabel 5.2 Data untuk Analisis Sistem Pelat Terpaku (Puri, 2015)

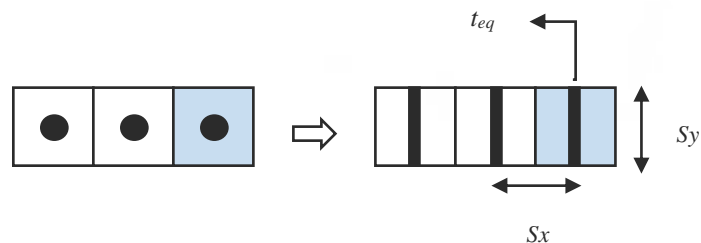
No	Parameter	Satuan	Nilai Pemodelan
1.	Material beton		
	Berat volume beton	kN/m^3	24
	Kuat tekan beton yang disyaratkan, f'_c	MPa	25
	Modulus Elastisitas beton, E_c	kN/m^2	23.500.000
2.	Angka poisson, μ	-	0,15
	Dimensi pelat beton bertulang :		
	Panjang, L	m	25
3.	Lebar, B	m	1,0
	Tebal, b	cm	15
	Dimensi tiang :		
	Panjang, L_p	m	1,5
	Diameter, d	m	0,2
	Jarak antar tiang, s	m	1,0

Tabel 5.3 Sifat-sifat Material Struktur Sistem Pelat Terpaku (Puri, 2015)

No	Parameter	Nama/symbol	Pemodelan		Sat
			Tiang	Pelat	
1.	Model material	Model	Tiang	Floor	-
2.	Perilaku material	Tipe	Linier elastic	Linier elastic	-
3.	Tebal atau diameter	d	0,2	0,15	M
4.	Berat volume	γ	24	24	kN/m^3
5.	Modulus Young	E	$2,35 \times 10^7$	$2,35 \times 10^7$	kN/m^2
6.	Modulus geser	G	$1,022 \times 10^7$	$1,022 \times 10^7$	kN/m^2
7.	Rasio Poisson	ν	0,15	0,15	-

Selanjutnya dilakukan idealisasi geometri untuk analisis plain strain seperti pada

Gambar 5.1



Gambar 5.1 Idealisasi geometri untuk analisis plain strain

Pada Gambar 5.1 dapat dilihat idealisasi geometri tiang pelat terpaku yang berbentuk bulat menjadi berbentuk dinding untuk analisis plain strain.

Tebal dinding menerus dihitung berdasarkan rasio luasan penampang tiang terhadap penampang tanah (A_c / A_E) yang dijaga konstan, (A_c / A_E) = ($t_{eq} S_y / S_x S_y$).

Diameter tiang : 0,2 m

Luas tiang : $\frac{1}{4} \times 3,14 \times 0,2^2 = 0,0314 \text{ m}^2$

Jarak antar tiang S_x : 1,0 m

Lebar S_y : 1,0 m

Luas penampang tanah : $1,0 \times 1,0 = 1,0 \text{ m}^2$

Tebal dinding ekuivalen t_{eq} : $(A_c / A_E) \times S_x = (0,0314 / 1,0) \times 1,0 = 0,0314 \text{ m}$

EA : $E (h) \cdot (b) = 2,35 \times 10^7 \times 0,0314 \times 1,0 =$

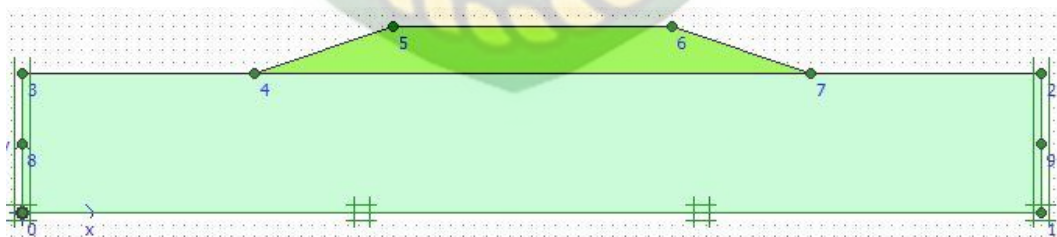
: $7,379 \times 10^5 \text{ kN/m}$

EI : $E h^3 b / 12 = (2,35 \times 10^7 \times 0,0314^3 \times 1,0) / 12$

: $60,6283 \text{ kN m}$

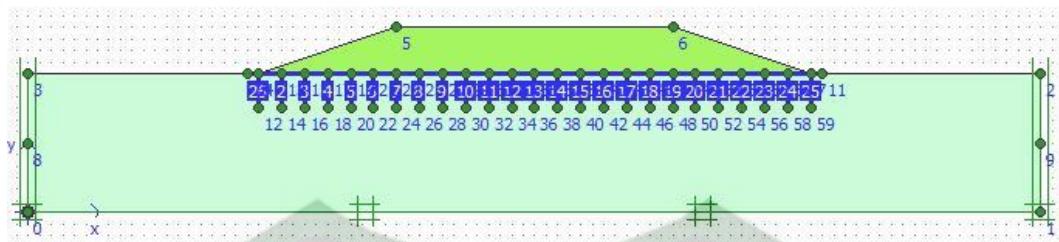
5.2.2 Gambar pemodelan

Pemodelan timbunan tanpa perkuatan dapat dilihat pada Gambar 5.2



Gambar 5.2 Pemodelan timbunan tanpa perkuatan

Sedangkan pemodelan timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku dapat dilihat pada Gambar 5.3



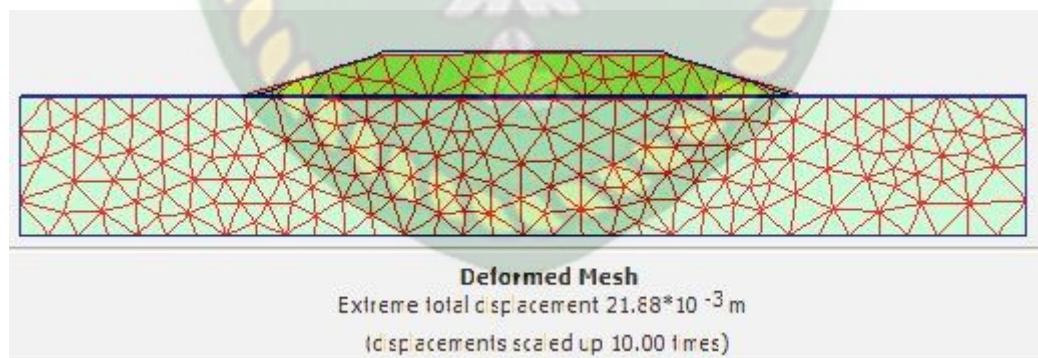
Gambar 5.3 Pemodelan timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Pada Gambar 5.2 dan Gambar 5.3 di atas dapat dilihat lapisan pasir padat di bawah tanah lempung tidak dimodelkan dalam analisis *plaxis* hal ini karena pengaruhnya yang tidak signifikan dalam analisis perhitungan sebagaimana telah dijelaskan dalam metode penelitian.

5.3 Hasil Analisa Perilaku Penurunan

5.3.1 Analisa perilaku penurunan pada timbunan tanpa perkuatan

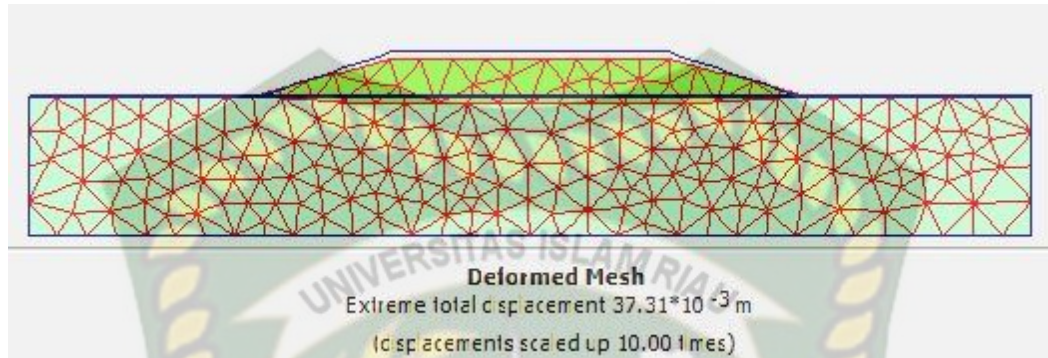
Hasil pemodelan awal yang dilakukan yaitu pemodelan tanpa adanya pelat terpaku, deformasi dan penurunan awal (segera) yang terjadi akibat timbunan di atas tanah lempung lunak tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.4



Gambar 5.4 *Deformed mesh* dan penurunan awal (segera) maksimum akibat beban timbunan pada timbunan tanpa perkuatan

Pada Gambar 5.4 terlihat deformasi dan penurunan awal (segera) maksimum akibat beban timbunan dimana U_{tot} maksimum sebesar 2,188 cm.

