

***Penggunaan Geofom Sebagai Timbunan Tanah Lunak Terhadap Settlement dan
Perubahan Level Muka Air pada Subgrade Tanah Lunak***



Oleh:

**Muthia Anggraini
10202200005**

**Disetujui Untuk Diajukan dalam:
Sidang Terbuka Disertasi Hari/Tanggal: Jumat, 23 Mei 2025**

Promotor

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

Ko – Promotor

Dr. Ir. Harnedi Maizir, M.T.

**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG, SEMARANG
2025**

LEMBAR PENGUJI

Sidang Terbuka

Hari : Jumat, 23 Mei 2025

Promotor :



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

Ko-Promotor :



Dr. Ir. Harnedi Maizir, M.T.

Penguji Eksternal :



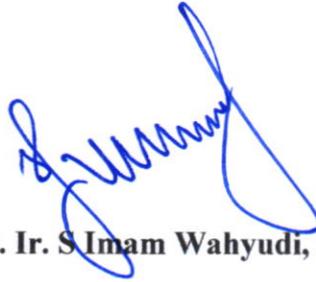
Prof. Yusep Muslih Purwana, S.T., M.T., Ph.D.

Penguji Internal :



Dr. Abdul Rochim, S.T., M.T.

Penguji Internal :



Prof. Dr. Ir. S Imam Wahyudi, DEA.

Penguji Internal:

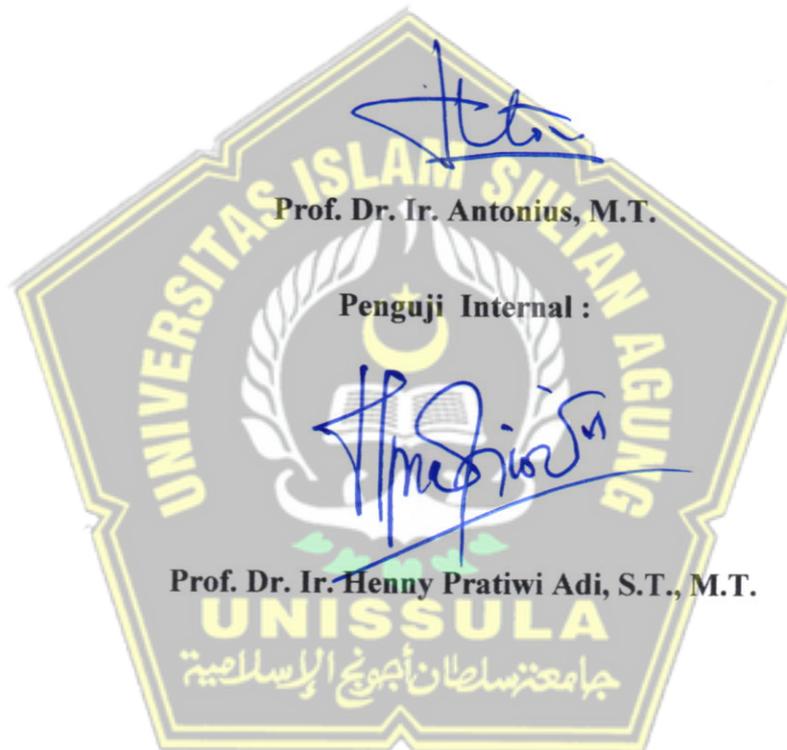


Prof. Dr. Ir. Antonius, M.T.

Penguji Internal :



Prof. Dr. Ir. Henny Pratiwi Adi, S.T., M.T.



**PENGGUNAAN GEOFOAM SEBAGAI TIMBUNAN
TANAH LUNAK TERHADAP *SETTLEMENT* DAN
PERUBAHAN LEVEL MUKA AIR PADA *SUBGRADE*
TANAH LUNAK**

DISERTASI

Diajukan Sebagai Salah Satu Persyaratan Untuk Mencapai Gelar Doktor



Muthia Anggraini

10202200005

**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG, SEMARANG
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

**PENGGUNAAN GEOFOAM SEBAGAI TIMBUNAN TANAH LUNAK
TERHADAP *SETTLEMENT* DAN PERUBAHAN LEVEL MUKA AIR PADA
SUBGRADE TANAH LUNAK**



Oleh :

Muthia Anggraini
10202200005

**Disetujui Untuk Diajukan Sidang dalam:
Sidang Terbuka pada Hari/Tanggal: Jum'at, 23 Mei 2025**

Promotor :

Prof. Ir. H. Pratikso, M.ST., Ph.D

Ko- Promotor :

Dr. Ir. H. Harnedi Maizir., M. T

**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG, SEMARANG
2025**

**LEMBAR PENGUJI
SIDANG UJIAN TERBUKA DISERTASI
Hari : Jum'at, 23 Mei 2025
Promotor :**

Prof. Ir. H. Pratikso, M.ST., Ph.D.

Ko- Promotor :

Dr. Ir. H. Harnedi Maizir., M. T.

Penguji:

Dr. Abdul Rochim, S.T., M.T.

Penguji:

Prof. Dr. Ir. S. Imam Wahyudi, DEA.

Penguji:

Prof. Dr. Ir. Antonius, M.T.

Penguji:

Prof. Dr. Ir. Henny Pratiwi Adi, S.T., M. T.

Penguji Eksternal:

Prof. Yusep Muslih Purwana, S.T., M.T., Ph.D.

MOTTO

كُنْتُمْ خَيْرَ أُمَّةٍ أُخْرِجَتْ لِلنَّاسِ تَأْمُرُونَ بِالْمَعْرُوفِ وَتَنْهَوْنَ
عَنِ الْمُنْكَرِ وَتُؤْمِنُونَ بِاللَّهِ ۗ وَلَوْ آمَنَ أَهْلُ الْكِتَابِ لَكَانَ خَيْرًا
لَّهُمْ ۗ مِنْهُمْ الْمُؤْمِنُونَ وَأَكْثَرُهُمُ الْفَاسِقُونَ

(Qs. Ali Imron: 110)

Arab-Latin: *Kuntum khaira ummatin ukhrijat lin-nasi ta'muruna bil-ma'rufi watan-hauna 'anil-mungkaru wa tu'minuna billah, walau amana ahlul-kitabi lakana khairalahum, min-humul-mu'minuna wa aksaruhumul-fasiqun*

Terjemahan Arti: Kamu adalah umat yang terbaik yang dilahirkan untuk manusia, menyuruh kepada yang ma'ruf, dan mencegah yang munkar, dan beriman kepada Allah. Sekiranya Ahli Kitab beriman, tentulah itu lebih baik bagi mereka, di antara mereka ada yang beriman, dan kebanyakan mereka adalah orang-orang yang fasik.

وَالْبَلَدُ الطَّيِّبُ يَخْرُجُ نَبَاتُهُ بِإِذْنِ رَبِّهِ وَالَّذِي خَبثَ لَا يَخْرُجُ إِلَّا
نَكْدًا ۗ كَذَلِكَ نَصْرَفُ الْآيَاتِ لِقَوْمٍ يَشْكُرُونَ ۗ

(Qs. Al-A'raf: 58)

Terjemahan Arti: Dan tanah yang baik, tanaman-tanamannya tumbuh subur dengan izin Tuhan, dan tanah yang buruk, tanaman-tanamannya yang tumbuh merana. Demikianlah Kami menjelaskan berulang-ulang tanda-tanda (kebesaran Kami) bagi orang-orang yang bersyukur.

Persembahan

Puji Syukur Kehadirat Allah SWT atas limpahan Taufik, Rahmat dan HidayahNya.

Sholawat dan Salam kepada Junjungan Nabi Muhammad SAW.

Terima kasih untuk orang tua saya, Ibu Zainimar dan Bapak Afrizal. M, S.ST atas kasih sayang dan motivasinya, Mertua saya, Ibu Ermy dan Bapak Akmal Lanjumin (alm).

Terima kasih untuk Suamiku tercinta M.Heikal Akmal, S.H., M. H dan anak-anakku tersayang Laziva Tabina Heikal, Nadhif Megithia Heikal, dan Alvan Megithia Heikal.

Terima kasih kepada Bapak dan Ibu dosen atas bimbingan selama kuliah.



ABSTRAK

Tanah lunak menimbulkan permasalahan pada *subgrade* jalan karena memiliki daya dukung yang rendah. Timbunan di atas tanah lunak perlu diindektifikasi dan ditinjau sebelum dimulai pelaksanaan konstruksi, karena berat sendiri timbunan yang tinggi. Berbagai teknik perkuatan tanah dapat digunakan untuk memperbaiki kondisi tanah lunak. Diantaranya kinerja tanah lunak terhadap penurunan timbunan akibat *subgrade* yang memiliki daya dukung rendah. **Permasalahan** yang muncul timbunan di atas tanah lunak tanpa ada perkuatan adalah terjadinya penurunan tanah yang besar. Tantangan konstruksi jalan di atas tanah lunak sangat besar, sehingga diperlukan metode yang inovatif dan ramah lingkungan. Geofom merupakan salah satu metode perbaikan tanah, material ini merupakan *expanded polystyrene* dan *density* rendah antara 11,2 hingga 45,7 kg/m³. Geofom kategori timbunan ringan sehingga dapat meminimalkan penurunan tanah. **Tujuan** penelitian ini adalah untuk menganalisis kinerja timbunan dengan Geofom EPS 22 tebal 20 cm, 30 cm, 40 cm tanpa Muka Air Tanah dan akibat perubahan Muka Air Tanah di atas tanah lunak, dengan variasi beban 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN, dan 20 kN. **Metodologi** penelitian yang dilakukan adalah pengujian laboratorium propertis tanah di laboratorium Mekanika Tanah Unilak dan Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru. Pengujian eksperimental dilaksanakan di PT.Harista Karsa Mandiri Pekanbaru dan divalidasi dengan numerik Plaxis 2D versi 2023. **Hasilnya** Timbunan dengan Geofom tebal 40 cm beban maksimum 20 kN terjadi deviasi sebesar 10% antara hasil eksperimen dengan numerik Plaxis 2D versi 2023. Pengaruh Muka Air Tanah akibat beban 0kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN, dan 20 kN yaitu penurunan terkecil pada MAT pada pelat beton dengan beban maksimum 20 kN dan deviasi yang terjadi antara hasil eksperimen dan plaxis 2D versi 2023 sebesar 6,6 % sedangkan pada MAT pada *subgrade* sebesar 7,8%. Deviasi terjadi karena pelaksanaan di lapangan pada saat pemadatan tanah dalam bak uji. **Kesimpulannya** ketebalan Geofom dan tinggi Muka Air Tanah berpengaruh terhadap penurunan tanah. Semakin tebal Geofom yang digunakan maka penurunan yang terjadi akan semakin kecil. Semakin tinggi level Muka Air Tanah penurunan yang terjadi akan semakin kecil.

Kata kunci : EPS22, gaya angkat, lempung, tanah lunak

ABSTRACT

Soft soils pose a problem for road subgrades as they have low bearing capacity. Embankments on soft soils need to be identified and reviewed before construction begins, due to the high self-weight of the embankment. Various soil reinforcement techniques can be used to improve soft soil conditions. Among them, is the performance of soft soil against embankment settlement due to subgrade that has low bearing capacity. Soft soil performance on embankment settlement due to low bearing capacity subgrade. **The problem** of embankment on soft soil without reinforcement is the occurrence of large soil settlements. The challenges of road construction on soft soils are enormous, so innovative and environmentally friendly methods are required. Geofam is one of the soil improvement methods, this material is expanded polystyrene and low density between 11.2 to 45.7 kg/m³. Geofam is a lightweight backfill category that minimizes soil settlement. **The purpose** of this research is to analyze the performance of embankment with Geofam EPS 22 20 cm, 30 cm, and 40 cm thick without groundwater level and due to changes in groundwater level on soft soil, with load variations of 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN, and 20 kN. The research methodology conducted was laboratory testing of soil properties at the Unilak Soil Mechanics Laboratory and Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru. Experimental testing was conducted at PT Harista Karsa Mandiri Pekanbaru and validated with Plaxis 2D numerical version 2023. **The result** the embankment with 40 cm thick Geofam with a maximum load of 20 kN has a deviation of 10% between the experimental results and the numerical Plaxis 2D version 2023. The effect of Groundwater Level due to loads of 0kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN, and 20 kN is the smallest decrease in MAT on concrete slabs with a maximum load of 20 kN and the deviation that occurs between experimental results and Plaxis 2D version 2023 of 6.6% while in MAT on subgrade of 7.8%. Deviations occur due to field implementation during soil compaction in the test tub. The conclusion is that the thickness of Geofam and the height of the Groundwater level have an effect on soil settlement. The thicker the Geofam used, the smaller the settlement will be. The higher the level of the Groundwater Table, the smaller the settlement will be.

Keywords: EPS22, lifting force, clay, soft soil

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr.Wb

Puji dan syukur atas rahmat Allah SWT, sehingga penulis dapat membuat proposal Disertasi ini dengan judul **“PENGUNAAN GEOFOAM SEBAGAI TIMBUNAN TANAH LUNAK TERHADAP SETTLEMENT DAN PERUBAHAN LEVEL MUKA AIR PADA SUBGRADE TANAH LUNAK”**. Penelitian disertasi ini disusun sebagai bahan ujian terbuka dan salah satu persyaratan untuk mencapai gelar Doktor Teknik Sipil pada Program Doktor Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya, terutama kepada yang terhormat Bapak/Ibu:

1. Prof. Dr. Gunarto, S. H., M.Hum., selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung, Semarang.
2. Dr. Abdul Rochim, S.T.,M. T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung sekaligus sebagai penguji atas masukan dan saran dalam penyempurnaan penelitian ini
3. Prof. Dr. Ir. H. S. Imam Wahyudi, DEA., selaku Ketua Program Doktor Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung, sekaligus sabagai penguji atas masukan dan saran dalam penyempurnaan penelitian ini.
4. Prof. Ir. H. Pratikso, M. ST., Ph.D., selaku Sekretaris Program Doktor Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung, sekaligus sebagai Promotor dan penguji

atas bimbingan, dukungan serta motivasi dan kesabarannya dalam membantu penulis menyelesaikan penelitian ini.

5. Dr. Ir. H. Harnedi Maizir, M.T., sebagai Ko-Promotor dan penguji atas bimbingan, dukungan serta motivasi dan kesabarannya dalam membantu penulis menyelesaikan penelitian ini.
6. Prof. Yusep Muslih Purwana, S.T., M.T., Ph.D., sebagai penguji eksternal atas saran dan bimbingannya dalam penyempurnaan penelitian ini.
7. Prof. Dr. Ir. Antonius, M. T., sebagai penguji atas saran dan bimbingannya dalam penyempurnaan penelitian ini.
8. Prof. Dr. Ir. Henny Pratiwi Adi, S. T., M. T., sebagai penguji atas saran dan bimbingannya dalam penyempurnaan penelitian ini.
9. Para dosen yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan kepada penulis selama mengikuti Pendidikan Doktor Teknik Sipil pada Program Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
10. Seluruh Civitas Akademika Universitas Lancang Kuning, Pekanbaru
11. Staf pegawai serta semua pihak yang telah membantu terlaksananya ujian terbuka ini.

Penulis telah berupaya untuk menyelesaikan penelitian Disertasi ini dengan maksimal, namun demikian penulis yakin masih terdapat banyak kekurangan yang perlu disempurnakan, oleh karena itu penulis mohon petunjuk, kritik dan saran yang dapat menyempurnakan penelitian ini menjadi lebih baik.

Semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi penulis dan Masyarakat banyak

Semarang, 23 Mei 2025

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL/SAMPUL	
MOTTO	
PERSEMBAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xx
DAFTAR LAMPIRAN	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	4
1.3 Rumusan Masalah.....	5
1.4 Maksud dan Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
1.6 Batasan Masalah.....	6
1.7 Originalitas dan Pembaruan.....	7
BAB II KAJIAN PUSTAKA	8
2.1 Tanah Lunak.....	9
2.2 Geofom.....	14
2.3 <i>Subgrade</i> (Tanah Dasar).....	27
2.4 Penurunan Tanah.....	34
2.5 Stabilitas Timbunan dengan Geofom.....	36
2.6 <i>Hydrostatic Uplift (Flotation)</i>	39
2.7 Gaya Hidrostatika dan Gaya Berat.....	43
2.7.1 Hukum Archimedes.....	43
2.7.2 Hukum II Newton.....	45
2.8 Konsep Metode Elemen Hingga.....	46

2.9	Korelasi dan Regresi.....	51
2.10	Literatur Yang Relevan.....	53
2.11	Kerangka Berpikir.....	65
BAB III	METODE PENELITIAN	67
3.1	Konsep dan Pelaksanaan.....	67
3.2	Lokasi dan Waktu Penelitian.....	70
3.3	Variabel Pengujian.....	70
3.4	Metode Pengumpulan Data Penelitian.....	79
3.5	Instrument Penelitian.....	81
3.5.1	Tahap Persiapan dan Pembuatan Benda Uji.....	82
3.5.2	Pelaksanaan Pengujian di Laboratorium.....	84
3.5.3	Tahap Pengumpulan Data.....	86
3.5.4	Tahap Analisa Data dan Penyajian Hasil Penelitian.....	86
3.6	Metode Analisis.....	87
3.7	Bagan Alir Penelitian.....	87
BAB IV	ANALISIS DATA DAN HASIL ANALISIS	89
4.1	Analisis data.....	89
4.2	Persiapan Bak Uji.....	89
4.3	Pengujian Tanah Lunak.....	91
4.4	Persiapan <i>Prototype</i> dan Pemasangan Instrumen	95
4.4.1	Persiapan <i>Prototype</i> Geofom.....	95
4.4.2	Pemasangan Instrumen Data <i>Logger</i>	96
4.4.3	Pemasangan Instrumen LVDT.....	96
4.4.4	Pemasangan Instrumen <i>Load Cell</i>	97
4.5	Pelaksanaan Pengujian.....	98
4.6	Analisis Uji Sampel Tanah di Laboratorium.....	123
4.7	Pengujian <i>Dynamic Cone Penetrometer</i> (DCP) dan <i>Sandcone</i>	126
4.8	Pemodelan Plaxis 2D.....	128
BAB V	PEMBAHASAN DAN HASIL ANALISIS	129
5.1	Interpretasi Hasil Pemodelan Plaxis 2D.....	129
5.1.1	Interpretasi Hasil Pemodelan Plaxis <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tanpa Geofom	129
5.1.2	Interpretasi Hasil Pemodelan Plaxis <i>Subgrade</i> Tanah	

Lunak Dengan Geofom Kondisi Kering.....	130
5.1.3 Interpretasi Hasil Pemodelan Plaxis <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Dengan Geofom Kondisi Muka Air di Bawah Geofom (Permukaan <i>Subgrade</i>).....	132
5.1.4 Interpretasi Hasil Pemodelan Plaxis <i>Subgrade</i> Dengan Geofom Kondisi Muka Air di Atas Geofom (Pelat Beton).....	134
5.2 Interpretasi Hasil Analisis Numerik Plaxis 2D dan Eksperimen di Laboratorium.....	136
5.1.1 Uji Tanah di Laboratorium.....	150
5.1.2 Pemodelan Plaxis <i>Subgrade</i> Dengan Geofom Tanpa MAT.....	130
5.1.3 Pemodelan Plaxis <i>Subgrade</i> Dengan Geofom MAT Pada <i>Subgrade</i>	132
5.3 Interpretasi Hasil Analisis Uji Eksperimen.....	140
5.3.1 Hubungan Tebal Geofom Dengan Gaya Angkat (<i>Hydrostatic Uplift</i>).....	143
5.4 Perbandingan Penurunan Tanah Dengan Timbunan Geofom Pengujian Eksperimen di Laboratorium dan Numerik Plaxis 2D.....	161
5.5 Daya Dukung Tanah Dasar Dengan Timbunan Geofom.....	165
5.6 Pembahasan Hasil Penelitian.....	181
5.6.1 Pembahasan Hasil Eksperimen di Laboratorium.....	181
5.6.2 Pembahasan Hasil Analisis Numerik.....	183
5.7 Perbandingan Dengan Penelitian Terdahulu.....	185
BAB VI KESIMPULAN, IMPLEMENTASI DAN REKOMENDASI	191
6.1 Kesimpulan.....	191
6.2 Implementasi Hasil Penelitian.....	193
6.3 Saran dan Rekomendasi.....	193
BAB VII DAFTAR PUSTAKA	194
LAMPIRAN.....	201

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

AASHTO	= <i>American Association of State Highway and Transportation Official</i>
ASTM	= <i>American Standard Testing and Material</i>
$\Delta\sigma_z$	= Tambahan tegangan vertikal pada lapisan yang ditinjau (kN/m^2)
B	= Lebar Pondasi
Bw	= Lebar dasar timbunan (m)
c	= Kohesi (kN/m^2)
CBR	= <i>California Bearing Ratio</i>
CH ₂	= Metilena
C ₂ H ₅ I	= Etil iodida
DCP	= <i>Dynamic Cone Penetrometer</i>
Df	= Kedalaman pondasi
e	= Angka pori
E	= Modulus young (kN/m^2)
E	= Modulus Elastisitas
Eg	= <i>Elastis Modulus</i>
EPS	= <i>Expanded Polystyrene</i>
ΣN	= Total dari gaya normal yang bekerja
ΣU	= Total dari gaya angkat air pada bagian bawah timbunan
F	= Gaya yang bekerja pada benda (N)
Fa	= Gaya tekan keatas satuan Newton (N)
FEM	= <i>Finite element methode</i>
FK	= Faktor aman
fy	= Kekuatan karakteristik baja
g	= gravitasi satuan (m/s^2)
Gs	= Berat jenis
H	= Tinggi/tebal (m)
h	= Permukaan air (m)
h_{gf}	= Tebal Geofoam (cm)

H ₂ O	= Karbon dioksida
I _B	= Faktor pengaruh, bergantung pada nilai r/z
JMD	= <i>Job Mix Design</i>
KI	= Kalium iodida
KOH	= Kalium hidroksida
K-250	= Mutu beton
l _{atas}	= Lebar timbunan EPS bagian atas (m)
l _{bawah}	= Lebar timbunan EPS bagian bawah (m)
LDS	= <i>Load Distribution Slab</i>
LL	= Batas cair (LL)
LVDT	= <i>Linier Variable Differential Transformer</i>
m	= Massa benda (kg)
MH	= Lanau tak organik
MAT	= Muka Air Tanah
n	= Porositas (%)
N ₆₀	= Hitungan pukulan yang dikoreksi
N _c	= Faktor ketahanan geser daya dukung
N _q	= Faktor daya dukung
N _γ	= Faktor daya dukung
NCHRP	= <i>National Cooperative Highway Research Program</i>
O _{REQ}	= Beban tambahan yang diperlukan struktur timbunan EPS blok Geofom agar memenuhi faktor aman (kN/m)
P	= massa jenis zat cair (kg/m ³)
PL	= Plastisitas limit (%)
PI	= Plastisitas indeks (%)
ρ _b	= Massa jenis benda tercelup
ρ _f	= Massa jenis air
Q	= Beban terpusat (kN)
q _n	= tambahan tegangan netto
qu	= Kuat tekan bebas tanah (kg/cm ²)
r	= Jarak dari pusat beban yang ditinjau
RCPS	= <i>Rigid Cellular Polystyrene</i>

R^2	= Koefisien determinasi
S	= Penurunan
S_n	= Gaya total yang bekerja
S_u	= Gaya angkat (kN/m)
SLS	= <i>Serviceability limit state</i>
S_i	= Penurunan segera rata-rata
SNI	= Standar nasional Indonesia
$S_{n_{EPS}}$	= tegangan normal yang diberikan oleh beban Geofom pada permukaan tanah
$STdRG$	= Sumbu Tandem Roda Ganda
$STdRT$	= Sumbu Tandem Roda Tunggal
$Stot$	= Penurunan total
$STRG$	= Sumbu Tunggal Roda Ganda
$STRT$	= Sumbu Tunggal Roda Tunggal
$STrRG$	= Sumbu Tridem Roda Ganda
T_{EPS}	= Tebal atau tinggi Geofom (m)
$USCS$	= <i>Unified Soil Classification System</i>
ULS	= <i>Ultimate limit state</i>
UU	= <i>Unconsolidated Undrained</i>
U_y	= Total <i>displacements</i>
v	= <i>Passion ration</i>
V	= volume benda yang tercelup (m ³)
w	= Kadar air (%)
W_{air}, W'_{air}	= Komponen vertikal dari berat air, di kedua sisi timbunan
W_{EPS}	= Berat timbunan EPS blok Geofom
X	= Variabel bebas
XPS	= <i>Extruded Polystyrene</i>
Y	= Variabel tak bebas
z	= Kedalaman lapisan yang ditinjau (m)
γ_d	= Berat volume kering (kN/m ³)
γ_{EPS}	= berat jenis Geofom (kN/m ³)
γ_{sat}	= Berat volume jenuh (kN/m ³)

γ_w	= Berat jenis air (kN/m^3)
γ_{dmaks}	= Berat isi kering maksimum
φ	= Sudut geser dalam ($^{\circ}$)
τ	= Kuat geser
μ_1	= Faktor koreksi kedalaman pondasi Df
μ_0	= Faktor koreksi untuk lapisan tebal terbatas (H)



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Bahan Baku Stirena Yang Tidak Berbusa.....	15
Gambar 2.2	Butiran Berbusa Dari Stirena.....	16
Gambar 2.3	EPS Blok <i>Geofom</i>	16
Gambar 2.4	Penampang Melintang Timbunan Jalan Dengan <i>Geofom</i>	21
Gambar 2.5	Jalan Tol Yamagata, Jepang Dengan Dinding Samping Vertikal.....	22
Gambar 2.6	Perilaku Tegangan - Regangan Sebesar 20 kg/m ³ EPS 50 (AASTHO).....	25
Gambar 2.7	Perilaku Rangkak Pada EPS 40 (AASTHO).....	26
Gambar 2.8	Perilaku Rangkak Pada EPS 70 (AASTHO).....	27
Gambar 2.9	Perilaku Rangkak Pada EPS 100 (AASTHO).....	27
Gambar 2.10	Komponen Utama Dari Timbunan EPS Blok <i>Geofom</i>	29
Gambar 2.11	<i>Sloped-side Fill</i> (Lereng Timbunan Miring).....	30
Gambar 2.12	<i>Vertical-face Fill</i> (Lereng Timbunan Vertikal).....	31
Gambar 2.13	Material Timbunan Dengan Menggunakan <i>Geofom</i>	31
Gambar 2.14	Susunan Lapisan Timbunan <i>Geofom</i> di Atas Tanah Lunak...	31
Gambar 2.15	Beban Akibat Truk (Beban T).....	33
Gambar 2.16	Grafik untuk Mendapatkan Nilai μ_1 dan nilai μ_0	36
Gambar 2.17	Tambahan Tegangan Akibat Beban Titik (Beban Terpusat)....	39
Gambar 2.18	Faktor Pengaruh Untuk Beban Titik Didasarkan Teori Boussinesq (I_B).....	39
Gambar 2.19	<i>Hydrostatic Uplift</i> Dengan Permukaan Air Yang Sama Kedua Sisi.....	40
Gambar 2.20	Kondisi Benda Tenggelam.....	44
Gambar 2.21	Kondisi Benda Melayang.....	44
Gambar 2.22	Kondisi Benda Terapung.....	45
Gambar 2.23	Ilustrasi Pemodelan <i>Plane Strain</i> dan <i>Axisymmetric</i>	48
Gambar 2.24	Model Timbunan Dengan <i>Geofom</i> dan Distribusi Desain Beban.....	53

Gambar 2.25 Perbandingan Penurunan Bagian Atas dan Tengah Perkerasan dari Data Lapangan dan Model Numerik.....	54
Gambar 2.26 Skema Lapisan Timbunan dengan Geofom.....	54
Gambar 2.27 Penurunan Timbunan dengan Tebal Cover 100 cm (a) $E_g = 10 \text{ MPa}$ (b) $E_g = 1 \text{ Mpa}$	55
Gambar 2.28 Kerangka Berpikir.....	66
Gambar 3.1 Geofom EPS 22.....	68
Gambar 3.2 Gambar Bak Uji Penelitian.....	68
Gambar 3.3 <i>Frame Hydraulic Jack</i>	69
Gambar 3.4 Model Benda Uji dalam Bentuk 3 Dimensi.....	70
Gambar 3.5 Model Percobaan 1 Tanpa Menggunakan Geofom.....	72
Gambar 3.6 Model Percobaan 2 Kondisi 1 Geofom Tebal 20 cm Kondisi Kering.....	73
Gambar 3.7 Model Percobaan 2 Kondisi 2 Geofom Tebal 20 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofom pada <i>Subgrade</i>	73
Gambar 3.8 Model Percobaan 2 Kondisi 3 Geofom Tebal 20 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton).....	74
Gambar 3.9 Model Percobaan 3 Kondisi 1 Geofom Tebal 30 cm Kondisi Kering.....	75
Gambar 3.10 Model Percobaan 3 Kondisi 2 Geofom Tebal 30 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofom (pada <i>Subgrade</i>).....	75
Gambar 3.11 Model Percobaan 3 Kondisi 3 Geofom Tebal 30 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton).....	76
Gambar 3.12 Model Percobaan 4 Kondisi 1 Geofom Tebal 40 cm Kondisi Kering.....	77
Gambar 3.13 Model Percobaan 4 Kondisi 2 Geofom Tebal 40 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofom (pada <i>Subgrade</i>).....	77
Gambar 3.14 Model Percobaan 4 Kondisi 3 Geofom Tebal 40 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton).....	78
Gambar 3.15 Skematik <i>Prototype</i> Penelitian.....	81
Gambar 3.16 <i>Load Cell</i> Kapasitas 50 Ton.....	83
Gambar 3.17 LVDT Ukuran 50 mm.....	83

Gambar 3.18 Data <i>Logger</i>	84
Gambar 3.19 Bagan Alir Penelitian.....	88
Gambar 4.1 Proses Pembuatan Rangka Bak Uji.....	90
Gambar 4.2 Bak Uji dan Frame <i>Hidroulik Jack</i>	90
Gambar 4.3 Proses Pengambilan Sampel Tanah Terganggu (<i>Disturbed</i>).....	91
Gambar 4.4 Proses Pelaksanaan Pengambilan Tanah Tak Terganggu (<i>Undisturbed</i>).....	92
Gambar 4.5 Pengujian <i>Triaxial Test</i>	93
Gambar 4.6 <i>Loading Plate</i> Beton K250.....	95
Gambar 4.7 Pemasangan LVDT.....	97
Gambar 4.8 Pemasangan <i>load cell</i>	98
Gambar 4.9 Titik Monitoring <i>Settlement</i>	99
Gambar 4.10 <i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada Tanah Lunak Tebal 60 cm Tanpa Geofom.....	101
Gambar 4.11 <i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada Tanah Lunak Tebal 80 cm Tanpa Geofom.....	102
Gambar 4.12 <i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada Tanah Lunak Tebal 90 cm Tanpa Geofom.....	103
Gambar 4.13 <i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada Tanah Lunak Tebal 100 cm Tanpa Geofom.....	104
Gambar 4.14 <i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tanpa Geofom dan dengan Geofom Tebal 20 cm	105
Gambar 4.15 <i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tanpa Geofom dan Dengan Geofom Tebal 30 cm	106
Gambar 4.16 <i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tanpa Geofom dan Dengan Geofom Tebal 40 cm	108
Gambar 4.17 <i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tanpa Geofom dan Dengan Geofom Tebal 20 cm Kondisi Muka di bawah Geofom (Permukaan <i>Subgrade</i>).....	109
Gambar 4.18 <i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada Tanah Lunak Tanpa Geofom dan Dengan Geofom Tebal 30 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofom.....	111

Gambar 4.19	<i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada Tanah Lunak Tanpa Geofom dan Dengan Geofom Tebal 40 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofom (Permukaan <i>Subgrade</i>).....	112
Gambar 4.20	<i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tanpa Geofom dan Dengan Geofom Tebal 20 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pada Pelat Beton).....	114
Gambar 4.21	<i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tanpa Geofom dan Dengan Geofom Tebal 30 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton).....	115
Gambar 4.22	<i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tanpa Geofom dan Dengan Geofom Tebal 40 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton).....	117
Gambar 4.23	<i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tebal 60 cm Dengan Variasi Tebal Geofom (Plaxis 2D).....	119
Gambar 4.24	<i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada Variasi Tebal <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tanpa Geofom.....	120
Gambar 4.25	<i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tebal 80 cm dengan Timbunan Geofom Tebal 20 cm (<i>Subgrade</i> Tanah Lunak 60 cm).....	121
Gambar 4.26	<i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tebal 90 cm dengan Timbunan Geofom Tebal 30 cm (<i>Subgrade</i> Tanah Lunak 60 cm).....	122
Gambar 4.27	<i>Settlement</i> Yang Terjadi Pada <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tebal 100 cm dengan Timbunan Geofom Tebal 40 cm (<i>Subgrade</i> Tanah Lunak 60 cm).....	122
Gambar 4.28	Grafik Klasifikasi Tanah Metode USCS	124
Gambar 4.29	Grafik Triaxial UU.....	125
Gambar 4.30	Nilai Berat Volume Kering Berdasarkan Kadar Air Tanah Asli Lapangan.....	127
Gambar 5.1	Total <i>Displacements</i> uy <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tanpa Geofom.....	129
Gambar 5.2	Total <i>Displacements</i> uy <i>Subgrade</i> Tanah Lunak dengan	