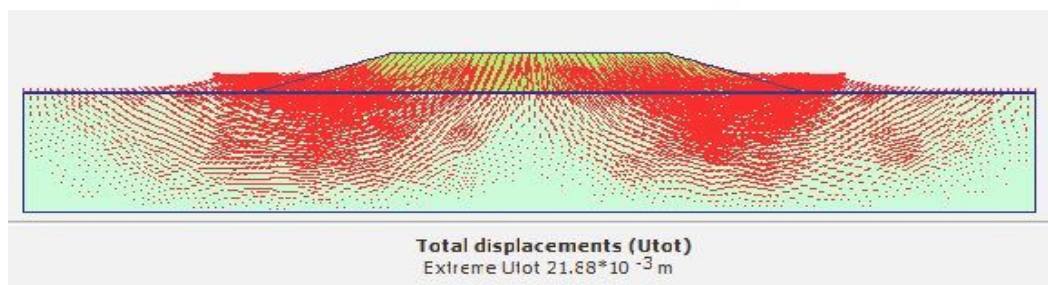
Sedangkan deformasi penurunan konsolidasi yang terjadi akibat timbunan di atas tanah lempung lunak tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.5



Gambar 5.5 *Deformed mesh* dan penurunan maksimum setelah konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan

Pada Gambar 5.5 terlihat deformasi dan penurunan maksimum setelah timbunan mengalami konsolidasi sampai dengan *zero pore water pressure* (tekanan air pori = 0) sebesar 3,731 cm.

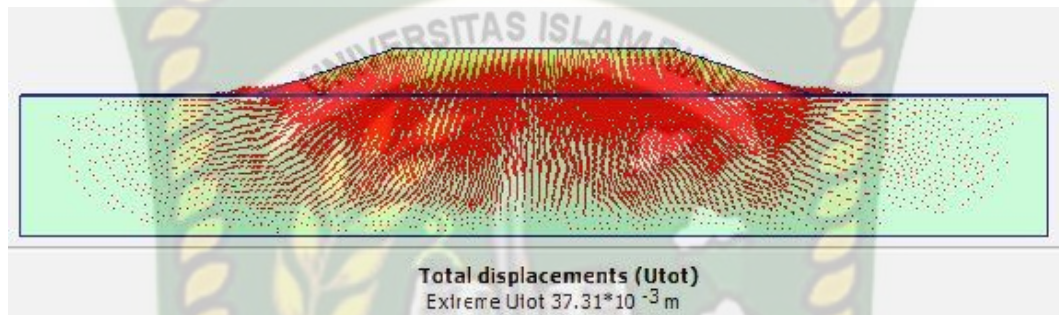
Pergerakan tanah yang terjadi akibat tanah timbunan akan secara horizontal dari beban timbunan dan vertikal ke arah atas pada daerah sekitar timbunan. Hal ini dikarenakan tanah lempung lunak di bawah timbunan tertekan secara vertikal, mengakibatkan tanah berrotasi ke arah luar timbunan dan mengangkat tanah ke arah atas. Total perpindahan yang terjadi akibat timbunan di atas tanah lunak tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.6



Gambar 5.6 Arah pergerakan dan deformasi akibat penurunan segera pada timbunan tanpa perkuatan

Pada Gambar 5.6 di atas dapat dilihat besar penurunan segera maksimum (Utot) yang terjadi akibat penurunan segera dimana Utot maksimum adalah sebesar 2,188 cm.

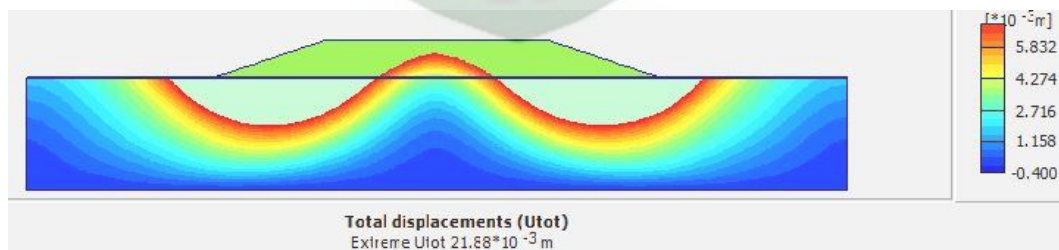
Sedangkan arah pergerakan dan total perpindahan yang terjadi akibat konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan dapat dilihat pada Gambar 5.7



Gambar 5.7. Arah pergerakan dan deformasi yang terjadi akibat konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan

Pada Gambar 5.7 dapat dilihat arah pergerakan dan besar penurunan maksimum akibat konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan dimana Utot maksimum adalah sebesar 3,731 cm.

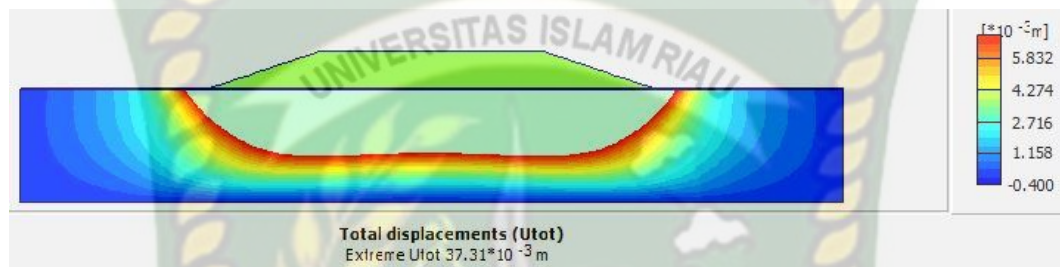
Bidang keruntuhan yang terjadi akibat timbunan dapat dilihat pada Gambar 5.8



Gambar 5.8 Bidang keruntuhan yang terjadi akibat penurunan segera pada timbunan tanpa perkuatan

Pada Gambar 5.8 di atas dapat dilihat bidang keruntuhan atau bidang longsor yang terjadi pada kondisi penurunan awal (segera) maksimum Utot akibat timbunan yang menekan ke tanah lunak di bawahnya.

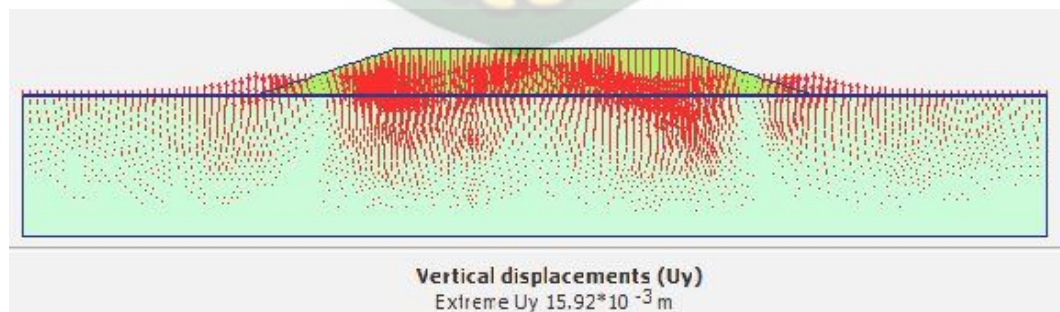
Dan bidang keruntuhan yang terjadi setelah timbunan mengalami konsolidasi dapat dilihat pada Gambar 5.9.



Gambar 5.9 Bidang keruntuhan yang terjadi akibat konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan

Pada Gambar 5.9 di atas dapat dilihat bahwa akibat konsolidasi, bidang keruntuhan pada kaki timbunan berubah dari kondisi awal sebelum terjadi konsolidasi dan dapat dilihat tidak ada lagi tekanan ke arah kaki timbunan.

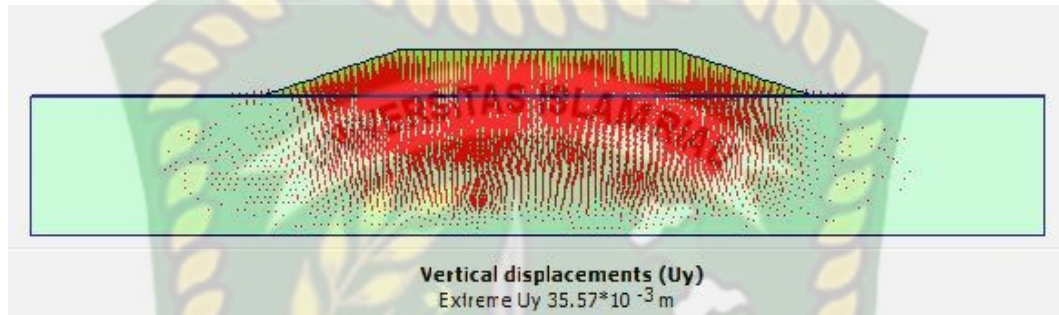
Penurunan segera arah vertikal (U_y) maksimum akibat timbunan dengan tanpa perkuatan dapat dilihat pada Gambar 5.10.



Gambar 5.10 Penurunan segera vertikal (U_y) maksimum akibat timbunan pada timbunan tanpa perkuatan

Pada Gambar 5.10 dapat dilihat besar penurunan segera vertikal (U_y) maksimum akibat timbunan pada timbunan tanpa perkuatan adalah sebesar 1,592 cm.