	Geofoam Tebal 20 cm Kondisi Kering.....	130
Gambar 5.3	Total <i>displacements</i> uy <i>Subgrade</i> Tanah Lunak dengan Geofoam Tebal 30 cm Kondisi Kering.....	131
Gambar 5.4	Total <i>Displacements</i> uy <i>Subgrade</i> Tanah Lunak dengan Geofoam Tebal 40 cm Kondisi Kering.....	131
Gambar 5.5	Total <i>Displacements</i> uy <i>Subgrade</i> Tanah Lunak dengan Geofoam Tebal 20 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofoam (Permukaan <i>Subgrade</i>).....	132
Gambar 5.6	Total <i>Displacements</i> uy <i>subgrade</i> Tanah Lunak dengan Geofoam Tebal 30 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofoam (Permukaan <i>Subgrade</i>).....	133
Gambar 5.7	Total <i>Displacements</i> uy <i>Subgrade</i> Tanah Lunak dengan Geofoam Tebal 40 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofoam (Permukaan <i>Subgrade</i>).....	133
Gambar 5.8	Total <i>Displacements</i> uy <i>Subgrade</i> Tanah Lunak dengan Geofoam Tebal 20 cm Kondisi Muka Air di Atas Geofoam (Pelat Beton).....	134
Gambar 5.9	Total <i>Displacements</i> uy <i>Subgrade</i> Tanah Lunak dengan Geofoam Tebal 30 cm Kondisi Muka Air di Atas Geofoam (Pelat Beton).....	135
Gambar 5.10	Total <i>Displacements</i> uy <i>Subgrade</i> Tanah Lunak dengan Geofoam Tebal 40 cm Kondisi Muka Air di Atas Geofoam (Pelat Beton).....	135
Gambar 5.11	Grafik <i>Subgrade</i> Dengan Geofoam Kondisi Kering.....	137
Gambar 5.12	Grafik <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Dengan Geofoam Kondisi Muka Air di Atas Geofoam (Permukaan <i>Subgrade</i>).....	138
Gambar 5.13	Grafik <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Dengan Geofoam Kondisi Muka Air di atas Geofoam (Pelat Beton).....	140
Gambar 5.14	Grafik Penurunan Dengan Variasi Tebal Geofoam Kondisi Kering Pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil Eksperimen Laboratorium).....	141
Gambar 5.15	Grafik Penurunan Dengan Variasi Tebal Geofoam Dengan	

Variasi Level Muka Air Pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil Eksperimen di Laboratorium).....	142
Gambar 5.16 Nilai Gaya Angkat Akibat Tebal Geofom Kondisi Muka Air di bawah Geofom (Permukaan <i>Subgrade</i>) Akibat Beban 20 kN.....	150
Gambar 5.17 Grafik Pengaruh Tebal Geofom Terhadap Gaya Angkat Kondisi Muka Air di Bawah Geofom (Permukaan <i>Subgrade</i>) Akibat Beban 20 kN.....	151
Gambar 5.18 Nilai Gaya Angkat Akibat Tebal Geofom Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pada Pelat Beton) Beban 20 kN	159
Gambar 5.19 Grafik Pengaruh Tebal Geofom Terhadap Gaya Angkat Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pada Pelat Beton).....	160
Gambar 5.20 Nilai Gaya Angkat Akibat Variasi Level Muka Air dan Tebal Geofom.....	161
Gambar 5.21 Grafik Pengaruh Variasi Tebal Geofom Kondisi Kering Terhadap Penurunan Timbunan Akibat Beban 20 kN (Hasil Eksperimen di Laboratorium dan Numerik Plaxis 2D)...	162
Gambar 5.22 Grafik Pengaruh Variasi Tebal Geofom Kondisi Muka Air di bawah Geofom (Permukaan <i>Subgrade</i>) Terhadap Penurunan Timbunan Akibat Beban 20 kN (Hasil Eksperimen di Laboratorium dan Numerik Plaxis 2D).....	163
Gambar 5.23 Grafik Pengaruh Variasi Tebal Geofom Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pada Pelat Beton) Terhadap Penurunan Timbunan Akibat Beban 20 kN (Hasil Eksperimen di Laboratorium dan Numerik Plaxis 2D).....	164
Gambar 5.24 Tegangan Akibat Beban Titik Pada <i>Subgrade</i> Tanah Dasar Tebal 60 cm Tanpa Geofom	168
Gambar 5.25 Hubungan Tegangan Pada <i>Subgrade</i> Tanah Dasar Tebal 60 cm Dengan Faktor Aman (FK) Tanpa Geofom	168
Gambar 5.26 Tegangan Akibat Beban Titik Pada <i>Subgrade</i> Tanah Dasar Tebal 60 cm Akibat Timbunan Dengan Geofom Tebal 20 cm.....	171

Gambar 5.27 Hubungan Tegangan Pada <i>Subgrade</i> Tanah Dasar Tebal 60 cm Dengan Faktor Aman (FK) Akibat Timbunan Dengan Geofom Tebal 20 cm.....	172
Gambar 5.28 Tegangan Akibat Beban Titik Pada <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tebal 60 cm Akibat Timbunan Dengan Geofom Tebal 30 cm	175
Gambar 5.29 Hubungan Tegangan Pada <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tebal 60 cm Dengan Faktor Aman (FK) Akibat Timbunan Dengan Geofom Tebal 30 cm.....	175
Gambar 5.30 Tegangan Akibat Beban Titik Pada <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tebal 60 cm Akibat Timbunan Dengan Geofom Tebal 40 cm.....	178
Gambar 5.31 Hubungan Tegangan Pada <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tebal 60 (cm Dengan Faktor Aman (FK) Akibat Timbunan Dengan Geofom Tebal 40 cm.....	179
Gambar 5.32 Grafik Perbandingan Variasi Tebal Geofom dan Tegangan Pada <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tebal 60 cm	180
Gambar 5.33 Grafik Perbandingan Variasi Tebal Geofom dan Faktor Aman (FK) Akibat Beban Maksimum 20 kN.....	181
Gambar 5.34 Grafik Perbandingan Penurunan Timbunan Geofom dengan Penelitian Terdahulu.....	186
Gambar 5.35 Grafik Perbandingan Penurunan Timbunan Geofom dengan Penelitian Terdahulu Akibat Beban Vertikal.....	187
Gambar 5.36 Grafik Perbandingan Faktor Aman Timbunan Geofom dengan Penelitian Terdahulu.....	188
Gambar 5.37 Grafik Perbandingan Rasio Maksimum Tinggi Muka Air Timbunan Geofom dengan Penelitian Terdahulu.....	190

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Klasifikasi Tanah Lempung Berdasarkan Kadar Air.....	8
Tabel 2.2	Porositas, Angka Pori, dan Berat Satuan Tanah-Tanah Tipikal Alami.....	9
Tabel 2.3	Hubungan Antara Sudut Geser Dalam dengan Jenis Tanah.....	10
Tabel 2.4	Korelasi N_{60} Untuk Tanah Kohesif.....	11
Tabel 2.5	Berat Jenis Tanah (<i>specific gravity</i>).....	11
Tabel 2.6	Konsistensi Lempung dalam Bentuk Kekuatan Kompresip Bebas.....	12
Tabel 2.7	Nilai Indeks Plastisitas dan Macam Tanah.....	12
Tabel 2.8	Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah Lempung.....	13
Tabel 2.9	<i>Poisson Ratio</i>	14
Tabel 2.10	ASTM D6817 <i>Physical Property Requirement of EPS</i> Gefoam..	19
Tabel 2.11	Spesifikasi EPS blok Gefoam berdasarkan AASTHO.....	19
Tabel 2.12	Tinggi Minimum Tanah Dasar di Atas Muka Air Tanah dan Muka Air Banjir.....	32
Tabel 2.13	Perkiraan Waktu Pra-Pembebanan Untuk Timbunan Rendah di Atas Tanah Lunak.....	33
Tabel 2.14	Kriteria Penurunan Timbunan.....	34
Tabel 2.15	Faktor Daya Dukung N_c , N_g , dan N_γ Menurut Mayerhof (1963)...	37
Tabel 2.16	Interpretasi Koefisien Korelasi.....	51
Tabel 2.17	Akurasi Regresi Linier Berdasarkan Koefisien Determinasi (R^2)...	52
Tabel 2.18	Penelitian Terdahulu.....	55
Tabel 4.1	Rekapan Data Pengujian Tanah Dasar.....	92
Tabel 4.2	Hasil Pegujian Kuat Tekan Beton.....	94
Tabel 4.3	Dimensi Gefoam.....	95
Tabel 4.4	Perletakkan dank ode sensor LVDT.....	96
Tabel 4.5	Berat Material Benda Uji.....	100
Tabel 4.6	<i>Settlement</i> Tanah Lunak 60 cm Tanpa Gefoam	100
Tabel 4.7	<i>Settlement</i> Tanah Lunak 80 cm Tanpa Gefoam.....	101
Tabel 4.8	<i>Settlement</i> Tanah Lunak 90 cm Tanpa Gefoam.....	102

Tabel 4.9	<i>Settlement</i> Tanah Lunak 100 cm Tanpa Geofom.....	103
Tabel 4.10	<i>Settlement</i> Tanah Lunak Dengan Geofom Tebal 20 cm Kondisi Kering.....	105
Tabel 4.11	<i>Settlement</i> Tanah Lunak Dengan <i>Geofom</i> Tebal 30 cm Kondisi Kering.....	106
Tabel 4.12	<i>Settlement</i> Tanah Lunak Dengan Geofom Tebal 40 cm Kondisi Kering.....	107
Tabel 4.13	<i>Settlement</i> Tanah Lunak Dengan Geofom Tebal 20 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofom (Permukaan <i>Subgrade</i>).....	109
Tabel 4.14	<i>Settlement</i> Tanah Lunak Dengan Geofom Tebal 30 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofom (Permukaan <i>Subgrade</i>).....	110
Tabel 4.15	<i>Settlement</i> Tanah Lunak Dengan Geofom Tebal 40 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofom (Permukaan <i>Subgrade</i>).....	112
Tabel 4.16	<i>Settlement</i> Tanah Lunak Dengan Geofom Tebal 20 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton).....	113
Tabel 4.17	<i>Settlement</i> Tanah Lunak Dengan Geofom Tebal 30 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton).....	115
Tabel 4.18	<i>Settlement</i> Tanah Lunak Dengan Geofom Tebal 40 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton).....	116
Tabel 4.19	Rekapan Eksperimen di Laboratorium Beban 20 kN.....	118
Tabel 4.20	Rekapan Eksperimen di Laboratorium Beban 20 kN Variasi Tebal <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tanpa Geofom dan Dengan Geofom (<i>Subgrade</i> Tanah Lunak Tebal 60 cm).....	120
Tabel 4.21	Hasil Pengujian DCP.....	127
Tabel 4.22	Hasil Pengujian <i>Sandcone</i>	127
Tabel 5.1	Rekapan Numerik Plaxis 2D Hasil Penurunan Akibat Pembebanan 20 kN.....	136
Tabel 5.2	Hasil Analisis Eksperimen Dengan Plaxis 2D <i>Subgrade</i> Dengan Geofom Kondisi Kering	137
Tabel 5.3	Hasil Analisis Eksperimen Dengan Plaxis 2D <i>Subgrade</i> Dengan Geofom Kondisi Muka Air di Atas Geofom (Permukaan <i>Subgrade</i>).....	138

Tabel 5.4 Hasil Analisis Eksperimen Dengan Plaxis 2D <i>Subgrade</i> Tanah Lunak Dengan Geofom Kondisi Muka Air di Atas Geofom (Pelat Beton).....	139
Tabel 5.5 FK Timbunan Geofom Tebal 20 cm akibat Kondisi Muka Air di Bawah Geofom (Permukaan <i>Subgrade</i>).....	145
Tabel 5.6 FK Timbunan Geofom Tebal 30 cm Akibat Kondisi Muka Air di bawah Geofom (Permukaan <i>Subgrade</i>).....	147
Tabel 5.7 FK Timbunan Geofom Tebal 40 cm Akibat Kondisi Muka Air di Bawah Geofom (Permukaan <i>Subgrade</i>).....	149
Tabel 5.8 Hasil Nilai Faktor Aman Timbunan Geofom Akibat Gaya Angkat Dengan Muka Air Tanah Pada <i>Subgrade</i> Beban 20 kN.....	149
Tabel 5.9 FK Timbunan Geofom Tebal 20 cm akibat Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton).....	154
Tabel 5.10 FK Timbunan Geofom Tebal 30 cm akibat Muka Air di atas Geofom (Pada Pelat Beton).....	156
Tabel 5.11 FK Timbunan Geofom Tebal 40 cm akibat Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton).....	158
Tabel 5.12 Hasil Nilai Faktor Aman Timbunan Geofom Akibat Gaya Angkat Dengan Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pada Pelat Beton) Beban 20 kN.....	158
Tabel 5.13 Tegangan Akibat Beban Titik ($z = 0,1$ m).....	167
Tabel 5.14 Tegangan Akibat Beban Titik ($z = 0,3$ m).....	171
Tabel 5.15 Tegangan Akibat Beban Titik ($z = 0,4$ m).....	174
Tabel 5.16 Tegangan Akibat Beban Titik ($z = 0,5$ m).....	178
Tabel 5.17 Tegangan Pada Tanah Akibat Penambahan Beban dan Variasi Tebal Geofom.....	179

DAFTAR LAMPIRAN

L.1	Proses Pembuatan Bak Uji.....	199
L.2	Proses Pembuatan Pelat Beton dan Persiapan Gefoam.....	203
L.3	Hasil Pengujian Tanah.....	208
L.4	Proses Eksperimen.....	220
L.5	Analisa Pemodelan Plaxis 2D Versi 2023.....	229
L.6	Pemodelan Plaxis 2D Versi 2023.....	239
L.7	Hasil Analisa Plaxis 2D Versi 2023.....	260



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanah lunak yang ada di Indonesia diperkirakan luasnya mencakup sekitar 20 juta hektar, apabila ditampilkan dalam persen maka sekitar 10 persen luas dari daratan Indonesia (Widodo et al., 2019). Tanah yang ada di Indonesia sebagian termasuk dalam kategori tanah lempung (Panjaitan, 2017). Provinsi Riau adalah salah satu wilayah yang banyak memiliki daerah dengan kondisi tanah lempung. Letak Provinsi Riau yang terletak pada dataran rendah dan berada di daerah pesisir sehingga memiliki tanah lempung yang kurang baik (Ekawati et al., 2011). Permasalahan utama dari konstruksi jalan di atas tanah lunak adalah terbatasnya daya dukung sehingga biaya pembangunan, biaya pemeliharaan, maupun biaya peningkatan memerlukan biaya tinggi dan secara teknis tidak jarang mengalami kegagalan (J. Gultom et al., 2022). Tanah lempung merupakan kategori dari tanah lunak, yang merupakan tanah kohesif (Siska & Yakin, 2016).

Pembangunan jalan di atas tanah lunak telah lama menjadi permasalahan. Dua pendekatan utama untuk mengatasinya adalah dengan memperbaiki sifat-sifat teknik, seperti kekuatan geser dan kompresibilitas tanah dasar atau dengan cara mengurangi berat timbunan sehingga mengurangi beban pada tanah lunak. Permasalahannya sering dijumpai daya dukung yang rendah pada saat dibangun konstruksi di atas tanah lempung (Azmy et al., 2018). Pembangunan konstruksi jalan yang menjadi perhatian penting adalah *subgrade* yang harus memiliki daya dukung yang baik agar mampu memikul beban di atasnya (Anggraini & Saleh, 2022).

Kinerja tanah lunak terhadap penurunan timbunan akibat *subgrade* yang memiliki nilai daya dukung rendah. Nilai *California Bearing Ratio* (CBR) $< 6\%$ dikategorikan sebagai tanah lunak (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020). Kemampuan tanah lunak memikul timbunan di atasnya dengan beban yang diberikan

yang berdampak pada penurunan tanah. Masalah utama yang dihadapi timbunan di atas tanah lunak tanpa ada perkuatan akan mengakibatkan penurunan yang berlebihan seperti pada jenis tanah lempung yang akan mengalami penurunan yang berkepanjangan sehingga biaya yang dibutuhkan untuk pemeliharaan timbunan jalan di atas tanah tersebut menjadi mahal (A Gunawan, 2020).

Tantangan konstruksi jalan di atas tanah lunak sangat besar, sehingga diperlukan metode yang inovatif dan ramah terhadap lingkungan. Penggunaan Geofom sebagai perbaikan tanah adalah salah satu cara yang digunakan. Geofom adalah jenis bahan pengisi ringan dan termasuk kategori ringan, sudah digunakan sejak tahun 1970-an di seluruh dunia untuk mengatasi masalah penurunan (Anthony Gunawan, 2020). Penggunaan Geofom mengurangi timbunan yang dipadatkan sebesar 40%, lebih sedikit pengalihan yang dibutuhkan, sehingga lebih sedikit perusakan tanah asli, sehingga hal ini tidak hanya menghemat waktu konstruksi dan juga merupakan solusi yang layak secara ekonomi dan lingkungan (Anthony Gunawan, 2020). *Expanded polystyrene* (EPS) atau Geofom adalah *polystyren* yang dibentuk menjadi seluler dengan *density* rendah antara 11,2 hingga 45,7 kg/m³ (Srivastava et al., 2018). Sebagai perbandingan *density* tanah adalah 1.000 kg/m³ – 2.000 kg/m³ (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Meskipun ringan, kekakuan Geofom sebanding dengan pasir lepas (Anthony Gunawan, 2020). Nilai kuat tekan pada regangan 1% antara 15 – 128 kPa dan nilai kuat lentur antara 69 – 517 kPa (Anthony Gunawan, 2020), dibandingkan dengan tanah lunak nilai kuat tekan antara 25 kPa – 50 Kpa (Terzaghi & Peck, 1967). Geofom dapat digunakan sebagai pengganti tanah lunak yang ada atau sebagai timbunan di atas tanah lunak sebagai *subgrade* untuk perkerasan jalan (Anthony Gunawan, 2020).

Terdapat dua jenis Geofom yaitu EPS (*Expanded polystyrene*) dan XPS (*Extruded polystyrene*). EPS Geofom yang digunakan untuk aplikasi geoteknik disebut EPS blok Geofom, karena penggunaannya dalam bentuk blok-blok (J. Gultom et al., 2022). Aplikasi EPS blok Geofom pada bidang teknik sipil adalah mengurangi timbunan, mengurangi tekanan lateral pada dinding penahan tanah dan di bawah pelat *approach*, dan untuk mengurangi tekanan akibat kembang susut tanah

(Umashankar et al., 2015). Dengan memanfaatkan Geofom sebagai *subgrade*, tegangan tambahan yang diakibatkan oleh tanah dapat diminimalkan sehingga besarnya penurunan juga dapat diminimalkan (A Gunawan, 2020).

Geofom digunakan untuk menggantikan tanah lunak, karena materialnya mampu berdiri secara vertikal tanpa memperhitungkan gaya lateral (A. Gunawan, 2021). Proyek Geofom pertama di dunia adalah di Norwegia, Geofom digunakan sebagai timbunan untuk mengurangi penurunan tanah. Dari mulai pemasangan awal Geofom untuk timbunan kemudian dilakukan pengujian terhadap Geofom tersebut. Hasil pengujiannya Geofom tersebut masih berkinerja memuaskan dan kualitas materialnya masih dapat ditoleransi (A Gunawan, 2020). Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan Geofom untuk timbunan tanah baik digunakan. Keunggulan lain dari Geofom adalah dapat meminimalkan pekerjaan perbaikan tanah karena Geofom dapat dipasang dalam kondisi cuaca apapun, tidak seperti timbunan tanah dimana pemadatan tidak dapat dilakukan apabila kondisi hujan (A Gunawan, 2020). Pemasangan Geofom juga tidak memerlukan mesin atau peralatan berat hal ini tentu semakin mengurangi biaya konstruksi (A Gunawan, 2020).

Manfaat utama dari kelebihan Geofom adalah material yang sangat ringan dan bahkan jauh lebih ringan daripada air, akibatnya tentu akan mengapung ketika terendam air sehingga menghasilkan gaya angkat (A Gunawan, 2020). Apabila Geofom dirancang berada di bawah permukaan air, maka Geofom dapat ditambatkan untuk melawan gaya apung (A Gunawan, 2020). Perilaku tanah lunak dengan timbunan Geofom sebagai *subgrade* jalan akibat beban yang diberikan, dengan faktor aman terhadap penurunan timbunan $> 1,4$. Faktor aman terhadap gaya angkat akibat kondisi terendam air, yang berpengaruh terhadap Geofom sebesar 1,2 (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Penelitian terkait Geofom sudah mulai banyak dilakukan baik itu untuk dinding penahan tanah, perkuatan *box culvert*, timbunan tanah dan lain sebagainya. Beberapa penelitian terkait Geofom pada *subgrade* adalah (A Gunawan, 2020) penggunaan Geofom mengurangi timbunan yang dipadatkan sebesar 40%, tetapi tidak termasuk pengaruh perubahan muka air tanah dalam penelitian mereka.

Penelitian (Khalaj et al., 2019) menentukan ketebalan tanah timbunan dengan Geofom pada kondisi beban siklik, tetapi tidak memperhitungkan perubahan muka air tanah akibat pembebanan. Penelitian (Srivastava et al., 2018) perbandingan penggunaan timbunan tanah pada gorong-gorong jalan dengan Geofom dan tanpa Geofom. Penelitian ini hanya fokus pada penurunan tanah tanpa memperhitungkan perubahan muka air tanah. Penelitian (Shafikhani et al., 2017) mengganti timbunan pada jembatan dengan Geofom dan mengamati penurunan yang terjadi pada jembatan akibat pengaruh suhu.

Geofom yang termasuk kategori ringan akibatnya akan mengapung ketika terendam air sehingga menghasilkan gaya angkat. Pentingnya dilakukan penelitian ini yaitu Penggunaan Geofom Sebagai Timbunan Tanah Lunak Terhadap *Settlement* dan Perubahan Level Muka Air Pada *Subgrade* Tanah Lunak.

1.2 Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah dari pemaparan latar belakang di atas adalah :

1. Akibat rendahnya daya dukung *subgrade* tanah lunak yang mengakibatkan konstruksi mengalami kerusakan dan membutuhkan biaya pemeliharaan dan biaya peningkatan yang tinggi. Untuk itu diperlukan perkuatan *subgrade* salah satunya dengan menggunakan Geofom yang inovatif dan ramah lingkungan.
2. Geofom dikategorikan sebagai timbunan ringan sehingga dapat mengurangi terjadinya penurunan tanah. Perlu dikaji perilaku *subgrade* tanah lunak dengan menggunakan variasi tebal Geofom.
3. Geofom dikategorikan sebagai timbunan ringan sehingga mengakibatkan gaya angkat pada saat terendam air. Perlu dikaji kondisi gaya angkat Geofom akibat perubahan level muka air.
4. Kerusakan pada *subgrade* terjadi akibat beban yang diterima terlalu besar akibat tegangan yang diterimanya besar. Perlu dikaji tebal Geofom sebagai timbunan pada *subgrade* tanah lunak yang memenuhi persyaratan faktor keamanan.

1.3 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dipaparkan pada latar belakang, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Berapakan tebal Geofom yang digunakan sebagai pengganti timbunan pada *subgrade* tanah lunak yang menghasilkan penurunan terkecil akibat pembebanan dan perubahan level muka air ?
2. Bagaimana persamaan matematika timbunan dengan Geofom pada *subgrade* tanah lunak pada saat kondisi kering dan kondisi terendam air ?
3. Bagaimana gaya angkat yang terjadi akibat variasi tebal Geofom pada *subgrade* tanah lunak dan persamaan matematika yang dihasilkan ?
4. Bagaimana perilaku *subgrade* tanah lunak dengan menggunakan timbunan Geofom terhadap faktor aman yang diakibatkan beban yang semakin besar dapat merusak *subgrade* ?

1.4 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dan tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Untuk menganalisis tebal Geofom yang digunakan sebagai pengganti timbunan pada *subgrade* tanah lunak yang menghasilkan penurunan terkecil akibat pembebanan dan perubahan level muka air.
2. Untuk menganalisis persamaan matematika timbunan dengan Geofom pada *subgrade* tanah lunak pada saat kondisi kering dan kondisi terendam air.
3. Untuk menganalisis gaya angkat yang terjadi akibat variasi tebal Geofom pada *subgrade* tanah lunak dan persamaan matematika yang dihasilkan.
4. Untuk menganalisis perilaku *subgrade* tanah lunak dengan menggunakan timbunan Geofom terhadap faktor aman yang diakibatkan beban yang semakin besar dapat merusak *subgrade*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Bagi pihak yang berkompeten bisa menjadi acuan dalam pelaksanaan konstruksi jalan di atas tanah lunak.
2. Bagi masyarakat bisa mengetahui konstruksi jalan di atas tanah lunak.
3. Bagi mahasiswa bisa menjadi referensi untuk penelitian konstruksi jalan di atas tanah lunak.

1.6 Batasan Masalah

Pada penelitian ini batasan masalah untuk menghindari adanya kesalahan penelitian sesuai dengan tujuan penelitian, sehingga dibatasi masalah dalam penelitian ini. Batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Sampel tanah yang digunakan adalah tanah lunak di Kota Pekanbaru, lokasinya Jl. Badak Ujung Kota Pekanbaru.
2. Geofoaam yang digunakan adalah EPS22 dengan sifat material Geofoaam berdasarkan ASTM D6817.
3. Tebal Geofoaam yang digunakan dengan variasi 20 cm, 30 cm, dan 40 cm, untuk tebal tanah lunak (*subgrade*) yaitu 60 cm. Untuk dimensi ini diambil karena keterbatasan dalam bak uji eksperimen.
4. Kondisi muka air pada timbunan Geofoaam adalah kondisi kering, kondisi muka air di bawah Geofoaam (permukaan *subgrade*), dan kondisi muka air di atas Geofoaam (terendam air).
5. Pada pelaksanaan model eksperimen yang dilakukan hanya memperhitungkan gaya vertikal.
6. Model perhitungan yang dilakukan yaitu kombinasi perhitungan secara manual, analisa hasil pengujian laboratorium, dan model perhitungan numerik menggunakan aplikasi Plaxis 2D versi 2023.

1.7 Originalitas dan Pembaruan

Penelitian dalam bentuk “Penggunaan Geofom Sebagai Timbunan Tanah Lunak Terhadap *Settlement* dan Perubahan Level Muka Air Pada *Subgrade* Tanah Lunak” sudah ada diteliti oleh peneliti terdahulu, yang membedakan dalam penelitian ini adalah tebal maksimal Geofom akibat perubahan muka air (kondisi kering dan kondisi terendam air) untuk meringankan beban konstruksi sehingga mengurangi penurunan tanah dan gaya angkat (daya apung) yang efisien pada saat kondisi kering dan kondisi terendam air.



BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Tanah Lunak

Tanah lunak adalah tanah yang apabila tidak diteliti secara berhati-hati maka dapat menyebabkan masalah kestabilan dan penurunan jangka panjang yang tidak dapat ditolerir, tanah tersebut mempunyai kuat geser yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi (Allowenda et al., 2018). Apabila tanah dasar yang ada berupa tanah lempung yang mempunyai daya dukung dan kuat geser yang rendah, maka konstruksi di sekitar tanah tersebut mengalami kerusakan (Allowenda et al., 2018).

Tanah lempung menurut Terzhaghi didefinisikan sebagai tanah yang memiliki ukuran mikroskopis sampai dengan sub mikroskopis yang asalnya dari pelapukan unsur-unsur kimiawi penyusun batuan dan memiliki sifat plastis dalam selang kadar air sedang sampai dengan luas. Tanah lempung juga memiliki sifat permeabilitas rendah, kenaikan air kapiler tinggi, sangat kohesif, memiliki sifat kembang susut yang tinggi, proses konsolidasi yang lambat, dan memiliki ukuran lebih kecil dari 0,002 mm (Hardiyatmo, 2019). Tanah lempung juga dapat diklasifikasikan menurut kadar airnya sebagai berikut (M.Das, 2010) :

Tabel 2.1. Klasifikasi Tanah Lempung Berdasarkan Kadar Air

Tanah Tipe Lempung	Kadar Air, w (%)
Kaku	21
Lembek	30 - 50
Lunak	90 - 120

Menurut Bowles, suatu tanah kohesif dapat didefinisikan sebagai kumpulan partikel mineral yang mempunyai indeks plastisitas sesuai dengan batas *Atterberg* yang pada waktu mengering membentuk suatu massa yang bersatu sedemikian rupa sehingga diperlukan gaya untuk memisahkan setiap butiran mikroskopisnya. Campuran yang diperlukan untuk membuat suatu deposit tanah menjadi bersifat kohesif adalah mineral lempung. Besarnya kohesi tergantung pada ukuran relatif dan

jumlah berbagai butiran tanah. Pada umumnya, apabila lebih dari 50 % dari deposit mengandung partikel-partikel berukuran 0,002 mm dan lebih kecil, deposit tersebut disebut lempung. Lempung murni secara alamiah jarang dijumpai, lempung selalu terkontaminasi dengan lanau dan partikel-partikel pasir halus (Cui, 2018).

Lempung terdiri atas butiran yang sangat kecil dan memiliki sifat kohesi dan plastisitas. Sifat ini tidak ditemukan pada pasir dan kerikil. Sifat kohesi berarti butiran-butirannya saling menempel, sedangkan plastisitas adalah sifat yang memungkinkan tanah dapat berubah bentuk tanpa mengubah volume dan tidak menyebabkan retak atau pecah (Wesley, 2012). Lempung adalah istilah yang digunakan pada tanah berbutir halus yang bersifat kohesif, plastis, dan tidak mengandung sejumlah bahan kasar yang dapat terlihat (Wesley, 2012). Tanah lempung sangat keras dalam kondisi kering dan bersifat plastis pada kondisi kadar air sedang (M.Das, 2010).

Nilai porositas, angka pori, dan berat satuan tanah tipikal alami berdasarkan Terzaghi adalah (Hardiyatmo, 2019):

Tabel 2.2. Porositas, Angka Pori, dan Berat Satuan Tanah-Tanah Tipikal Alami

No	Uraian	Porositas (n) (%)	Angka Pori (e)	Kadar Air (w) (%)	Berat Satuan (kN/m ³)	
					γ_d	γ_{sat}
1.	Pasir seragam, lepas	46	0,85	32	14,02	18,54
2.	Pasir seragam, padat	36	0,51	19	17,16	20,50
3.	Pasir berbutir campuran, lepas	40	0,67	25	15,59	19,52
4.	Pasir berbutir campuran, padat	30	0,43	16	18,24	21,18
5.	Tillglasial, sangat berbutir campuran	20	0,25	9	20,79	22,65
6.	Lempung glasial lunak	55	1,2	45	-	17,36
7.	Lempung glasial kaku	37	0,6	22	-	20,30
8.	Lempung organik agak kaku	66	1,9	70	-	15,50
9.	Lempung organik sangat lunak	75	3,0	110	-	14,02
10.	Beton lunak	84	5,2	194	-	12,45

Sumber : (Terzaghi & Peck, 1967)

Karakteristik tanah lempung lunak yaitu bersifat kohesif, daya dukung relatif rendah, penurunan yang relatif besar, waktu pemampatan lama, nilai *indeks plastisitas* tinggi, kadar air relatif tinggi, gaya geser kecil, permeabilitas rendah, dan potensi kembang susut yang tinggi (Hamdhan & Iskandar, 2019). Kondisi pada tanah lunak apabila tidak diteliti secara hati-hati bisa menyebabkan permasalahan yaitu ketidakstabilan dan penurunan jangka panjang yang dapat merusak konstruksi yang ada di atasnya (Anjani et al., 2021).

Kekuatan geser dalam, mempunyai variabel kohesi dan sudut geser dalam. Sudut geser dalam merupakan sudut yang dibentuk dari hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser di dalam material tanah atau batuan. Sudut geser dalam (ϕ) dan kohesi (c) merupakan faktor dari kuat geser tanah yang menentukan ketahanan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja. Parameter ini diperoleh dari pengujian *Triaxial Test* dan *Direct Shear Test*. Bowles menyatakan semakin besar sudut geser dalam suatu tanah maka tanah tersebut akan lebih tahan menerima tegangan luar yang diberikan pada tanah tersebut (Susilo et al., 2018). Nilai sudut geser dalam (ϕ) sesuai dengan jenis tanah adalah sebagai berikut (M.Das, 2010) :

Tabel 2.3. Hubungan Antara Sudut Geser Dalam dengan Jenis Tanah

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

Sumber : (Bowles, 1984)

Bowles (1995) menyarankan korelasi N_{60} dengan berat volume (γ) dan parameter lain untuk jenis tanah kohesif seperti disajikan Tabel berikut :

Tabel 2.4. Korelasi N_{60} Untuk Tanah Kohesif

N_{60} (blows)	Tanah Kohesif				
	< 4	4 - 6	6 - 15	16 - 25	>25
γ (kN/m ³)	14 - 18	16 - 18	16 - 18	16 - 20	>20
Cu (kN/m ²)	< 25	20 - 50	30 - 60	40 - 200	>200
Konsistensi	Sangat lunak	lunak	sedang	kaku	keras

Sumber : (Bowles, 1984)

Kuat geser (τ) tanah lunak didefinisikan mempunyai konsistensi lunak yaitu berkisar 12,5 kPa – 25 kPa dan dikategorikan sangat lunak dengan nilai < 12,5 kPa (Bowles, 1984). Apabila daya dukung pada tanah dasar rendah atau nilai penurunan tanah yang terjadi terlalu besar maka para ahli geoteknik memilih metoda perbaikan tanah yang sesuai, atau merekomendasikan penggunaan struktur untuk untuk meningkatkan daya dukung (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Nilai-nilai berat jenis dari berbagai jenis tanah pada Tabel berikut:

Tabel 2.5. Berat Jenis Tanah (*specific gravity*)

Macam Tanah	Berat Jenis (Gs)
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

Sumber : (Hardiyatmo, 2019)

Konsistensi lempung dan tanah kohesif lainnya biasanya dinyatakan dengan istilah lunak, sedang, kaku, atau keras. Ukuran kuantitatif konsistensi yang paling langsung adalah beban per satuan luas dimana contoh tanah bebas (*unconfined*) berbentuk silinder atau prismatic runtuh dalam uji pemampatan sederhana (Susilo et al., 2018). Besaran ini dikenal sebagai kekuatan kompresif bebas (*unconfined compressive strength*) tanah. Nilai kekuatan kompresif, yang berkaitan dengan aneka derajat konsistensi berdasarkan Terzhagi dan Peck adalah sebagai berikut :

Tabel 2.6. Konsistensi Lempung dalam Bentuk Kekuatan Kompresip Bebas

Konsistensi	Kekuatan Kompresip Tanah (qu) (kg/cm ²)
Sangat lunak	< 25
Lunak	25 – 50
Sedang	50 – 100
Kaku	100 – 200
Sangat kaku	200 – 400
Keras	>400

Sumber : (Terzaghi & Peck, 1967)

Indeks plastisitas (PI) merupakan interval kadar air dimana tanah masih bersifat plastis, sehingga indeks plastisitas menunjukkan sifat keplastisan suatu tanah. Apabila tanah mempunyai PI tinggi maka tanah tersebut banyak mengandung butiran lempung. Begitu juga sebaliknya, apabila PI rendah seperti lanau sedikit pengurangan kadar air berakibat tanah menjadi kering. Batasan tentang indeks plastisitas, sifat, macam tanah, dan kohesi diberikan oleh *Atterberg* menurut Jumikis (1962) adalah sebagai berikut:

Tabel 2.7. Nilai Indeks Plastisitas dan Macam Tanah

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

Sumber : (Hardiyatmo, 2019)

Konsistensi tanah dapat diubah sesuai dengan yang diinginkan dengan menambah atau mengurangi air. Misalnya, apabila kadar air tanah lempung terganggu berangsur-angsur dikurangi dengan pengeringan perlahan-lahan, maka lempung akan menjalani perubahan dari keadaan cair melalui keadaan plastis, dan akhirnya ke keadaan padat (Terzaghi & Peck, 1967). Kadar air dimana tanah lempung yang berbeda mengalami proses perubahan dari satu keadaan ke keadaan lainnya akan sangat berbeda. Oleh kerana itu kadar air pada peralihan-peralihan ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan membandingkan berbagai macam lempung. Kadar air yang berkenaan dengan perbatasan antara keadaan-keadaan konsistensi tersebut disebut batas-batas *Atterberg* (Terzaghi & Peck, 1967).