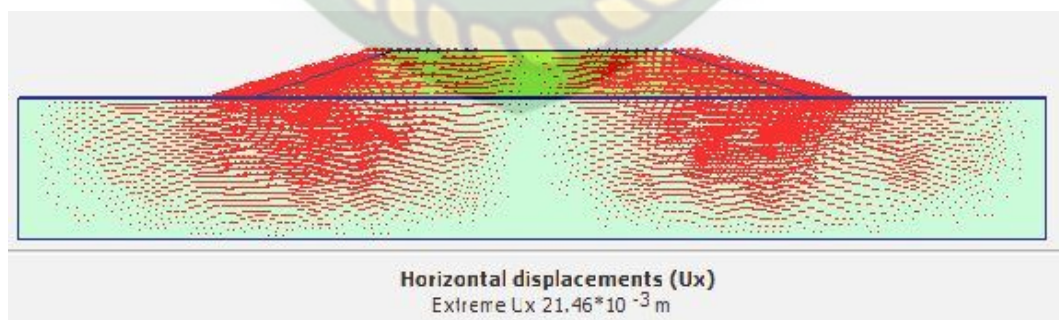
Sedangkan penurunan vertikal (U_y) maksimum akibat konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan dapat dilihat pada Gambar 5.11



Gambar 5.11 Penurunan vertikal (U_y) maksimum akibat konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan

Pada Gambar 5.11 dapat dilihat besar penurunan vertikal (U_y) maksimum akibat konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan adalah sebesar 3,557 cm.

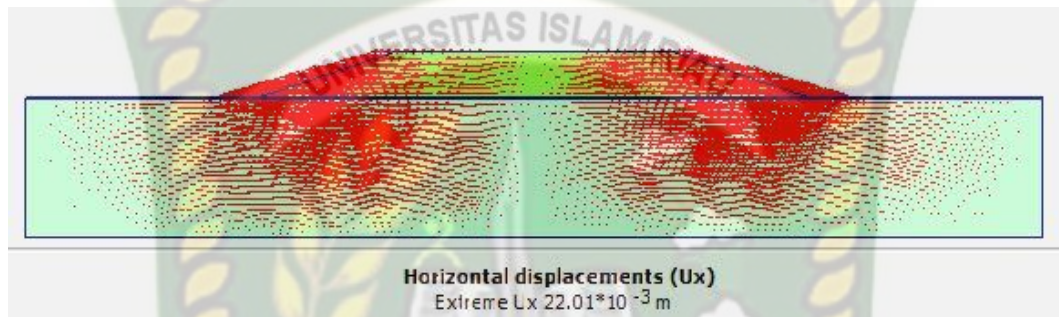
Perpindahan segera arah horizontal (U_x) maksimum akibat timbunan dengan tanpa perkuatan dapat dilihat pada Gambar 5.12.



Gambar 5.12 Perpindahan segera horizontal (U_x) maksimum akibat timbunan pada timbunan tanpa perkuatan

Pada Gambar 5.12 dapat dilihat besar perpindahan segera horizontal (U_x) maksimum akibat timbunan pada timbunan tanpa perkuatan adalah sebesar 2,146 cm.

Sedangkan perpindahan horizontal (U_x) maksimum akibat konsolidasi timbunan tanpa perkuatan dapat dilihat pada Gambar 5.13.

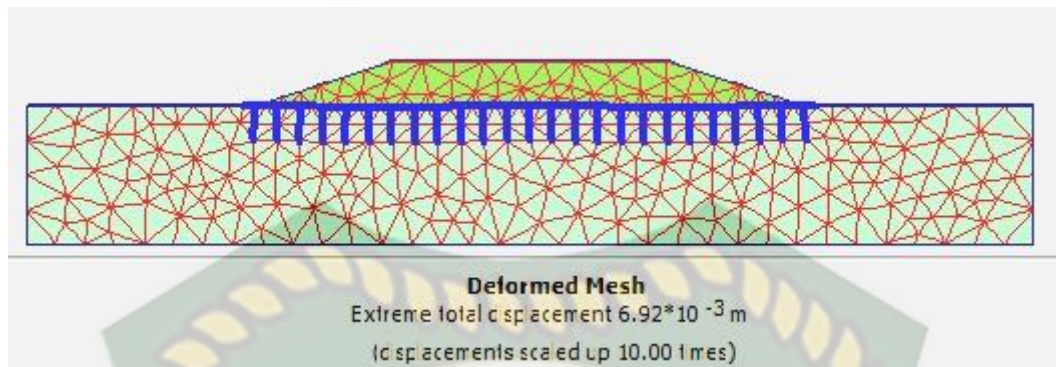


Gambar 5.13 Perpindahan horizontal (U_x) maksimum akibat konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan

Pada Gambar 5.13 dapat dilihat besar perpindahan horizontal (U_x) maksimum akibat konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan adalah sebesar 2,201 cm.

5.3.2 Analisa perilaku penurunan pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

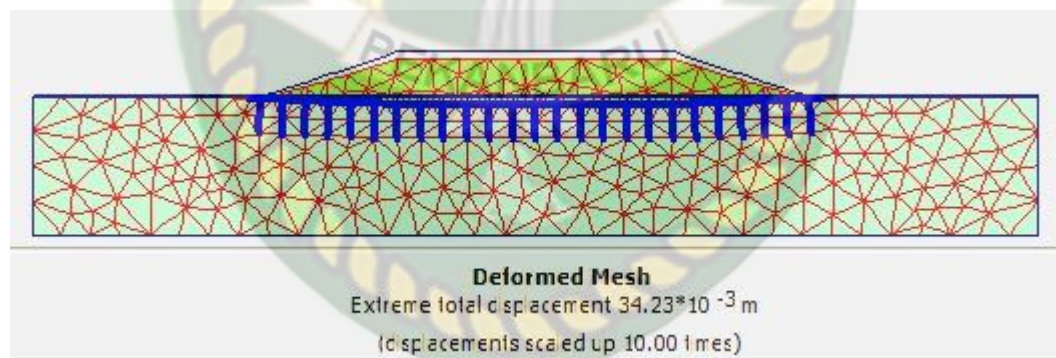
Hasil pemodelan selanjutnya yang dilakukan yaitu pemodelan timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku, deformasi dan penurunan awal (segera) yang terjadi akibat timbunan di atas tanah lempung lunak tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.14.



Gambar 5.14 *Deformed mesh* dan penurunan awal (segera) maksimum pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Pada Gambar 5.14 terlihat deformasi dan penurunan awal (segera) maksimum akibat beban timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku dimana Utot sebesar 0,692 cm.

Sedangkan defotmasi dan penurunan konsolidasi yang terjadi setelah timbunan mengalami konsolidasi dapat dilihat pada Gambar 5.15.

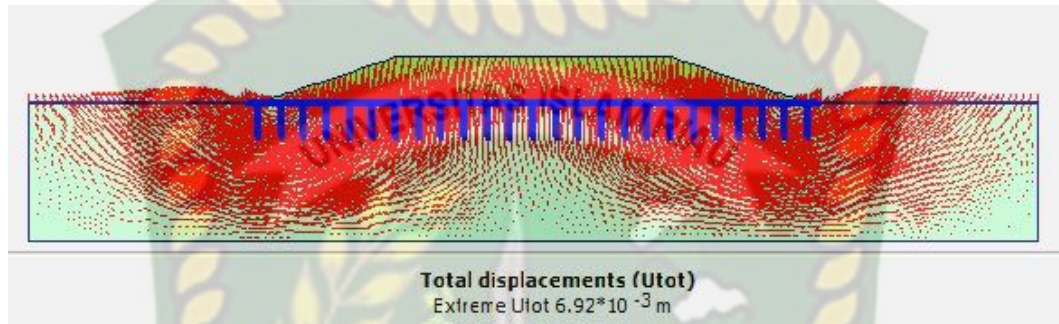


Gambar 5.15 *Deformed mesh* dan penurunan akibat konsolidasi pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Pada Gambar 5.15 terlihat deformasi dan penurunan akibat konsolidasi timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku dimana Utot sebesar 3,423 cm.

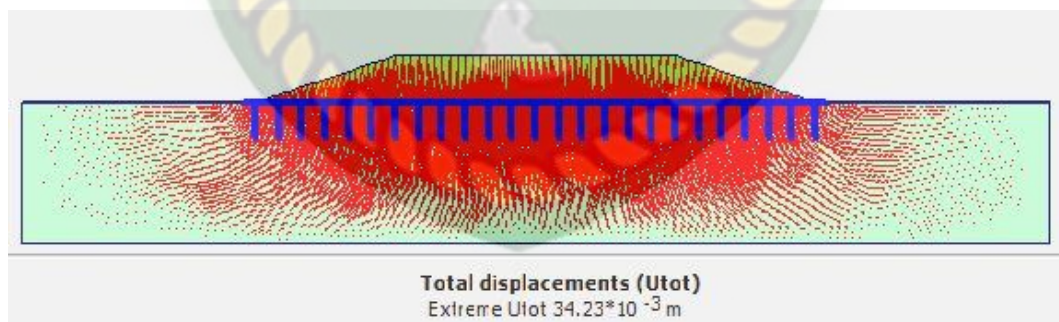
Pergerakan tanah yang terjadi akibat tanah timbunan akan secara horizontal dari beban timbunan dan vertikal ke arah atas pada daerah sekitar

timbunan. Hal ini dikarenakan tanah lempung lunak di bawah timbunan tertekan secara vertikal, mengakibatkan tanah berrotasi ke arah luar timbunan dan mengangkat tanah ke arah atas. Total perpindahan yang terjadi akibat timbunan di atas tanah lunak tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.16 dan 5.17