Untuk menentukan parameter tanah dapat dilihat dari nilai *Modulus Young* (E), *passion ration* (ν), sudut geser (ϕ), dan kohesi (c) (Hardiyatmo, 2019). Nilai *Modulus Young* menunjukkan besarnya nilai elastisitas tanah yang merupakan perbandingan antara tegangan yang terjadi terhadap regangan. Nilai ini dapat diperoleh dari pengujian *Triaxial test* (Hardiyatmo, 2019). Modulus elastisitas menggambarkan kekakuan suatu material, artinya apabila suatu material memiliki nilai modulus elastisitas yang besar, maka semakin kecil perubahan bentuk yang terjadi apabila diberi tegangan tertentu. Nilai modulus elastisitas (E) secara empiris dapat ditentukan dari jenis tanah dan data sondir sebagai berikut (Hardiyatmo, 2019):

Tabel 2.8. Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah Lempung

Konsistensi	E (kN/m ²)
Sangat lunak	300 – 3000
Lunak	2000 – 4000
Sedang	4500 – 9000
Keras	7000 - 20000

Sumber : (Hardiyatmo, 2019)

Apabila suatu bahan mengalami desakan, bahan tersebut akan memendek pada arah memanjang atau aksial dan mengalami pengembangan arah melebar atau lateral. Perbandingan antara regangan arah melebar dan arah memanjang dikenal sebagai perbandingan poisson (*poisson ratio*). Menurut Wesley (1997) nilai *poisson ratio* (ν) untuk tanah kohesif berkisar antara 0,3 s/d 0,5 sedangkan untuk tanah non kohesif berkisar antara 0,2 s/d 0,45. Sedangkan menurut Terzaghi (1987), nilai *poisson ratio* (ν) untuk tanah lempung berkisar antara 0,4 s/d 0,5 sedangkan untuk tanah pasir berkisar 0,3 s/d 0,35. Wesley (1997) dan Terzaghi (1987) berasumsi bahwa nilai *poisson ratio* (ν) akan menjadi semakin besar apabila tanah tersebut kondisinya semakin lunak dan lepas. Untuk nilai *poisson ratio* tanah dapat dilihat pada Tabel berikut:

Tabel 2.9. Poisson Ratio

Jenis Tanah	Poisson Ratio (ν)
Lempung jenuh	0,4 – 0,5
Lempung tak jenuh	0,1 – 0,3
Lempung berpasir	0,2 – 0,3
Lanau	0,3 – 0,35
Pasir	0,1 – 1,0
Batu	0,1 – 0,4
Umum dipakai untuk tanah	0,3 – 0,4

Sumber : (M.Das, 2010)

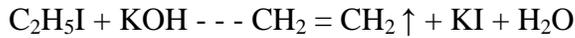
2.2 Geofom

Geofom adalah bahan atau produk yang memiliki struktur sel tertutup, yang dibuat di pabrik atau di tempat dengan proses *expansion internal* yang menghasilkan material dengan tekstur sel tertutup dan berisi gas (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Bahan Geofom termasuk polimer (plastik), kaca (kaca seluler), dan busa yang mengandung semen, dan karena Geofom mencakup berbagai macam bahan dan produk maka dalam prakteknya perlu untuk menyatakan bahan dan produk Geofom tertentu (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Sebagai contoh, ketika menentukan geotekstil, maka perlu disebutkan polimernya, teknik pembuatan (anyaman atau bukan anyaman), dan berat atau massa yang diinginkan per satuan luas geotekstil (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

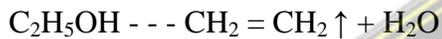
Sebagian besar bahan Geofom adalah polimer dengan busa polistiren yang paling umum. Dua jenis busa polistiren adalah *Expanded Polystyrene* (EPS) dan *Extruded Polystyrene* (XPS). Keduanya secara kolektif disebut oleh *American Society For Testing and Material* (ASTM) D 578 sebagai *Rigid Cellular Polystyrene* (RCPS) (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). EPS adalah busa polimer yang berwarna putih dan dapat dijumpai pada beberapa produk konsumen yang sudah dikenal seperti *coffe cups* dan kemasan bantal (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Polistiren dibuat melalui polimerisasi etilena dan benzene. Etilena berasal dari gas alam atau produk minyak bumi, sedangkan benzene adalah produk sampingan dari tungku kokas (Lin et al., 2010). Polimerisasi ini dalam katalis yang sesuai

membentuk etil benzene, setelah kompleks etil benzene dipecah menjadi atom hydrogen antarmolekul. Berubah menjadi stirena dan setelah itu berubah menjadi bahan plastic padat melalui polirekasi (Lin et al., 2010). Di laboratorium, etana dapat dibuat dengan memanaskan iodoetilena dengan larutan alkohol kalium hidroksida seperti yang ditunjukkan pada reaksi kimia berikut (Lin et al., 2010):

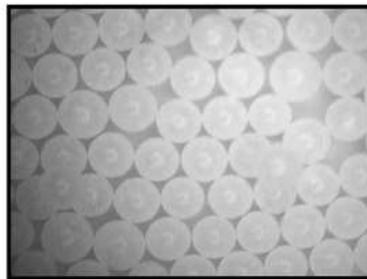


Apabila menggunakan alkohol yang dihidrasi oleh minyak vitriol dan arsenic pentoksida seperti yang ditunjukkan pada reaksi kimia berikut (Lin et al., 2010) :



Tahap pertama menggunakan agen yang dapat diperluas, mengirim bahan baku ke dalam mesin bertekanan untuk mengembang 10 – 20 kali lipat. Biasanya setelah pencetakan dengan *vacuum-heating*, menghasilkan papan datar dengan ketebalan 2 – 5 mm menjadi peralatan makan sekali pakai, *seafood trays*, dan lain-lain (Lin et al., 2010). Di sisi lain, EPS dibuat dengan menambahkan polistiren ke dalam silinder berbusa bertekanan dan kemudian dinaikkan tekanan dan suhu (Lin et al., 2010). Setelah bahan baku mencapai volatilisasi, kemudian dapat berbusa sesuai dengan kebutuhan. Bahan busa yang mengembang dikirim ke dalam cetakan, dan uoa digunakan untuk memanaskannya ke titik leleh untuk menghasilkan produk akhir (Lin et al., 2010).

Butiran *foaming* EPS dan produk jadi EPS yang berbentuk material komposit putih dengan celah yang kompak seperti Gambar 2.1 – 2.3 berikut (Lin et al., 2010) :



Gambar 2.1. Bahan Baku Stirena Yang Tidak Berbusa



Gambar 2.2. Butiran Berbusa Dari Stirena



Gambar 2.3. EPS Blok *Geof*oam

Butiran polistiren yang mengembang disebut sebagai *pre-puff*. Setiap partikel *pre-puff* mengandung banyak sel tertutup dengan sekitar 98% dari total volume yang terdiri dari rongga berisi gas. Kepadatan *Pre-Puff* dapat bervariasi dalam batas-batas tertentu yang akan mempengaruhi densitas produk akhir. Kepadatan EPS Blok Geof foam dapat menjadi property indeks yang penting dan berguna (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Tahap kedua terdiri atas pemuai lebih lanjut dari *pre-puff* dengan memanaskan menggunakan uap di dalam cetakan dingin tetap (*fixed-wall mold*). *Pre-Puff* menyatu selama proses tambahan ini (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Geof foam adalah jenis *polystyrene* bahan buatan manusia, berupa butiran bulat warna putih dengan diameter 1 – 2 mm (Anthony Gunawan, 2022). Butiran *polystyrene* memuai menggunakan bahan pemuai, dimana pada saat memuai *polystyrene* hanya membentuk 2% dari volume yang terbentuk sedangkan 98% lainnya hanyalah udara, hal ini yang membuat EPS menjadi bahan yang sangat ringan (Anthony Gunawan, 2022).

Penggunaan EPS blok Geofom untuk timbunan jalan sebagai alternatif perbaikan tanah meningkat selama tahun 1990-an karena hal berikut (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004):

1. Waktu keseluruhan untuk konstruksi jauh lebih singkat dan lebih sedikit dari metode perbaikan tanah lainnya. Singkat waktu konstruksi karena kesederhaan penempatan blok dan kemampuan untuk menampatkan balok-balok tersebut dalam kondisi buruk.
2. Timbunan dengan Geofom menghasilkan penurunan yang relatif kecil *undrained* (awal) dan penurunan konsolidasi yang relatif kecil, sedangkan metode perbaikan tanah seperti preloading biasanya menghasilkan *undrained* dan kondisi penurunan konsolidasi yang relatif besar. Penggunaan bahan timbunan yang ringan tidak akan mengurangi besarnya pemampatan sekunder (*creep*) penurunan yang akan terjadi tanpa adanya timbunan.
3. Timbunan ringan dengan Geofom mengurangi biaya perawatan karena penurunan yang lebih sedikit.
4. Daya tahan *Geofom* telah dibuktikan oleh proyek-proyek yang diselesaikan pada tahun 1970-an.

Meskipun sebagian volumenya adalah udara, EPS memiliki struktur sel tertutup sehingga membuatnya kaku dan keras. Geofom memiliki *density* yang sangat ringan dibandingkan dengan tanah yaitu berkisar antara 11,2 – 45,7 kg/m³ (Anthony Gunawan, 2022). Berdasarkan (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004) *density Geofom* sekitar 16 – 32 kg/m³ (kurang lebih 1/50 – 1/60 dari berat tanah timbunan pada umumnya) tetapi memiliki kekutan cukup untuk mendukung beban kendaran bermotor, kereta api, bangunan gedung ringan, dan dapat secara signifikan mengurangi beban pada abutment jembatan.

Relevansi *density* EPS adalah bahwa *density* EPS blok Geofom dapat menjadi indeks properti yang berguna hanya jika EPS memenuhi parameter kualitas minimum tertentu. Dengan asumsi bahwa standar kualitas yang sesuai terpenuhi, *density* EPS blok Geofom terbukti berkorelasi dengan baik dengan sifat mekanik dan termal yang relevan dengan geoteknik (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Sebagai contohnya perilaku kompresi secara umum menunjukkan ketergantungan utama pada *density* EPS. Oleh karena itu *density* EPS blok Geofom dapat digunakan sebagai indeks propertis untuk memperkirakan beberapa sifat mekanik dan termal propertis asalkan EPS memenuhi standar minimum yang ditentukan dalam *American Association of State Highway and Transportation Official* (AASHTO) (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Dalam situasi pemindahan dan penggantian tanah tanpa penggunaan biaya tambahan, penggunaan Geofom blok EPS dapat menghasilkan penghematan biaya dibandingkan dengan jenis bahan timbunan ringan dan bahan timbunan konvensional lainnya, karena densitas Geofom adalah 1/10 – 1/30 kepadatan *foamed concrete* dan 1/100 dari kepadatan tanah (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Semakin rendah densitas Geofom blok EPS dapat meringankan biaya pemindahan tanah lunak (meliputi masalah dan biaya pembuangan) dan kemungkinan kebutuhan akan sistem pendukung penggalian, pelebaran galian, dan pengeringan (*dewatering*) sementara (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Geofom memiliki tampilan seperti *styrofoam*, tetapi Geofom jauh lebih kaku daripada *Styrofoam* sehingga cocok untuk penggunaan konstruksi. Untuk rekayasa teknik, beban kerja yang diterapkan pada Geofom dibatasi hingga 1% regangan, karena Geofom juga mengalami *crack* sehingga dijaga 1% regangan (Anthony Gunawan, 2020). Sebagai contoh, dengan menggunakan EPS19 berdasarkan ASTM D6817 dimana EPS19 memiliki kekakuan yang sama dengan pasir lepas dan bertahan sebesar 40 kPa sebelum mengalami perubahan bentuk sebesar 1% (A Gunawan, 2020). Sifat-sifat ini cukup untuk aplikasi jalan yang umum dimana gabungan perkerasan dan beban lalu lintas tidak melebihi 30 kPa (A Gunawan, 2020).

Beberapa tipe EPS Geofom yang dapat digunakan sebagai material konstruksi menurut ASTM D6817 dapat dilihat pada Tabel berikut:

Tabel 2.10. ASTM D6817 *Physical Property Requirement of EPS Geofoam*

<i>Type</i>	EPS12	EPS15	EPS19	EPS22	EPS29	EPS39	EPS46
<i>Density, min, kg/m³</i>	11,2	14,4	18,4	21,6	28,8	38,4	45,7
<i>Compressive Resistance,min kPa at 1%</i>	15	25	40	50	75	103	128
<i>Compressive Resistance,min kPa at 5%</i>	35	55	90	115	170	241	300
<i>Compressive Resistance,min kPa at 10%</i>	40	70	110	135	200	276	345
<i>Flexural Strength,min,kPa</i>	69	172	207	240	345	414	517
<i>Oxygen index,min,volume %</i>	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0

Sumber : (ASTM, n.d.)

Spesifikasi EPS blok Geofoam berdasarkan AASTHO dapat dilihat pada Tabel berikut (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004) :

Tabel 2.11. Spesifikasi EPS blok Geofoam berdasarkan AASTHO

Properti		Tipe			
		EPS40	EPS50	EPS70	EPS100
Densitas blok	Kg/m ³	16	20	24	32
Tegangan elastis	kPa	40	50	70	100
Modulus young	MPa	4	5	7	10
Spesifikasi <i>Geofoam</i> berdasarkan ASTM D6817 yang memenuhi spesifikasi AASTHO		EPS19	EPS22	EPS29	EPS39

Sumber : (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004)

Geofoam diproduksi dalam bentuk balok, tergantung pada mesin cetaknya. Balok Geofoam dapat diproduksi dalam ukuran seperti 2,0 m x 1,0 m x 0,5 m. Beberapa mesin cetak yang lebih besar dapat memproduksi menghasilkan balok sebesar 8,0 m x 1,0 m x 1,0 m. Balok-balok ini mudah dikerjakan dengan berbagai macam mesin bentuk dan ukuran. Untuk balok EPS19 yaitu 3,0 m x 1,0m x 0,5m, beratnya kurang dari 30 kg dan dapat dengan mudah diangkut dan dipasang oleh pekerja tanpa menggunakan alat berat (Anthony Gunawan, 2020).

Geofoam untuk aplikasi teknik sipil biasanya memiliki dimensi 0,5; 1,0; 2,5 – 3,0 m dengan berat sekitar 25 – 30 kg. EPS blok Geofoam diproduksi dalam berbagai macam *density* dan karakteristik kekuatan. Jenis EPS blok Geofoam diklasifikasikan berdasarkan *density* dari EPS nya sendiri (Aab et al., 2019). Dengan berbagai *density* yang bisa dipilih, EPS blok Geofoam mempunyai nilai ketahanan tekan 1% antara 15 – 128 kPa (1,5 – 12,8 ton/m²) (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Geofoam pertama kali digunakan sebagai bahan timbunan ringan untuk konstruksi jalan di Norwegia pada tahun 1972, ini diperlihatkan sebuah proyek penelitian *frost action* pada tanah bahwa blok Geofoam dapat mempertahankan beban berulang pada perkerasan jalan dan sifat materialnya masih tetap bagus berjalannya waktu (Aab et al., 2019). Ketika terjadi penurunan yang berlebihan sekitar 20 cm/tahun terjadi pada timbunan jalan yang berdekatan dengan jembatan yang didirikan di atas tiang pancang, kemudian dilakukan penggantian timbunan setebal 1 m dengan blok EPS (Geofoam) yang diletakkan 2 lapisan masing-masing dengan ketebalan 0,5 m. sebelumnya timbunan diletakkan di atas 3 m tanah gambut, 10 m lempung dan karena adanya penyesuaian jalan yang berulang-ulang mengakibatkan beban timbunan pada lapisan tanah dasar meningkat sehingga mengakibatkan percepatan penurunan dan resiko kegagalan penurunan (Aab et al., 2019). Sehingga dengan mengganti 1 m timbunan dengan blok Geofoam, dimana hampir 100 kali lebih ringan dari bahan timbunan yang diganti, akibatnya penurunan tanah berhasil dihentikan (Aab et al., 2019).