Gambar 5.16 Arah pergerakan dan deformasi penurunan segera yang terjadi akibat timbunan pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

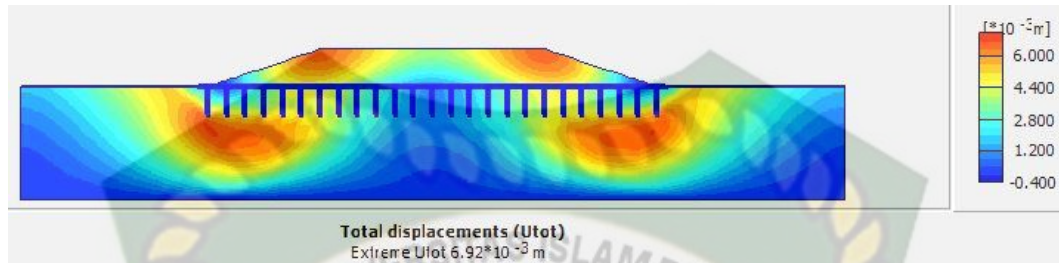
Pada Gambar 5.16 di atas dapat dilihat arah pergerakan dan besar penurunan segera maksimum yang terjadi akibat beban timbunan pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku dimana Utot adalah sebesar 0,692 cm



Gambar 5.17. Arah pergerakan dan deformasi penurunan yang terjadi akibat konsolidasi pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

dan pada Gambar 5.17 dapat dilihat arah pergerakan dan besar penurunan konsolidasi Utot maksimum yang terjadi pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku dimana Utot adalah sebesar 3,423 cm.

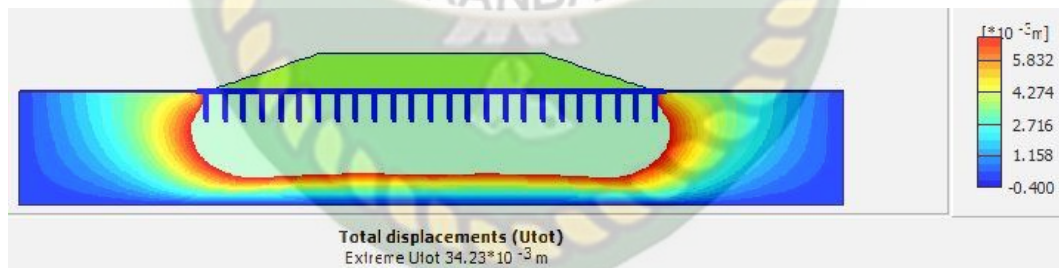
Bidang keruntuhan yang terjadi akibat timbunan dapat dilihat pada Gambar 5.18.



Gambar 5.18 Bidang keruntuhan yang terjadi akibat penurunan segera dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Pada Gambar 5.18 di atas dapat dilihat bidang keruntuhan atau bidang longsor yang terjadi pada kondisi penurunan awal (segera) akibat timbunan yang menekan ke tanah lunak dibawahnya.

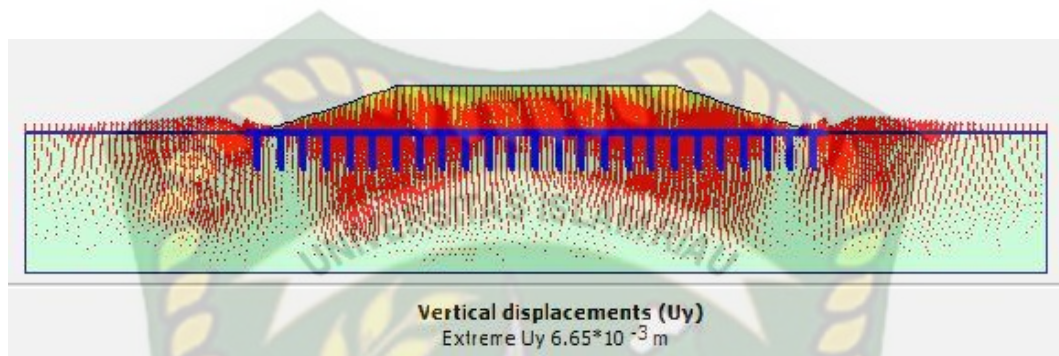
Dan bidang keruntuhan yang terjadi setelah timbunan mengalami konsolidasi dapat dilihat pada Gambar 5.19.



Gambar 5.19 Bidang keruntuhan yang terjadi akibat konsolidasi dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Pada Gambar 5.19 di atas dapat dilihat bahwa akibat konsolidasi, bidang keruntuhan pada kaki timbunan berubah dari kondisi awal sebelum terjadi konsolidasi.

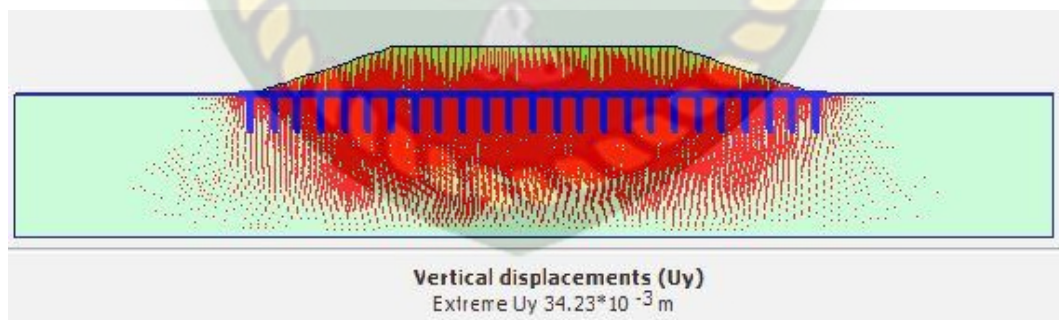
Penurunan segera arah vertikal (U_y) maksimum akibat timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku dapat dilihat pada Gambar 5.20.



Gambar 5.20 Penurunan segera vertikal (U_y) maksimum timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Pada Gambar 5.20 dapat dilihat besar penurunan segera vertikal (U_y) maksimum timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku adalah sebesar 0,665 cm.

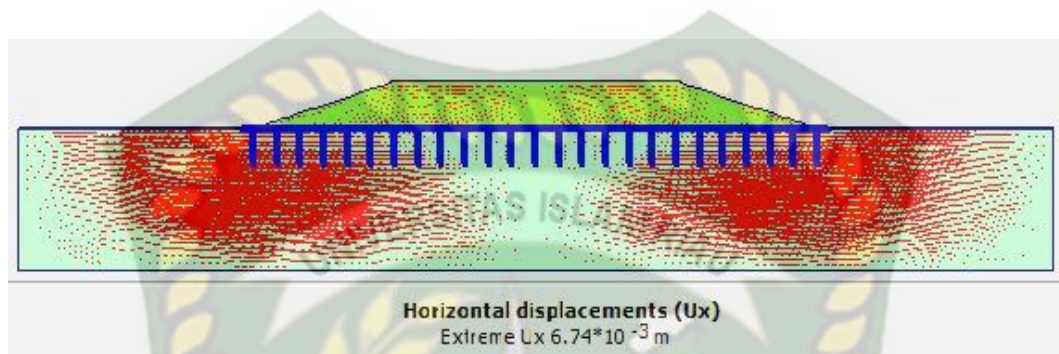
Sedangkan penurunan vertikal (U_y) maksimum akibat konsolidasi timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku dapat dilihat pada Gambar 5.21



Gambar 5.21 Penurunan vertikal (U_y) maksimum akibat konsolidasi timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Pada Gambar 5.21 dapat dilihat besar penurunan vertikal (U_y) maksimum akibat konsolidasi timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku adalah sebesar 3,423 cm.

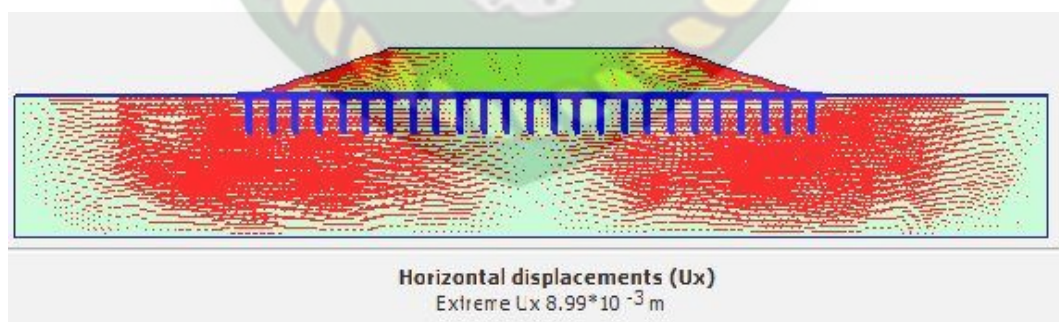
Perpindahan segera arah horizontal (U_x) maksimum akibat timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku dapat dilihat pada Gambar 5.22.



Gambar 5.22 Perpindahan segera horizontal (U_x) maksimum akibat timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Pada Gambar 5.22 dapat dilihat besar perpindahan segera horizontal (U_x) maksimum akibat timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku adalah sebesar 0,674 cm.

Sedangkan perpindahan horizontal (U_x) maksimum akibat konsolidasi dengan perkuatan sistem pelat terpaku dapat dilihat pada Gambar 5.23.



Gambar 5.23 Perpindahan horizontal (U_x) maksimum akibat konsolidasi timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Pada Gambar 5.23 dapat dilihat besar perpindahan horizontal (U_x) maksimum akibat konsolidasi dengan perkuatan sistem pelat terpaku adalah sebesar 0,869 cm.

5.3.3 Analisa perbandingan perilaku penurunan pada timbunan tanpa perkuatan dan timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

5.3.3.a Perbandingan penurunan total maksimum (U_{tot}), penurunan vertikal maksimum (U_y) dan perpindahan horizontal maksimum (U_x)

Dari hasil analisis numerik perilaku penurunan total maksimum (U_{tot}), penurunan vertikal maksimum (U_y) dan perpindahan horizontal maksimum (U_x) seperti di atas dapat dibandingkan nilai penurunan dan perpindahan seperti pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4 Perbandingan penurunan total maksimum (U_{tot}), penurunan vertikal maksimum (U_y) dan perpindahan horizontal maksimum (U_x)

Penurunan/ Perpindahan	Tanpa Perkuatan			Dengan Perkuatan Sistem Perkuatan Pelat Terpaku		
	Utot (cm)	Uy (cm)	Ux (cm)	Utot (cm)	Uy (cm)	Ux (cm)
Segera	2,188	1,592	2,146	0,692	0,665	0,674
Konsolidasi	3,731	3,557	2,201	3,423	3,423	0,899
Total	5,919	5,149	4,347	4,115	4,088	1,573

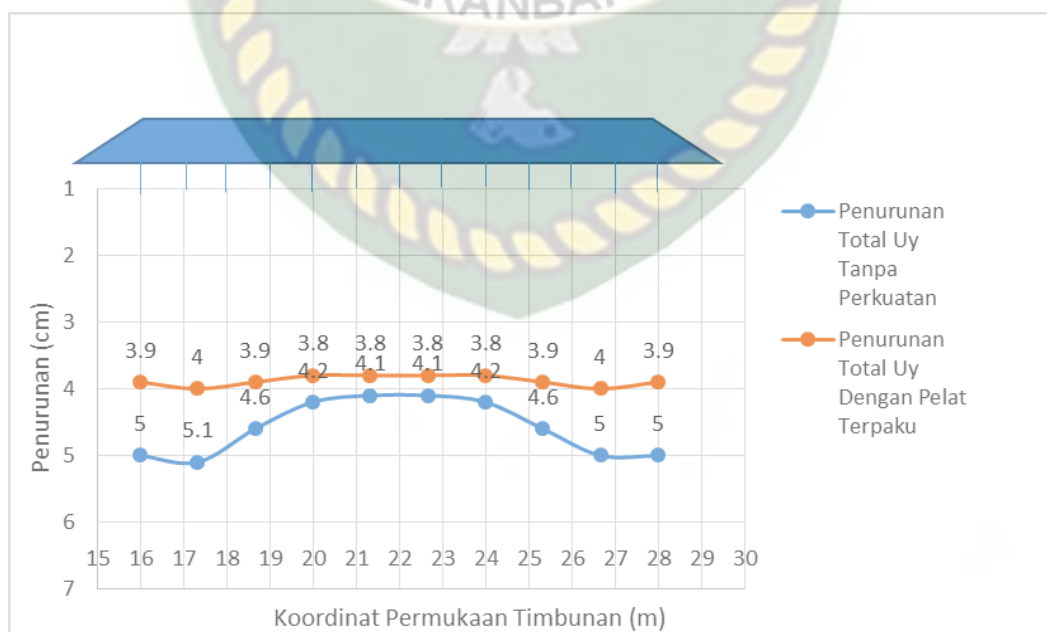
Dari Tabel 5.4 dapat dilihat perbandingan penurunan maksimum U_{tot} , U_y dan perpindahan maksimum U_x dimana pada timbunan tanpa perkuatan U_{tot} maks 5,919 cm, U_y maks 5,149 cm dan U_x maks 4,347 cm sedangkan pada perkuatan

sistem pelat terpaku Utot maks 4,115 cm, Uy maks 4,088 cm dan Ux maks 1,573 cm.

Dari hasil di atas menunjukkan bahwa terjadi reduksi penurunan Utot maks, Uy maks dan reduksi perpindahan Ux maks pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku dibandingkan dengan tanpa perkuatan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pelat terpaku mampu menahan dan mendistribusikan beban timbunan yang diterima kepada pelat dan paku-paku atau tiang-tiang dibawahnya. Interaksi yang terjadi antara pelat-tiang-tanah dasar menyebabkan penurunan dapat direduksi.

5.3.3.b Perbandingan Penurunan Vertikal (Uy)

Dari hasil perhitungan analisis numerik plaxis dilakukan analisa perbandingan penurunan yang ditinjau sepanjang permukaan timbunan seperti pada Gambar 5.24



Gambar 5.24 Perbandingan perilaku penurunan total (Uy) di permukaan timbunan tanpa perkuatan dan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Pada Gambar 5.24 dapat dilihat perbandingan perilaku penurunan total (penurunan segera + penurunan konsolidasi) yang terjadi dari kedua pemodelan. Perilaku penurunan total U_y yang terjadi pada permukaan timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku menghasilkan penurunan yang lebih kecil, dan *differential settlement* yang lebih kecil dan lebih seragam dibandingkan dengan tanpa perkuatan. Hal ini disebabkan karena terjadinya kekakuan komposit antara tiang-pelat-tanah di antara tiang yang mampu mendukung dan mendistribusikan beban yang diterima yang semula didukung oleh butir-butir tanah dan akibatnya tegangan yang terjadi di bawah pelat menjadi lebih merata dan seragam sehingga penurunan yang terjadi menjadi lebih seragam atau *differential settlement* menjadi lebih kecil. Hal ini dibuktikan berdasarkan analisis numeris dengan adanya perkuatan sistem pelat terpaku terjadi reduksi penurunan total vertikal (U_y) sebesar 22,00% dan penurunan yang terjadi menjadi lebih seragam dimana ΔS hanya sebesar 0,2 cm. Hal ini sejalan dengan (Hardiyatmo, 2008) yang menyatakan bahwa sistem pelat terpaku cocok untuk perkerasan yang tanah dasarnya dipengaruhi oleh penurunan tidak seragam karena interaksi tanah-tiang-pelat membuat pelat lebih kaku sehingga mengurangi terjadinya beda penurunan permukaan perkerasan (menciptakan permukaan perkerasan beton yang selalu rata).

Pada Gambar 5.24 dapat dilihat juga pada timbunan tanpa perkuatan penurunan yang terjadi pada bagian ujung timbunan lebih besar dibandingkan pada bagian tengah timbunan hal ini disebabkan karena efek resultan dari

deformasi horizontal yang relatif lebih besar dan deformasi vertikal yang hampir sama sehingga totalnya menjadi lebih besar.

Tabel 5.5 Hasil perhitungan numerik deformasi vertikal (U_y) timbunan tanpa perkuatan dan timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

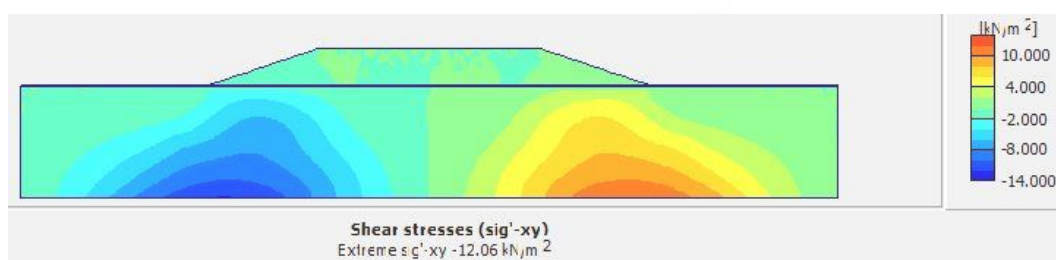
Koordinat		Timbunan Tanpa Perkuatan			Timb. Dg Perkuatan Pelat Terpaku			Reduksi	
X	y	Penurunan Segera	Penurunan Konsolidasi	Penurunan Total	Penurunan Segera	Penurunan Konsolidasi	Penurunan Total	Penurunan Total	
		U_y (M)	U_y (M)	U_y (M)	U_y (M)	U_y (M)	U_y (M)	U_y (M)	U_y %
16.000	8.00	0.016	0.034	0.050	0.007	0.032	0.039	0.011	22.00
17.333	8.00	0.015	0.036	0.051	0.006	0.034	0.040	0.011	21.57
18.667	8.00	0.012	0.034	0.046	0.005	0.034	0.039	0.007	15.22
20.000	8.00	0.010	0.032	0.042	0.004	0.034	0.038	0.004	9.52
21.333	8.00	0.009	0.032	0.041	0.004	0.034	0.038	0.003	7.32
22.667	8.00	0.009	0.032	0.041	0.004	0.034	0.038	0.003	7.32
24.000	8.00	0.010	0.032	0.042	0.004	0.034	0.038	0.004	9.52
25.333	8.00	0.012	0.034	0.046	0.005	0.034	0.039	0.007	15.22
26.667	8.00	0.015	0.035	0.050	0.006	0.034	0.040	0.010	20.00
28.000	8.00	0.016	0.034	0.050	0.007	0.032	0.039	0.011	22.00

Pada Tabel 5.5 dapat dilihat hasil analisis numerik perbandingan perilaku penurunan segera, penurunan konsolidasi dan penurunan total dari pemodelan timbunan tanpa perkuatan dan timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku.