Proyek-proyek yang menggunakan Geofoam telah banyak dilakukan diberbagai Negara Eropa dan Asia (Aab et al., 2019). Indonesia juga telah menggunakan Geofoam dalam pembangunan jalan tol Cileunyi-Sumedang-Dawuan (Cisumdawu). Geofoam digunakan pada pembangunan Tol Cisumdawu seksi 5A di desa Cipamekar, Kecamatan Conggeang, Kabupaten Sumedang (Laksono, 2023). Tanah pada lokasi tersebut labil dan berair sehingga tidak bisa ditangani dengan urugan atau konstruksi biasa. Ini yang pertama dikerjakan dengan skala massal dengan volume hampir 40 ribu m³. Timbunan ringan ini akan mengurangi resiko longsor (Laksono, 2023).

Pada proyek tol Cisumdawu seksi 5A, pada sta 40 + 200 terjadi longsor besar pada timbunan yang terjadi diatas batu lempung (*clay shale*) yang mengandung lapisan batu gamping abu-abu tua, yang terkadang juga ditemukan batu pasir sehingga digunakan Geofom untuk mengatasinya (Paulus P Rahardjo et al., 2023). Pada STA 40 + 125 dilakukan pengambilan sampel tanah *borehole* sampai kedalam 20,00 m. Tipikal tanah pada sta tersebut adalah kedalaman 0,00 – 2,50 m, jenis tanahnya lanau lempungan sisipan batu bolder, warna coklat, konsistensi sangat kaku (Paulus P Rahardjo et al., 2023). Pada kedalaman 2,50 – 20,00 m, jenis tanahnya adalah lempung sisipan batu lempung, warna abu tua, konsistensi sangat keras (Paulus P Rahardjo et al., 2023).

Parameter tanah lempung pada lokasi tersebut adalah untuk *fresh clayshale* nilai kohesi (c') sebesar 30 kPa dan nilai sudut geser (ϕ) sebesar 20° . Untuk *weathered clayshale* nilai kohesi (c') sebesar 13 kPa dan nilai sudut geser (ϕ) sebesar 20° (Paulus P Rahardjo et al., 2023). Spesifik Geofom yang digunakan adalah EPS 22 dengan melakukan kajian stabilitas lereng model numerik dengan memberi beban *line load* (*pavement* 10 kPa dan *live load* 15 kPa), diperoleh nilai faktor aman stabilitas lereng sebesar 1,28 (Paulus P Rahardjo et al., 2023).

Struktur perkerasan jalan di atas Geofom biasanya terdiri dari pelat beton bertulang dengan ketebalan 10 – 15 cm dengan lapisan pondasi bawah sekitar 35 cm dan bagian atas lapisan aspal. Berikut gambar tipikal melintang jalan dengan menggunakan Geofom disajikan Gambar 2.4 (Aab et al., 2019).



Gambar 2.4. Penampang Melintang Timbunan Jalan Dengan Geofom

Jalan Tol Yamagata di Jepang, daerah tanah longsor pada struktur jalan setinggi 16 m dibangun dengan dinding vertikal di kedua sisi yang fungsinya untuk

melebarkan jalan. Pada kondisi ini pelat beton bertulang setebal 10 cm dicor untuk setiap 3 m tinggi timbunan balok EPS (Geofoam) untuk mengikat struktur dan meratakannya apabila ada perbedaan tingkat kecil saat menempatkan balok Geofoam (Aab et al., 2019). Gambar 2.5 berikut adalah Gambar Geofoam pada pekerjaan Jalan Tol Yamagata di Jepang.



Gambar 2.5. Jalan Tol Yamagata, Jepang Dengan Dinding Samping Vertikal
(Aab et al., 2019)

Pada sebagian besar Geofoam yang digunakan untuk aplikasi teknik sipil, Geofoam akan mengalami beban mati konstan setelah konstruksi (Wang et al., 2019). Beban mati pada sistem perkerasan yaitu gravitasi tegangan akibat sistem perkerasan. Beban hidup yaitu beban lalu lintas, NCHRP merekomendasikan faktor keamanan sebesar 1,2 untuk analisis beban lalu lintas. Tegangan batas elastis minimum yang diperlukan Geofoam adalah tegangan yang sesuai dengan 1% regangan (Abdullah Tolga Özer & Akmay, 2019). Geofoam juga mengalami *creep* yang merupakan deformasi material yang lambat dan terus menerus di bawah tekanan konstan, secara signifikan tergantung pada tingkat tegangan (Wang et al., 2019).

Aplikasi Geofoam yang sensitif terhadap deformasi, deformasi *creep* harus dipertimbangkan selama desain. Misalnya ketika Geofoam digunakan sebagai timbunan perkerasan jalan di atas tanah lunak, pertimbangan utamanya adalah pemilihan dan spesifikasi yang tepat dari *properties* Geofoam (EPS) sehingga berat Geofoam dapat mendukung sistem perkerasan di atasnya tanpa pemampatan yang berlebihan dan bergantung pada waktu rangkai (*creep*) (Wang et al., 2019).

Berbagai literatur mencatat bahwa Geofom mempunyai keunggulan, sebagai berikut (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004) :

1. Ringan

EPS Geofom diproduksi dengan *density* antara 12 hingga 45 kg/m³. Untuk perbandingannya dengan material lainnya dimana *density* tanah 1.000-2.000 kg/m³, *density* beton 2.000-2.400 kg/m³, *density* bata merah 1.500 kg/m³, dan *density* bata ringan 500-600 kg/m³.

2. Kuat

Dengan berbagai *density* yang bisa dipilih, EPS Geofom mempunyai nilai ketahanan tekan 1% antara 15-128 kPa (1,5 – 12,8 ton/m²).

3. Penanganan yang mudah

EPS Geofom *disupply* dalam bentuk balok maupun lembaran yang sudah disesuaikan dengan kebutuhan sehingga saat sampai di lokasi proyek hanya tinggal menyusunnya saja. Perubahan bentuk di lapangan juga sangat mudah hanya dilakukan dengan menggunakan alat yang sederhana.

4. Mempersingkat waktu kerja

Waktu kerja proyek juga lebih cepat karena di lapangan tidak memerlukan beberapa proses hanya tinggal disusun sesuai pekerjaan, misalnya pada pekerjaan timbunan tanah memerlukan 2 proses kegiatan yaitu penghampanan tanah dan pemadatan sedangkan menggunakan EPS Geofom hanya cukup satu proses yaitu penyusunan saja.

5. Penghematan biaya

Selain waktu proyek yang lebih cepat pengerjaannya, penggunaan EPS Geofom juga dapat menghemat biaya pada *supporting* struktur lainnya. Dengan beban yang ringan, tidak diperlukan struktur penunjang yang besar.

6. *Stability*

Penggunaan EPS Geofom yang tepat dianggap sebagai material yang permanen.

7. Insulasi

EPS Geofom merupakan insulasi panas maupun suara yang sangat baik.

8. *Sustainability*

EPS bisa dijadikan solusi geoteknik yang disebut Geofom dapat menyelamatkan alam dari pengerukan tanah. Seperti yang terjadi sekarang untuk *quarry* itu diambil dari gunung, bukit, dan pantai yang materialnya diambil baik itu pasir atau tanah untuk konstruksi bangunan sipil. Beban yang ringan, EPS Geofom tidak membutuhkan *delivery* dengan truk yang berukuran besar sehingga dapat mengurangi konsumsi bahan bakar dan memperkecil polusi yang terjadi.

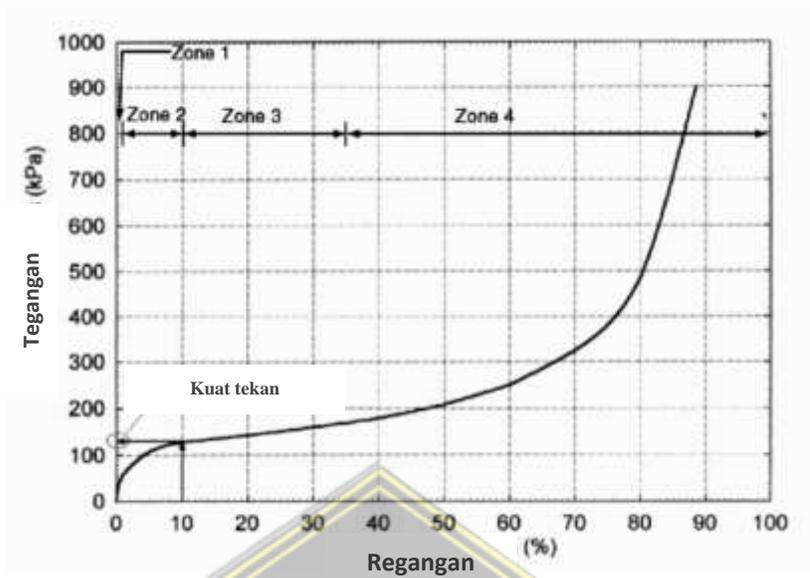
9. *Recycle*

Dapat didaur ulang tanpa memerlukan proses kimia dan ramah lingkungan.

Hubungan antara tegangan dan regangan EPS Geofom, dimana pengujian pembebanan menggunakan *unconfined uniaxial compression* untuk EPS blok Geofom merupakan pengujian utama yang umum digunakan untuk mengetahui perilaku tekan dari EPS blok Geofom (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Terdapat dua macam pengujian yaitu :

1. *Monotonic test*

Pengujian yang umum dilakukan untuk sampel EPS blok Geofom, dengan sampel berbentuk kubus dengan dimensi 50 mm, dibawah pembebanan aksial *strain-controlled unconfined* (regangan terkontrol pada pembebanan kompresi) (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Tingkat regangan adalah cepat antar 1 dan 20% per menit dengan kecepatan paling tinggi 10% per menit. Pengujian seperti ini adalah pengujian *short-term loading* (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Perilaku tegangan-regangan EPS blok Geofom ditunjukkan pada Gambar 2.6, yang dapat dibagi menjadi sebagai empat zona berikut (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004):



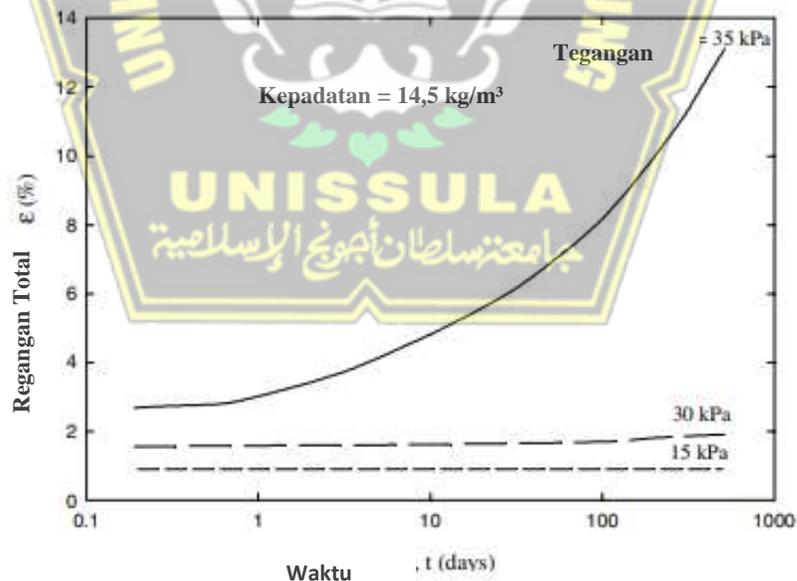
Gambar 2.6. Perilaku Tegangan-Regangan Sebesar 20 kg/m³ EPS 50 (AASTHO)
(Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004)

Pada zona 1 dapat disimpulkan bahwa perilaku linier dan elastis sampai pada regangan 1%, dimana ini dinamakan sebagai tegangan limit elastis pada parameter EPS blok Geofom *elastic limit stress* (σ_e) (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Sedangkan kemiringan awal bagian linier dari kurva tegangan-regangan zona 1 didefinisikan sebagai garis singgung awal yaitu *modulus young* (Eti). Pada zona 2 dalam grafik tegangan – regangan disebut *yielding*. Zona *yielding* terjadi pada regangan 3% - 5%. Setelah zona *yielding* terjadi perilaku linier kembali. Radius kurva pada zona *yielding* tergantung pada densitas EPS, namun pada umumnya dengan densitas yang lebih besar akan menghasilkan radius kurva zona *yielding* yang lebih kecil sehingga nilai regangan yang dihasilkan untuk zona linier setelahnya akan lebih kecil (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Parameter kuat tekan EPS, σ_c didefinisikan sebagai kuat tekan yang terjadi pada regangan 10% (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

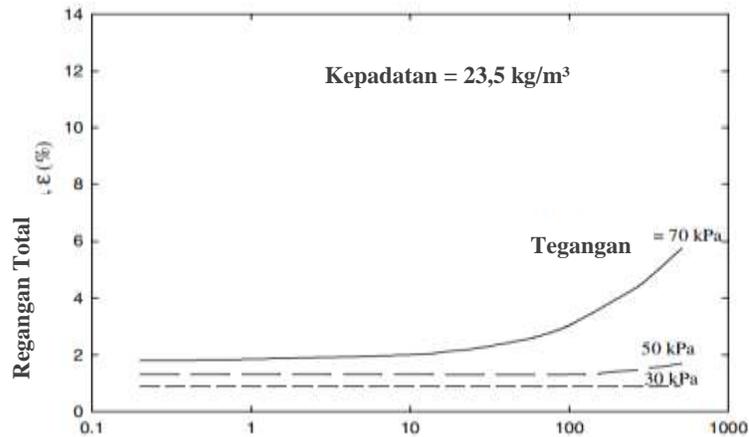
Pengujian rangkak (*creep*) berdasarkan pengujian yang dilakukan di laboratorium pada sampel EPS berukuran kecil yang dipotong dari blok Geofom yang akan digunakan dalam konstruksi. Dari pengujian tersebut dapat ditarik kesimpulan (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004):

1. Apabila tegangan yang bekerja menghasilkan regangan seketika sebesar $\leq 0,5\%$, maka rangkak yang terjadi dapat diabaikan walau dibebani selama 50 tahun atau lebih. Tegangan pada regangan $0,5\%$ menghasilkan kurang lebih 25% dari kuat tekan atau 33% dari tegangan *yield*.
2. Apabila tegangan yang bekerja menghasilkan regangan seketika sebesar antara $0,5\% - 1\%$, maka rangkak yang terjadi masih dalam batas normal untuk aplikasi timbunan ringan walau dibebani selama 50 tahun atau lebih. Tegangan pada regangan 1% menghasilkan kurang lebih 50% dari kuat tekan atau 67% dari tegangan *yield*.
3. Apabila tegangan yang bekerja menghasilkan regangan seketika sebesar $\geq 1\%$, maka rangkak yang terjadi dapat meningkat dengan cepat dan menjadi berlebih untuk aplikasi timbunan ringan. Tegangan pada regangan $\geq 1\%$ menghasilkan kurang lebih 75% dari kuat tekan.