5.4 Hasil Analisa Tegangan – Regangan Dalam Tanah

5.4.1 Analisa tegangan – regangan pada timbunan tanpa perkuatan

Tegangan geser maksimum yang terjadi di dalam tanah lempung lunak pada kondisi awal / segera dapat dilihat pada Gambar 5.25.



Gambar 5.25 Tegangan geser maksimum pada tanah lempung akibat timbunan pada timbunan tanpa perkuatan

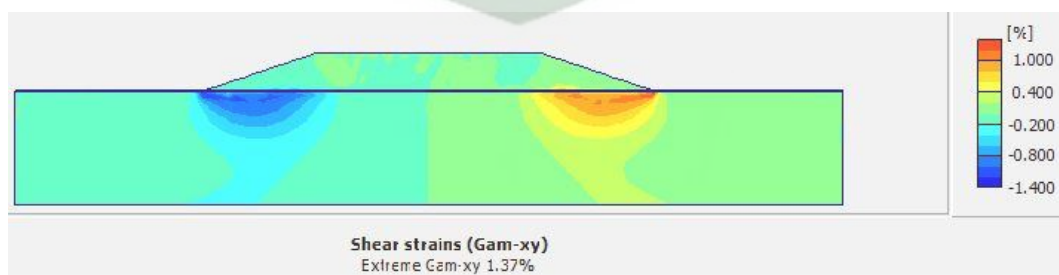
Dari Gambar 5.25 dapat dilihat tegangan geser maksimum yang terjadi pada tanah lempung di bawah kaki timbunan akibat timbunan pada timbunan tanpa perkuatan dimana tegangan geser maksimum yang terjadi yaitu sebesar 12,06 kN/m². Dan tegangan geser maksimum yang terjadi di dalam tanah lempung lunak pada kondisi konsolidasi dapat dilihat pada Gambar 5.26.



Gambar 5.26 Tegangan geser maksimum pada tanah lempung akibat konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan

Dari Gambar 5.26 dapat dilihat tegangan geser maksimum yang terjadi pada tanah lempung di bawah kaki timbunan akibat konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan dimana tegangan geser maksimum yang terjadi yaitu sebesar 8,40 kN/m².

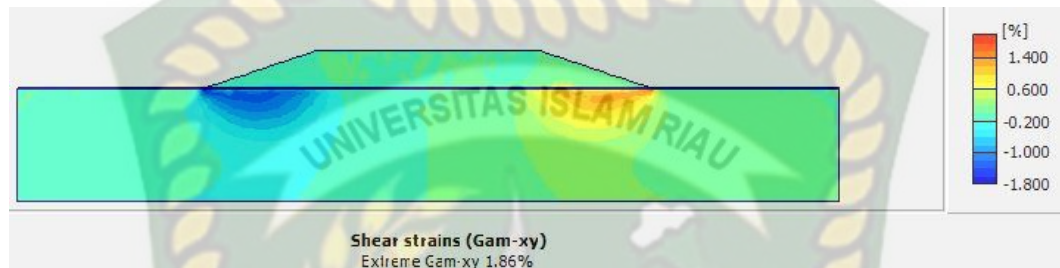
Sedangkan regangan geser yang terjadi di dalam tanah lempung lunak pada kondisi awal atau segera dapat dilihat pada Gambar 5.27.



Gambar 5.27 Regangan geser maksimum pada tanah lempung akibat timbunan pada timbunan tanpa perkuatan

Pada Gambar 5.27 dapat dilihat regangan geser maksimum yang terjadi pada tanah lempung dimana regangan geser yang terjadi yaitu sebesar 1,37 %.

Dan regangan geser maksimum yang terjadi di dalam tanah lempung lunak pada kondisi konsolidasi dapat dilihat pada Gambar 5.28.

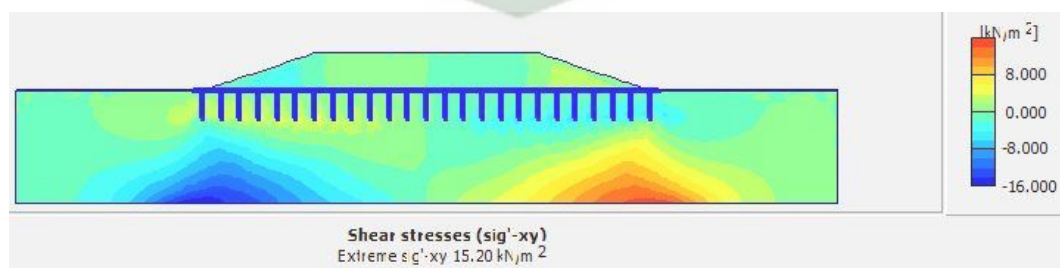


Gambar 5.28 Regangan geser maksimum pada tanah lempung akibat konsolidasi pada timbunan tanpa perkuatan

Pada Gambar 5.27 dapat dilihat regangan geser maksimum yang terjadi pada tanah lempung dimana regangan geser yang terjadi yaitu sebesar 1,86 %.

5.4.2 Analisa tegangan – regangan pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

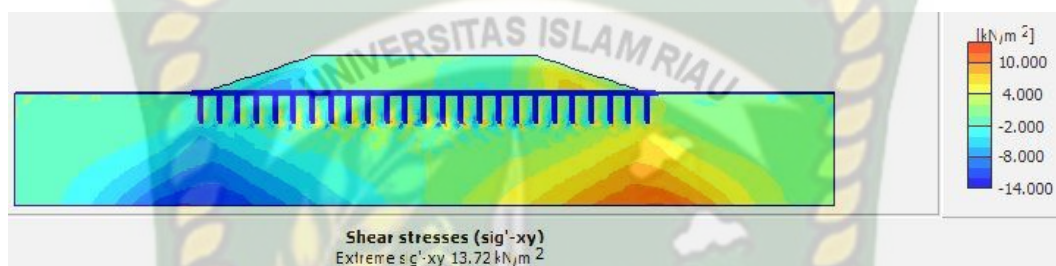
Tegangan geser yang terjadi di dalam tanah lempung lunak pada kondisi awal / segera dengan perkuatan sistem pelat terpaku dapat dilihat pada Gambar 5.29.



Gambar 5.29 Tegangan geser maksimum pada tanah lempung akibat timbunan pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Dari Gambar 5.29 dapat dilihat tegangan geser maksimum yang terjadi pada tanah lempung akibat timbunan di dimana tegangan geser yang terjadi yaitu sebesar 15,20 kN/m².

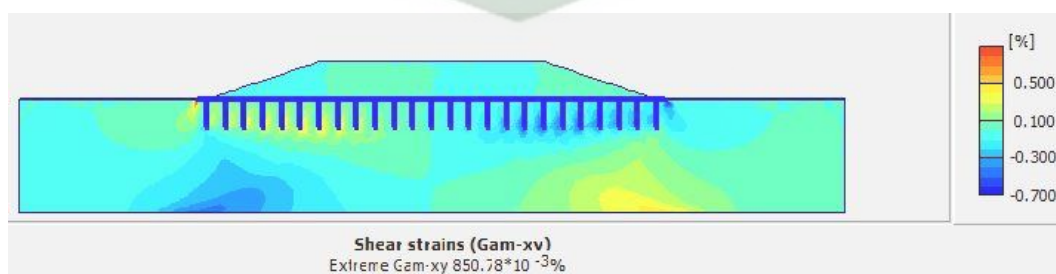
Dan tegangan geser maksimum yang terjadi di dalam tanah lempung lunak pada kondisi konsolidasi dapat dilihat pada Gambar 5.30.



Gambar 5.30 Tegangan geser maksimum pada tanah lempung akibat konsolidasi pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

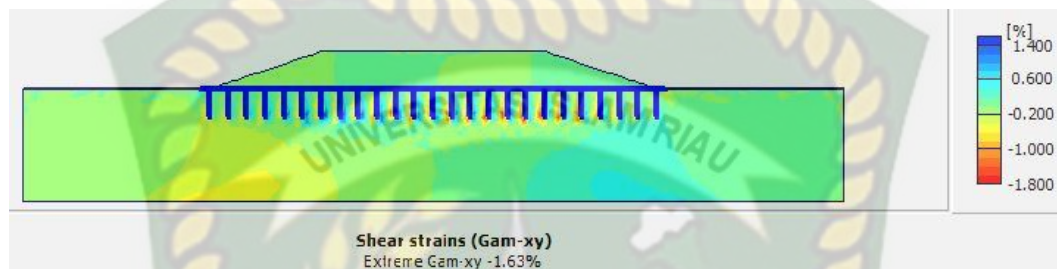
Dari Gambar 5.30 dapat dilihat tegangan geser maksimum yang terjadi pada tanah lempung akibat kondisi konsolidasi dimana tegangan geser maksimum yang terjadi yaitu sebesar 13,72 kN/m².

Sedangkan regangan geser yang terjadi di dalam tanah lempung lunak pada kondisi awal / segera dengan perkuatan sistem pelat terpaku dapat dilihat pada Gambar 5.31.



Gambar 5.31 Regangan geser maksimum pada tanah lempung akibat timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Pada Gambar 5.31 dapat dilihat regangan geser yang terjadi pada tanah lempung akibat beban timbunan dimana regangan geser yang terjadi yaitu sebesar 0,851 %. Dan regangan geser maksimum yang terjadi di dalam tanah lempung lunak pada kondisi konsolidasi dapat dilihat pada Gambar 5.32.



Gambar 5.32 Regangan geser maksimum pada tanah lempung akibat konsolidasi pada timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Pada Gambar 5.32 dapat dilihat regangan geser maksimum yang terjadi pada tanah lempung akibat konsolidasi dimana regangan geser yang terjadi yaitu sebesar 1,63 %.

5.4.3 Analisa perbandingan tegangan – regangan pada timbunan tanpa perkuatan dan timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

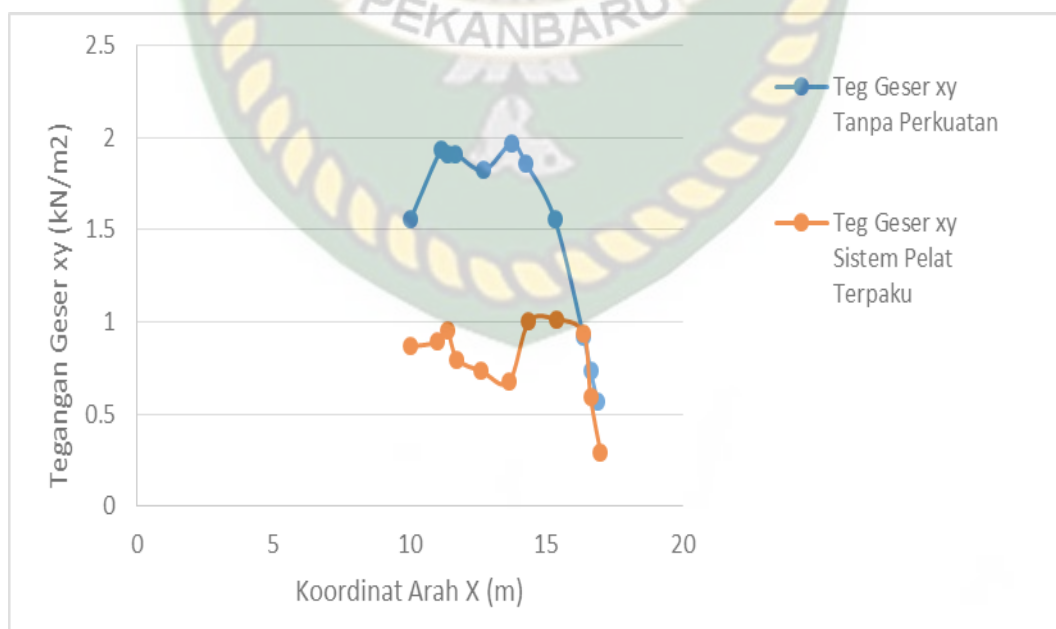
Dari hasil analisis perhitungan numerik tegangan – regangan di atas dapat dibuat perbandingan tegangan – regangan yang terjadi pada timbunan tanpa perkuatan dan dengan perkuatan sistem pelat terpaku seperti pada Tabel 5.6.

Tabel 5.6 Perbandingan tegangan – regangan pada timbunan tanpa perkuatan dan timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Kondisi	Tanpa Perkuatan		Dengan Perkuatan Sistem Pelat Terpaku	
	Tegangan Geser Maksimum xy (kN/m ²)	Regangan Geser Maksimum xy (%)	Tegangan Geser Maksimum xy (kN/m ²)	Regangan Geser Maksimum xy (%)
Segera	12,06	1,37	15,20	0,851
Konsolidasi	8,40	1,86	13,72	1,630
Total	20,46	3,23	28,92	2,481

Dari Tabel 5.6 dapat dilihat bahwa dengan perkuatan sistem pelat terpaku memberikan hasil tegangan geser maksimum total lebih besar dan regangan geser maksimum total yang lebih kecil dibandingkan tanpa perkuatan.

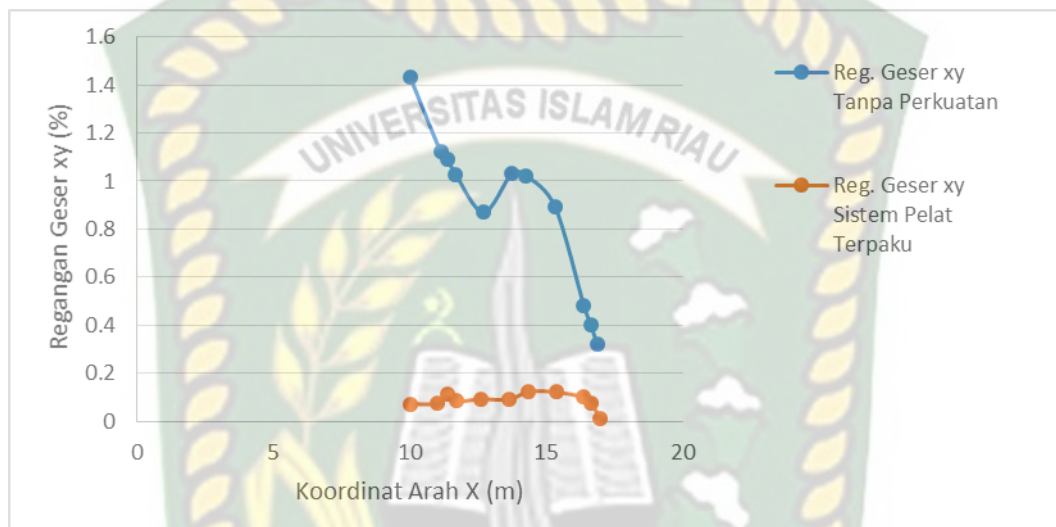
Selanjutnya ditinjau perilaku tegangan dan regangan 20 cm di bawah sistem pelat terpaku. Perilaku tegangan geser sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.33.



Gambar 5.33 Perbandingan perilaku tegangan 20 cm di bawah sistem pelat terpaku pada timbunan tanpa perkuatan dan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Pada Gambar 5.33 dapat dilihat bahwa tegangan geser-xy yang terjadi pada titik 20 cm di bawah sistem pelat terpaku lebih kecil dibandingkan dengan tanpa perkuatan.

Sedangkan perilaku regangan geser sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.34.



Gambar 5.34 Perbandingan perilaku regangan pada 20 cm di bawah sistem pelat terpaku pada timbunan tanpa perkuatan dan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Pada Gambar 5.34 dapat dilihat bahwa regangan geser-xy yang terjadi pada titik 20 cm di bawah sistem pelat terpaku lebih kecil dibandingkan dengan tanpa perkuatan.

Dari Gambar 5.33 dan Gambar 5.34 menunjukkan bahwa dengan sistem pelat terpaku tegangan dan regangan geser yang terjadi pada 20 cm di bawah sistem pelat terpaku lebih kecil dibandingkan dengan tanpa perkuatan. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi interaksi antara tiang-pelat-tanah lempung yang menciptakan kekakuan yang mampu menahan beban yang bekerja sehingga tegangan geser dan regangan geser dalam tanah lempung lunak pada titik 20 cm di bawah sistem pelat terpaku dapat direduksi dan menjadi lebih kecil dibandingkan

dengan tanpa perkuatan dan akibatnya penurunan yang terjadi akibat beban timbunan dapat direduksi. Disamping itu juga luas permukaan menjadi lebih besar dengan adanya pelat sehingga tegangan yang terjadi akibat beban menjadi lebih kecil. Hal ini sejalan dengan (Hardiyatmo, 2008) yang menyatakan naik-turunnya tanah dasar tereduksi oleh kekakuan yang diciptakan oleh interaksi antara pelat beton, tiang-tiang dan tanah dalam zona terkurung tiang-tiang.

Tabel 5.7 Perbandingan perilaku tegangan - regangan 20 cm di bawah sistem pelat terpaku pada timbunan tanpa perkuatan dan timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku

Koordinat			Tanpa Perkuatan				Dengan Pelat Terpaku			
x	x	y	Tegangan		Regangan		Tegangan		Regangan	
Tanpa Perkuatan	Pelat Terpaku		Segera (kN/M ²)	Konsolidasi (kN/M ²)	Segera (%)	Konsolidasi (%)	Segera (kN/M ²)	Konsolidasi (kN/M ²)	Segera (%)	Konsolidasi (%)
10.014	10.00	5.804	1.554	1.729	1.432	1.474	0.866	1.494	0.072	0.075
11.13	11.00	5.804	1.931	3.732	1.123	1.395	0.891	1.22	0.073	0.17
11.38	11.37	5.804	1.906	3.951	1.09	1.411	0.954	1.828	0.11	0.095
11.68	11.74	5.804	1.912	4.038	1.028	1.341	0.797	1.515	0.083	0.01
12.71	12.63	5.804	1.823	3.911	0.87	1.144	0.733	2.151	0.092	0.014
13.73	13.63	5.804	1.968	3.316	1.03	1.21	0.673	1.833	0.09	0.022
14.26	14.37	5.804	1.859	2.855	1.022	1.195	1.001	1.189	0.123	0.142
15.33	15.37	5.804	1.554	1.91	0.894	1.036	1.015	0.701	0.121	0.163
16.39	16.37	5.804	0.916	0.946	0.482	0.555	0.939	0.613	0.1	0.182
16.64	16.63	5.804	0.732	0.784	0.4	0.503	0.591	1.614	0.077	0.009
16.87	17.00	5.804	0.57	0.714	0.323	0.381	0.292	0.156	0.011	0.655

Pada Tabel 5.7 dapat dilihat bahwa dengan sistem pelat terpaku tegangan dan regangan geser 20 cm di bawah sistem pelat terpaku lebih kecil dibandingkan dengan tanpa perkuatan. Hal ini disebabkan pada saat menerima beban terjadi interaksi antara tiang-pelat-tanah lempung yang menahan beban sehingga

tegangan geser dan regangan geser dalam tanah lempung lunak pada titik 20 cm di bawah sistem pelat terpaku dapat direduksi dan menjadi lebih kecil dibandingkan dengan tanpa perkuatan sehingga penurunan yang terjadi akibat beban timbunan dapat direduksi.