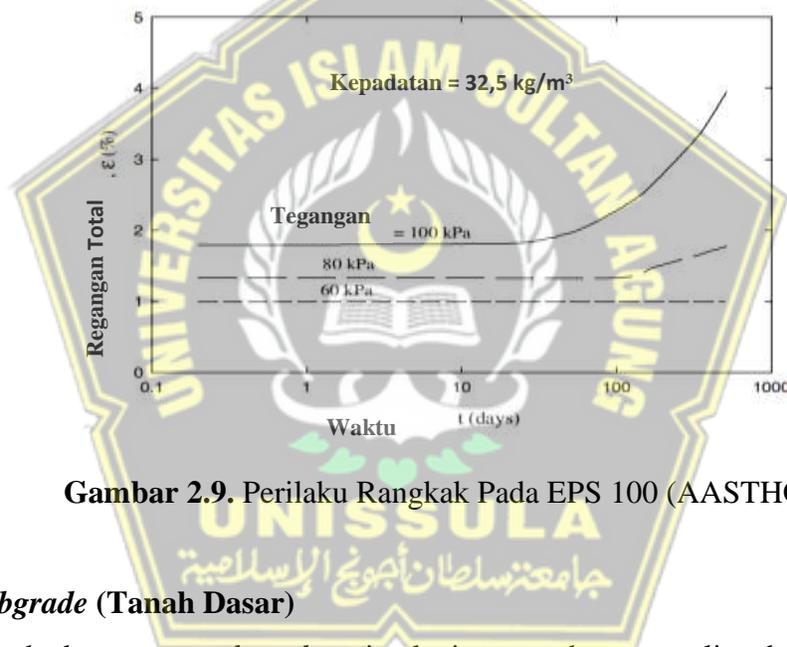
Gambar 2.7 - 2.9 berikut adalah gambar perilaku rangkak pada EPS blok Geofom (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004):



Gambar 2.7. Perilaku Rangkak Pada EPS 40 (ASTHO)



Gambar 2.8. Perilaku Rangkak Pada EPS 70 (AASTHO)



Gambar 2.9. Perilaku Rangkak Pada EPS 100 (AASTHO)

2.3 Subgrade (Tanah Dasar)

Tanah dasar atau *subgrade* yaitu lapisan tanah yang paling bawah berfungsi sebagai tempat perletakan lapisan perkerasan dan mendukung beban konstruksi jalan yang ada di atasnya (Anjani et al., 2021). *Subgrade* pada konstruksi jalan memegang fungsi penting untuk menentukan kualitas dari perkerasan jalan (Anjani et al., 2021). Tanah dasar merupakan tanah asli atau tanah timbunan biasa, atau tanah galian yang ada di atasnya yang akan digunakan untuk susunan lapis perkerasan jalan. Ada beberapa jenis kondisi dari tanah dasar sehingga ada yang dapat langsung digunakan

untuk perkerasan dan ada yang perlu untuk dilakukan perbaikan untuk menaikkan nilai daya dukung tanah dasar tersebut (Wowor et al., 2019).

Tanah dasar yang berfungsi sebagai pondasi perkerasan disamping harus memiliki daya dukung yang baik terhadap beban kendaraan juga harus memiliki stabilitas volume akibat pengaruh lingkungan yaitu air (Amran & Surandono, 2017). Regangan permanen kumulatif tanah dasar memainkan peran penting dalam struktur perkerasan, desain, dan pemeliharaan kinerja perkerasan pada jangka panjang (Yan, 2018).

Timbunan biasanya ditempatkan di atas tanah jenuk lunak yang secara normal atau paling sedikit terjadi konsolidasi pada tanah dasar. Kondisi tanah lunak adalah tanah dasar yang dapat dimampatkan dan memiliki kuat geser relatif rendah (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Desain konstruksi timbunan di atas tanah lunak didasarkan untuk menghindari kegagalan selama konstruksi dengan memberikan stabilitas yang memadai dan membatasi terjadinya penurunan pascakonstruksi (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

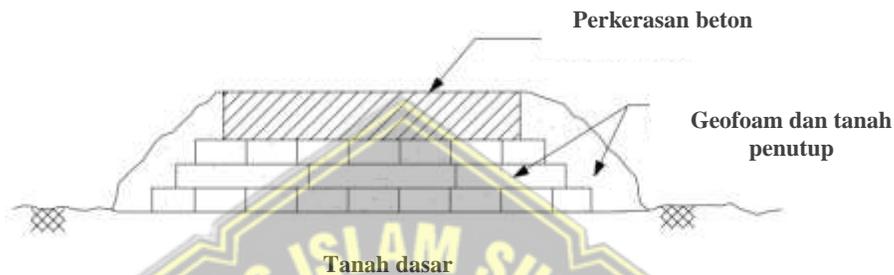
Sebuah timbunan di atas tanah dasar lunak dapat mengalami kegagalan kemampuan layanan karena penurunan total atau diferensial yang berlebihan dan berkembang dari waktu ke waktu yang menghasilkan kegagalan dini pada perkerasan (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Kegagalan dini sistem perkerasan dapat berupa permukaan perkerasan yang tidak rata dan sering terjadi retak sehingga memerlukan pemeliharaan pada jalan. Timbunan di atas tanah dasar lunak dapat mengalami kegagalan keruntuhan melalui rotasi (stabilitas lereng), penyebaran lateral, atau mekanisme kegagalan daya dukung (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Metode desain pengolahan tanah lunak yang pertama didasarkan pada peningkatan resistensi dan kekakuan sistem timbunan secara keseluruhan (bahan timbunan dan tanah dasar) untuk menahan beban yang diterapkan dan membatasi deformasi ke tingkat yang dapat diterima seperti yang disyaratkan oleh persamaan berikut (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004):

ULS = ketahanan timbunan terhadap kegagalan > beban timbunan yang menyebabkan kegagalan (2.1)

SLS = perkiraan deformasi timbunan \leq deformasi maksimum yang dapat diterima (2.2)

Komponen di atas apabila diilustrasikan dalam bentuk gambar dapat dilihat pada Gambar 2.10 berikut (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004):



Gambar 2.10. Komponen Utama Dari Timbunan EPS Blok *Geofoam*

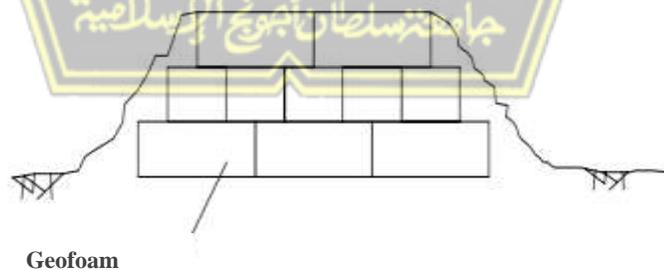
Dasar setiap metode adalah untuk memenuhi *ultimate limit state* (ULS) atau kondisi batas ultimit dan kondisi *serviceability limit state* (SLS) atau kondisi batas kemampuan pelayanan (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Desain dan konstruksi timbunan di atas tanah dasar lunak didasarkan pada menghindari kegagalan selama konstruksi dengan memberikan stabilitas yang memadai dan membatasi jumlah penurunan pasaconstruksi yang diinginkan (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Istilah kegagalan seperti yang digunakan dalam pedoman desain sementara adalah hilangnya fungsi. Kegagalan atau kehilangan fungsi dapat terjadi sebagai kegagalan kemampuan layanan (*the serviceability limit state* (SLS)) atau kegagalan keruntuhan (*the ultimate limit state* (ULS)) (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Minimal dua lapis EPS blok *Geofoam* harus digunakan untuk timbunan ringan dibawah jalan, karena satu lapis EPS blok *Geofoam* dapat bergeser akibat beban lalu lintas dan menyebabkan kerusakan dini. Ketebalan EPS blok *Geofoam* berkisar antara 610 mm – 1000 mm. Oleh karena itu direkomendasikan minimal dua EPS blok *Geofoam* dengan ketebalan 610 mm atau total tinggi awal 1,2 m dipertimbangkan untuk menentukan pengaturan timbunan awal selama proses desain. Ketinggian awal dari timbunan tanah konvensional adalah tinggi timbunan total yang diperlukan

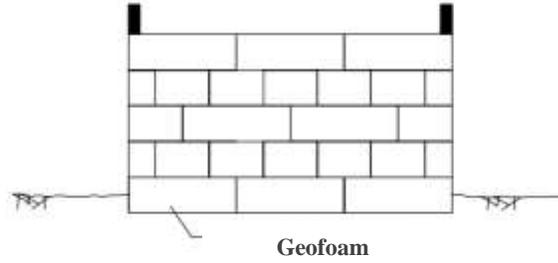
berdasarkan investigasi penyelidikan lapangan dikurangi dengan ketebalan sistem perkerasan awal sebesar 600 mm dan ketebalan dua EPS blok Geofom sebesar 1,2 m (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Prosedur desain timbunan di atas tanah dasar lunak harus memasukkan kriteria yang dapat ditoleransi seperti faktor minimum keamanan dan penurunan maksimum yang diijinkan. Nilai faktor keamanan minimum yang biasanya digunakan dalam desain geoteknik didasarkan pada prioritas dan dapat ditemukan dalam manual desain dan literature geoteknik (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Penurunan pascakonstruksi sebesar 0,3 – 0,6 m selama umur ekonomis jalan umumnya dianggap dapat ditoleransi asalkan penurunan tersebut seragam, terjadi secara perlahan dalam jangka waktu tertentu, dan tidak terjadi di samping struktur yang didukung oleh tiang pancang. Apabila penurunan pascakonstruksi terjadi dalam jangka waktu yang lama, maka kerusakan perkerasan yang disebabkan oleh penurunan dapat diperbaiki ketika perkerasan dilapis ulang (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Pedoman desain yang diusulkan terbatas pada timbunan yang memiliki penampang melintang (*cross-sectional*) sehingga kedua sisinya kurang lebih memiliki tinggi yang sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 – 2.12 berikut (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004):

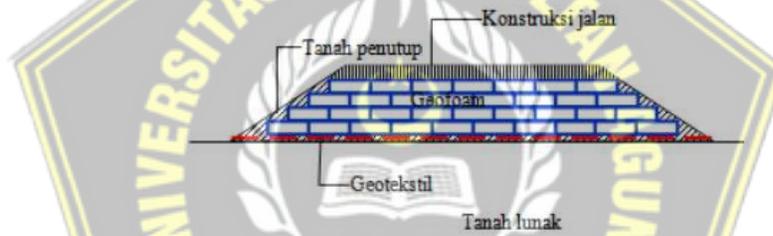


Gambar 2.11. *Sloped-side Fill* (Lereng Timbunan Miring)



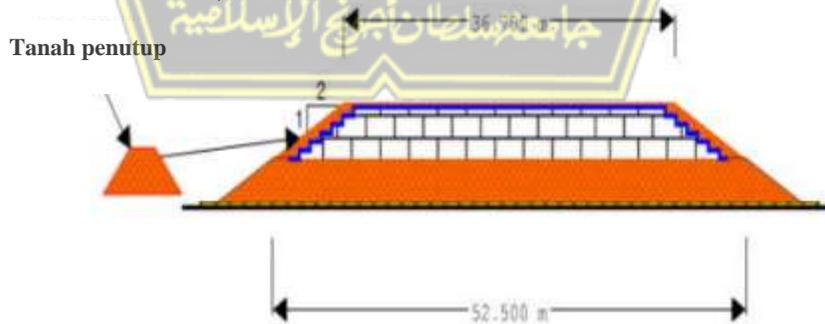
Gambar 2.12. Vertical-face Fill (Lereng Timbunan Vertikal)

Rendahnya kuat geser tanah dasar dapat menyebabkan terjadinya ketidakstabilan struktur timbunan yang dibangun di atasnya, terutama jika beban timbunan yang terlalu berat untuk dapat dipikul oleh tanah dasar yang lunak. Penggunaan Geofoam untuk timbunan pada tanah dasar dapat di lihat pada Gambar 2.13 berikut (I. Hidayat & Suhendra, 2011):



Gambar 2.13. Material Timbunan Dengan Menggunakan Geofoam

Gambar 2.14 susunan lapisan timbunan Geofoam di atas tanah lunak adalah sebagai berikut (A Gunawan, 2020) :



Gambar 2.14. Susunan Lapisan Timbunan Geofoam di Atas Tanah Lunak

Desain kemiringan timbunan berdasarkan (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004) untuk kemiringan sisi timbunan 0 (horizontal) : 1 (vertikal), 2 (horizontal) : 1

(vertikal), 3 (horizontal) : 1 (Vertikal), dan 4 (horizontal) : 1 (vertikal) (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Lebar bagian atas timbunan 11 m, 23 m, dan 34 m. Lebar ini didasarkan pada jalan 2 lajur dengan 1,8 m bahu jalan, jalan 4 lajur dengan dua bahu eksterir 3m, dan dua bahu interior 1,2 m, dan jalan 6 lajur dengan empat bahu 3m. Setiap lajur diasumsikan berukuran lebar 3,66. Ketinggian timbunan berkisar 1,5 m – 16 m. Untuk mempermudah massa timbunan diasumsikan seluruhnya terdiri dari EPS blok Geofom (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Fungsi dari *subgrade* (tanah dasar) adalah (Amran & Surandono, 2017) :

1. Sebagai lapisan terbawah sebagai pondasi perkerasan jalan.
2. Menerima beban akibat berat perkerasan di atasnya ditambah beban akibat muatan kendaraan yang menyebar.

Tinggi minimum permukaan tanah dasar di atas muka air tanah dan level muka air banjir seperti ditunjukkan pada Tabel berikut (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017):

Tabel 2.12. Tinggi Minimum Tanah Dasar di Atas Muka Air Tanah dan Muka Air Banjir

Kelas Jalan (Berdasarkan spesifikasi penyediaan prasarana jalan)	Tinggi tanah dasar di atas muka air tanah (mm)	Tinggi tanah dasar di atas muka air banjir (mm)
Jalan bebas hambatan	1200 (jika ada drainase bawah permukaan di median)	500 (banjir 50 tahun)
	1700 (tanpa drainase bawah permukaan di median)	
Jalan raya	1200 (tanah lunak jenuh atau gambut tanpa lapis drainase)	
	800 (tanah lunak jenuh atau gambut dengan lapis drainase)	
	600 (tanah dasar normal)	
Jalan sedang	600	500 (banjir 10 tahun)
Jalan kecil	400	NA

Sumber : (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017)

Tanah dasar harus memenuhi kriteria sebagai berikut (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017):

1. Harus mempunyai nilai CBR rendaman rencana minimum.
2. Dibentuk dengan benar, sesuai dengan bentuk geometric jalan.
3. Dipadatkan dengan baik pada ketebalan lapisan sesuai dengan persyaratan.
4. Tidak peka terhadap perubahan air.
5. Mampu mendukung beban lalu lintas pelaksanaan konstruksi.

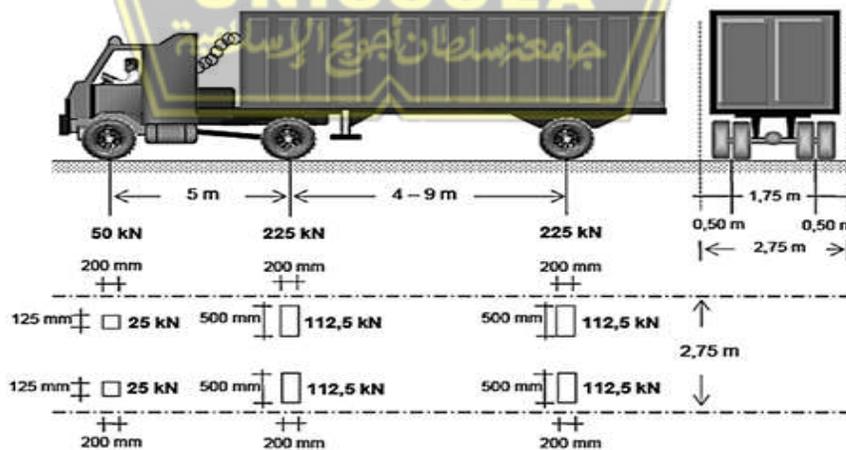
Timbunan pada tanah lunak harus ditempatkan tidak kurang dari waktu yang ditetapkan berdasarkan Tabel berikut (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017):

Tabel 2.13. Perkiraan Waktu Pra-Pembebanan Untuk Timbunan Rendah di Atas Tanah Lunak

Kedalaman (m) Hingga mencapai <i>in-situ</i> CBR 2,5%	Ketinggian Akhir Timbunan (m)		
	< 2	2 – 2,5	>2,5
	Waktu pra-pembebanan (bulan)		
< 1,5	3	4	5
1,5 – 2,0	5	6	9
2,0 – 2,5	8	10	13
2,5 – 3,0	12	14	19

Sumber : (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017)

Berdasarkan SNI 1725:2016 beban paling maksimum yang akan bekerja pada saat oprit sudah beroperasi adalah beban akibat truk (Beban T), seperti Gambar 2.15 berikut :



Gambar 2.15. Beban Akibat Truk (Beban T)

Pemodelan kondisi paling kritis, maka dilakukan pemodelan dengan beban terpusat menggunakan beban gandar terbesar yaitu 112,5 kN dengan lebar roda 200 mm (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2016).

Kriteria desain timbunan dengan Geofom yang digunakan sebagai material pengisi timbunan harus memiliki tiga komponen utama diantaranya tanah dasar, tanah pengisi timbunan, dan sistem lapisan perkerasan. Kriteria desain terdiri dari penurunan, stabilitas eksternal, stabilitas internal, dan penahan beban yang dibutuhkan. Jenis dan kriteria desain untuk timbunan Geofom dapat ditentukan berdasarkan panduan perancangan *National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 529* tahun 2004 dimana nilai faktor aman (FK) timbunan dengan Geofom terhadap penurunan yaitu 1,2 yang ditinjau dari kebutuhan penahan beban (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

2.4 Penurunan Tanah

Penurunan tanah adalah hal yang paling utama yang harus diperhatikan dalam perencanaan jalan di atas tanah lunak, karena hal tersebut memiliki pengaruh yang kuat terhadap konstruksi yang ada di atasnya. Penambahan beban di atas permukaan tanah dapat mengakibatkan lapisan tanah dibawahnya mengalami pemampatan yang disebabkan oleh deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori (Anjani et al., 2021).