Dokumen ini adalah Arsip Miik :

Perpustakaan Universitas Islam Riau



Dokumen ini adalah Arsip Miik :

Perpustakaan Universitas Islam Riau



Dokumen ini adalah Arsip Miik :

Perpustakaan Universitas Islam Riau

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan penelitian dan pembahasan dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu :

1. Penelitian memperlihatkan bahwa timbunan dengan perkuatan sistem pelat terpaku memberikan kontribusi dalam mereduksi penurunan yang terjadi pada tanah dasar.
2. Hasil hitungan numerik memperlihatkan bahwa terjadi reduksi penurunan pada tanah dasar dengan menggunakan perkuatan sistem pelat terpaku dimana dengan sistem pelat terpaku nilai U_{tot} maks sebesar 4,115 cm U_y maks sebesar 4,088 cm dan U_x maks sebesar 1,573 cm sedangkan dengan tanpa perkuatan nilai U_{tot} maks sebesar 5,919 cm, U_y maks sebesar 5,149 cm dan U_x maks sebesar 4,347 cm. Nilai reduksi penurunan total (U_y) pada permukaan timbunan yang paling besar adalah sebesar 22% dan penurunan yang terjadi juga menjadi lebih seragam ΔS sebesar 0,2 cm
3. Hasil hitungan numerik juga memperlihatkan bahwa tegangan dan regangan dalam tanah dasar pada 20 cm di bawah sistem pelat terpaku lebih kecil dengan menggunakan perkuatan sistem pelat terpaku dibandingkan dengan tanpa perkuatan. Hal ini menunjukkan terjadi interaksi antara tiang-pelat-tanah dasar (lempung) yang menciptakan kekakuan sehingga mampu menahan beban dan

juga adanya zona tanah yang terkurung tiang-tiang sehingga tegangan geser dan regangan geser dalam tanah dasar berkurang dan akibatnya penurunan yang terjadi akibat beban timbunan dapat direduksi.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dapat disarankan sebagai berikut :

1. Penelitian ini dapat dikembangkan lagi dengan memvariasikan tinggi timbunan, panjang tiang pada pelat terpaku dan jarak antar tiang pada pelat terpaku.
2. Penelitian ini juga dapat dikembangkan lagi dengan perkuatan yang berbeda dan dibandingkan dengan perkuatan sistem pelat terpaku.
3. Hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai salah satu rekomendasi untuk mengatasi permasalahan pada tanah lunak bagi praktisi dalam bidang konstruksi jalan

DAFTAR PUSTAKA

- Arsyad, A., Samang, L., Yusmin, A., Hamid, W., Ibrahim, F. (2014), “ *Studi Pengambilan Keputusan Akan Metode Perkuatan Timbunan Badan Jalan Di Atas Deposisi Tanah Lunak Dengan Menggunakan Pemodelan Elemen Hingga Dan Assesment Kegagalan Berbasis Teori Peluang*”, Kolokium Jalan dan Jembatan 2014
- Bowles, Joseph E.(1992), “*Analisis dan Desain Pondasi*” Edisi Keempat, Jakarta; Penerbit Erlangga.
- Das, B.M (2002), " *Principles of Foundation Engineering*", Fifth Edition, Boston : PWS-KENT Publishing Company.
- Das, B.M, (1995), " *Mekanika Tanah I*", Edisi Keempat, Jakarta : Penerbit Erlangga." *Principles of Geotechnical Engineering*", Alih Bahasa : Mochtar, N.E, Mochtar, I.B, Fakultas Teknik Sipil ITS
- Firdaus, W, “ *Studi Perilaku Tiang Pancang Kelompok Menggunakan Plaxis 2D Pada Tanah Lunak (Very Soft Soil- Soft Soil)*”, Tugas Akhir Teknik Sipil FTSP-ITS
- Fadliansyah (2017), “ *Analisis Penurunan Timbunan Pada Tanah Lunak Dengan Sistem Preloading dan Prefabricated Vertical Drain Di Runway Bandara Kualanamu*”, Tesis, Program Pasca Sarjana Teknik Sipil Universitas Sumatra Utara, Medan
- Hardiyatmo, H.C (2006), " *Mekanika Tanah 1 & Mekanika Tanah II* ", Yogyakarta : Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H.C (2002), " *Teknik Fondasi 1* ", Edisi Kedua, Yogyakarta : Beta Offset.
- Hardiyatmo, H.C (2014), " *Tanah Ekspansif Permasalahan dan Penanganan*", Yogyakarta : Gadjah Mada University Press
- Helmisyah (2019), “ *Perilaku Perkerasan Sistem Pelat Terpaku Dengan Variasi Panjang, Jarak Dan Jumlah Baris Tiang Pada Tanah Gambut Akibat Beban Tekan (Beban Sentris dan Tepi Pelat)* ” , Tesis, Program Pasca Sarjana Teknik Sipil Universitas Islam Riau, Pekanbaru
- Martius (2019), “ *Studi Eksperimental Perkerasan Sistem Pelat Terpaku Pada Tanah Timbunan Di Atas Tanah Gambut Dengan Panjang Tiang Berbeda* ” , Tesis, Program Pasca Sarjana Universitas Islam Riau, Pekanbaru
- Martwi, R (2019), “ *Perilaku Perkerasan Sistem Pelat Terpaku Pada Tanah Gambut Akibat Beban Cabut* ” , Tesis, Program Pascasarjana Universitas Islam Riau, Pekanbaru

- Puri, A (2011), “ *Kontribusi Koperan Dalam Mereduksi Lendutan Sistem Pelat Terpaku Pada Lempung Lunak* ”, 9th Indonesian Geotechnical Conference and 15th Annual Scientific Meeting, Jakarta
- Puri, A., Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B., Rifa’I, A., (2013), “ *Penerapan Metode Analisis Lendutan Pelat Terpaku Pada Model Skala Penuh dan Komparasi dengan Uji Pembebanan* ”, Konferensi Nasional Teknik Sipil 7 (KoNTekS 7), Universitas Sebelas Maret (UNS), Surakarta
- Puri, A (2015), “ *Studi Parametrik Perkerasan Jalan Beton Sistem Pelat Terpaku Pada Tanah Dasar Lunak* ”, Annual Cicil Engineering Seminar 2015, Pekanbaru
- Permatasari, W.Y., Hamdan, I.N (2017), “ *Pemodelan 3D Pada Perbaikan Tanah Lunak Menggunakan Metode Deep Mixed Column* ”, Reka Racana Jurnal Online Institut Teknologi Nasional, Bandung
- Puri, A (2018), “ *Kursus Singkat Aplikasi Software Plaxis 2D Pada Analisis Geoteknik* ”, Pekanbaru
- Puri, A., Mildawati, R (2019), “ *Investigasi Numerik Perkerasan Jalan Sistem Pelat Terpaku Terhadap Variasi Dimensi Struktur* ” , BENTANG Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil, Vol. 7 No. 1 Januari 2019
- Ryltenius A (2011), “ *FEM Modelling of Piled Raft Foundations in Two and Three Dimensions* “, Master’s Dissertation, Department of Construction Sciences Geotechnical Engineering, Lth, Lund, Sweden
- Suryolelono, K.B (2004), “ *Perancangan Fondasi* ”, Yogyakarta : Penerbit Nafiri.
- Saputra, E.L (2019), “ *Perilaku Perkerasan Sistem Pelat Terpaku Pada Gambut Dengan Perbaikan Tanah Campuran Gambut Di Sekeliling Tiang* ”, Tesis, Program Pasca Sarjana Teknik Sipil Universitas Islam Riau, Pekanbaru
- Waruwu, A. Hardiyatmo H.C., Rifa’i, A., (2017), “ *Deflection Behaviour of The Nailed Slab System-Supported Embankment On Peat Soil*”, Paper Number : 15(2017)4, 488, 556 - 563
- Waruwu, A., Ria N, S., , Panjaitan, Masri, M., (2012), “*Perilaku Pemampatan Tanah Gambut Berserat* ”, Volume 26 Nomor 1 Januari – Juni 2012
- Yulianti, P (2014), “ *Studi Pemodelan Perkuatan Pondasi Dangkal Pada Tanah Lempung Lunak Menggunakan Kombinasi Geotekstil Woven dan Grid Bambu Dengan Bantuan Program Plaxis*”, Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan Vol.2.No.3, September 2014