Kriteria penurunan timbunan dikelompokkan berdasarkan kelas jalan seperti Tabel berikut (Pusat Litbang Prasarana Transportasi, 2001):

Tabel 2.14. Kriteria Penurunan Timbunan

Kelas Jalan	Penurunan Yang Disyaratkan Selama Masa Konstruksi, S/Stot	Kecepatan Penurunan Setelah Konstruksi (mm/tahun)
I	>90%	<20
II	>85%	<25
III	>80%	<30
IV	>75%	<30

Sumber : (Pusat Litbang Prasarana Transportasi, 2001)

Keterangan :

S : Penurunan pada masa konstruksi (sebelum pekerjaan *finishing*)

Stot : Penurunan total yang telah terjadi (pekerjaan *finishing* selesai)

Penurunan adalah jumlah deformasi vertikal yang terjadi akibat penurunan langsung atau elastis penurunan massa timbunan atau tanah dasar, konsolidasi, dan pemampatan sekunder tanah dasar, dan *creep* jangka panjang dari massa timbunan di bagian atas timbunan jalan raya. Penurunan yang disebabkan oleh deformasi lateral tanah dasar di tepi timbunan adalah tidak dipertimbangkan karena menyajikan pengukuran inclinometer yang menunjukkan penurunan akibat deformasi lateral (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Apabila faktor keamanan terhadap ketidakstabilan eksternal selama konstruksi tetap > 1.4, sehingga penurunan yang disebabkan oleh deformasi lateral kurang dari 10% dari penurunan akhir primer.

Menghitung penurunan segera (S_i) rata-rata untuk beban terbagi rata berdasarkan (Janbu et al., 1956) untuk pondasi fleksibel berbentuk empat persegi panjang dan lingkaran dengan E bervariasi dan hanya berlaku untuk *poisson ratio* 0,5 (lempung jenuh). Besarnya penurunan segera yang diusulkan Janbu et al (1956) berdasarkan grafik μ_1 dan μ_0 berdasarkan persamaan berikut :

$$S_i = \mu_1 \mu_0 \frac{q_n B}{E} \quad (\text{hanya untuk } \nu = 0,5) \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

S_i = Penurunan segera rata-rata

μ_1 = Faktor koreksi kedalaman pondasi D_f

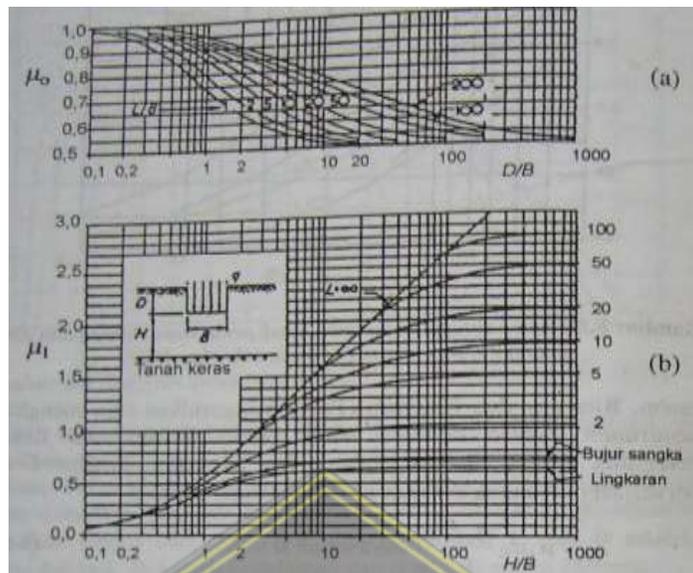
μ_0 = Faktor koreksi untuk lapisan tebal terbatas (H)

B = Lebar Pondasi

q_n = tambahan tegangan netto

E = Modulus Elastisitas

Untuk mendapatkan nilai μ_1 dan nilai μ_0 berdasarkan Gambar 2.16 berikut :



Gambar 2.16. Grafik untuk Mendapatkan Nilai μ_1 dan nilai μ_0 (Janbu et al., 1956)

2.5 Stabilitas Timbunan dengan Geofom

Desain timbunan konstruksi jalan menggunakan material Geofom memerlukan pemahaman mengenai interaksi antara tiga komponen pada konstruksi timbunan tersebut, yaitu anatar tanah dasar, material timbunan, dan konstruksi jalan. Sehingga proses perancangan konstruksi timbunan dibagi menjadi tiga tahap yang menganalisa interaksi antara ketiga komponen tersebut (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Tahap stabilitas eksternal (global) meninjau interaksi antara kombinasi material timbunan Geofom dan konstruksi jalan dengan tanah dasar dan juga meninjau stabilitas overall konstruksi timbunan. Dalam perhitungan stabilitas struktur timbunan Geofom *Serviceability Limit State* (SLS) dan *Ultimate Limit State* (ULS) akan diperhitungkan. SLS stabilitas eksternal memperhitungkan penurunan total dan differensial yang disebabkan oleh tanah dasar lunak, sedangkan ULS stabilitas eksternal struktur timbunan memperhitungkan daya dukung tanah, stabilitas lereng, stabilitas seismic, *hydrostatic uplift (flotation)*, translasi terhadap air, dan translasi terhadap angin (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Keruntuhan daya dukung terjadi ketika beban yang bekerja di atas tanah dasar melebihi daya dukung tanah dasar yang berkaitan dengan kuat geser tanah dasar

tersebut. Ketika keruntuhan daya dukung terjadi, timbunan akan mengalami penurunan yang berlebih dan akan berdampak pada bangunan disekitarnya. Persamaan umum yang digunakan untuk memperhitungkan daya dukung ultimit berdasarkan teori daya dukung Terzhagi adalah sebagai berikut (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004):

$$q_u = S_u N_c + \gamma b D_f \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana:

$S_u=c$: kuat geser tanah

N_c : faktor ketahanan geser daya dukung

γb : berat volume tanah (kN/m³)

D_f : kedalaman timbunan (m)

Untuk nilai faktor daya dukung N_c , N_q , dan N_γ ditampilkan pada Tabel berikut (M.Das, 2010):

Tabel 2.15. Faktor Daya Dukung N_c , N_q , dan N_γ Menurut Mayerhof (1963)

ϕ	N_c	N_q	N_γ	ϕ	N_c	N_q	N_γ
0	5,14	1	0	26	22,25	11,85	8,00
1	5,38	1,09	0,00	27	23,94	13,20	9,46
2	5,63	1,20	0,01	28	25,80	14,72	11,19
3	5,90	1,31	0,02	29	27,86	16,44	13,24
4	6,19	1,43	0,04	30	30,14	18,40	15,67
5	6,49	1,57	0,07	31	32,67	20,63	18,56
6	6,81	1,72	0,11	32	35,49	23,18	22,02
7	7,16	1,88	0,15	33	38,64	26,09	26,17
8	7,53	2,06	0,21	34	42,16	29,44	31,15
9	7,92	2,25	0,28	35	46,12	33,30	37,15
10	8,34	2,47	0,37	36	50,59	37,75	44,43
11	8,80	2,71	0,47	37	55,63	42,92	53,27
12	9,28	2,97	0,60	38	61,35	48,93	64,07
13	9,81	3,26	0,74	39	67,87	55,96	77,33
14	10,37	3,59	0,92	40	75,31	64,20	93,69
15	10,98	3,94	1,13	41	83,86	73,90	113,99
16	11,63	4,34	1,37	42	93,71	85,37	139,32
17	12,34	4,77	1,66	43	105,11	99,01	171,14
18	13,10	5,26	2,00	44	118,37	115,31	211,14
19	13,93	5,80	2,40	45	133,87	134,87	262,74
20	14,83	6,40	2,87	46	152,10	158,50	328,73

φ	Nc	Nq	N γ	φ	Nc	Nq	N γ
21	15,81	7,07	3,42	47	173,64	187,21	414,33
22	16,88	7,82	4,07	48	199,26	222,30	526,45
23	18,05	8,66	4,82	49	229,92	265,50	647,92
24	19,32	9,60	5,72	50	266,88	319,06	873,86
25	20,72	10,66	6,77				

Sumber : (M.Das, 2010)

Untuk mendapatkan faktor aman dari daya dukung tanah berdasarkan persamaan berikut :

$$FK = \frac{q_u}{q_q} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana :

$q_a = s_n =$ tegangan normal yang diberikan timbunan pada permukaan tanah pada kedalaman 0 yang mampu dipikul oleh tanah (kPa)

$s_{n_{EPS}}$ = tegangan normal yang diberikan oleh beban Geofom pada permukaan tanah (kPa)

Untuk mendapatkan $s_{n_{EPS}}$ berdasarkan persamaan berikut (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004):

$$s_{n_{EPS}} = \gamma_{EPS} \cdot T_{EPS} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana :

γ_{EPS} = berat jenis Geofom (kN/m³)

T_{EPS} = tebal atau tinggi Geofom (m)

Untuk mendapatkan nilai tegangan vertikal pada tanah akibat beban titik (beban terpusat) di permukaan dapat dilakukan dengan menggunakan teori Boussinesq (1885), dengan persamaan sebagai berikut (M.Das, 2010):

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_B \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana:

$\Delta\sigma_z$: tambahan tegangan vertikal pada lapisan yang ditinjau (kN/m²)

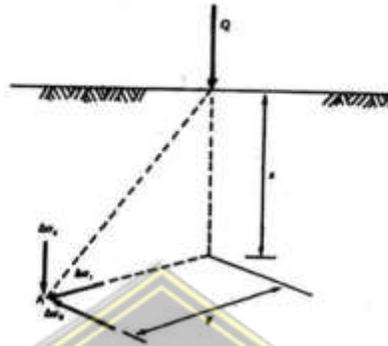
Q : beban terpusat (kN)

z : kedalaman lapisan yang ditinjau (m)

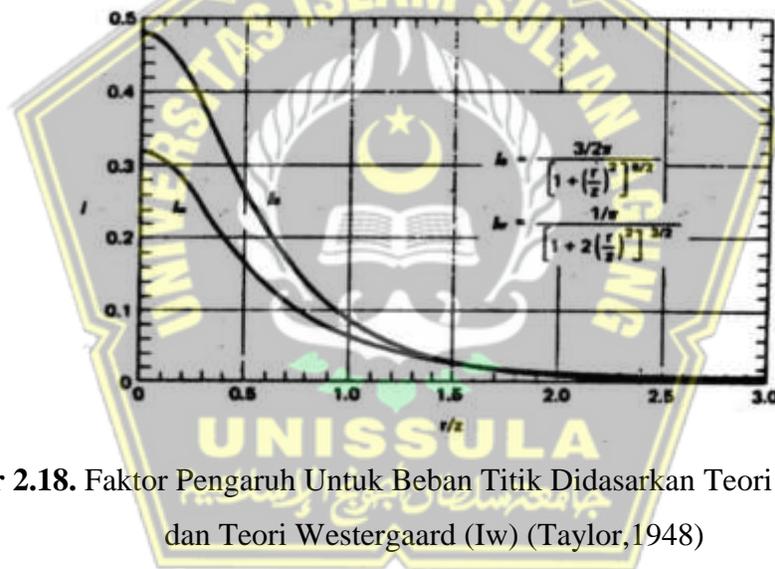
I_B : faktor pengaruh, bergantung pada nilai r/z

r : jarak dari pusat beban yang ditinjau

Nilai I_B disajikan dalam bentuk grafik ditampilkan pada Gambar 2.20. Pada Gambar 2.17 – 2.18 ini, nilai pengaruh I_B untuk teori Boussinesq digambarkan bersama – sama dengan faktor pengaruh beban titik (I_w) untuk teori Westergaard.



Gambar 2.17. Tambahan Tegangan Akibat Beban Titik (Beban Terpusat)



Gambar 2.18. Faktor Pengaruh Untuk Beban Titik Didasarkan Teori Boussinesq (I_B) dan Teori Westergaard (I_w) (Taylor,1948)

2.6 Hydrostatic Uplift (Flotation)

Geofoam yang digunakan sebagai timbunan memiliki kepadatan 1% dari kepadatan material tanah. Karena kepadatan yang sangat rendah ini, maka potensi pengangkatan hidrostatik (*flotasi*) dari seluruh timbunan pada dan Geofoam harus dipertimbangkan secara eksternal dengan evaluasi stabilitas (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Faktor keamanan terhadap gerakan vertikal ke atas dari seluruh timbunan akibat kenaikan muka air tanah adalah rasio tegangan vertikal total dari timbunan yang diterapkan ke tanah dasar (berat satuan EPS blok Geofom secara konservatif diambil sebagai nilai kering yaitu 0,2 kN/m³ dibagi dengan tekanan air yang terangkat di bawah kejadian ekstrim (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Rumus untuk mendapatkan nilai Faktor Keamanan terhadap pergerakan vertikal struktur timbunan akibat kenaikan permukaan air tanah adalah (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004):

$$FK = \frac{\sum N}{\sum K} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana :

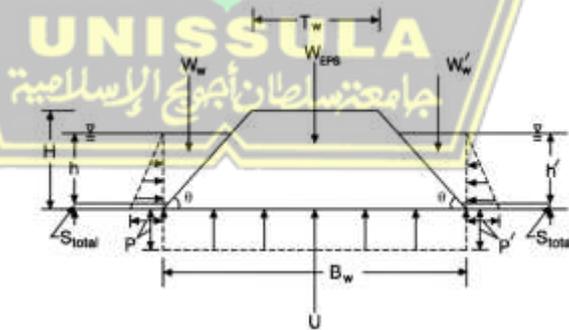
$\sum N$ = Total dari gaya normal yang bekerja = $W_{EPS} + W_{air} + W'_{air}$

$\sum U$ = Total dari gaya angkat air pada bagian bawah timbunan

W_{EPS} = Berat timbunan EPS blok Geofom

W_{air}, W'_{air} = Komponen vertikal dari berat air, di kedua sisi timbunan

Contoh dua kasus pengangkatan timbunan, yaitu pengangkatan air yang sama dan air yang tidak sama di kedua sisi timbunan. Dalam kedua kasus tersebut diasumsikan bahwa Geofom memanjang sampai ke tanah dasar dan pengangkatan akan terjadi pada antarmuka blok EPS (Geofom) dan tanah dasar, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.19 berikut (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004):



Gambar 2.19. *Hydrostatic Uplift* Dengan Permukaan Air Yang Sama Kedua Sisi (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004)

Penurunan tanah pascakonstruksi sebesar 0,3 – 0,6 m umumnya dianggap dapat ditoleransi untuk timbunan jalan raya selama umur rencana jalan. Dengan demikian U

harus didasarkan pada tinggi vertikal akumulasi air atau air belakang (h atau h') masing-masing ke dasar timbunan ditambah dengan perkiraan penurunan total (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Tekanan air P dan P' diperoleh dari tinggi vertikal akumulasi air pada awal konstruksi ditambah dengan perkiraan total penurunan, h + S_{total} dan tinggi vertikal air buangan pada awal konstruksi ditambah dengan perkiraan penurunan total (h' + Total) dan menghasilkan distribusi tekanan segitiga yang bekerja pada sisi-sisi timbunan dengan besaran $\gamma_w \times (h + S_{total})$ atau $\gamma_w \times (h' + S_{total})$ (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Untuk kasus tinggi air di kedua sisi timbunan memiliki tinggi yang sama, persamaan faktor keamanan menjadi (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004):

$$FK = \frac{W_{EPS} + W_{air} + W'_{air} + O_{REQ}}{\gamma_w \times (h + S_{total}) \times B_w} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana :

γ_w = Berat jenis air (kN/m³)

S_{total} = Penurunan total (m)

h = Permukaan air (m)

B_w = Lebar dasar timbunan (m)

O_{REQ} = Beban tambahan yang diperlukan struktur timbunan EPS blok Geofom agar memenuhi faktor aman (kN/m).

Dengan adanya ketinggian air di kedua sisi timbunan merupakan kondisi yang buruk pada struktur timbunan, karena akan menimbulkan gaya angkat yang seragam sepanjang dasar timbunan. Tekanan air menimbulkan gaya angkat pada dasar timbunan sebesar (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004):

$$U = \gamma_w \times B_w \times (h + S_{total}) = \gamma_w \times B_w \times (h' + S_{total}) \dots\dots\dots(2.10)$$

Komponen dalam perhitungan nilai O_{REQ} adalah berat struktur yang berada di atas EPS Geofom. Berat struktur di atas EPS Geofom dapat dihitung sebagai berikut (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004):

$$W = \gamma \times t \times l \dots\dots\dots(2.11)$$

Agar mendapatkan nilai faktor keamanan yang diinginkan untuk gaya angkat air, nilai O_{REQ} harus lebih kecil daripada total berat jalan dan penutup tanah maka :

$$O_{REQ} < W \dots \dots \dots (2.12)$$

Faktor keamanan 1,2 merupakan nilai FK yang diinginkan dalam perhitungan gaya angkat air. Ini karena gaya angkat air merupakan pembebanan yang terjadi sementara dan tidak memerlukan nilai FK yang terlalu besar. Sehingga nilai OREQ yang diperlukan untuk memenuhi faktor keamanan 1,2 dapat dihitung dengan persamaan berikut (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004) :

$$O_{REQ} = [1,2 (1/2 \cdot \gamma_w \times (h + S_{total}) \times Bw)] - [(W_{EPS} + W_{air} + W'_{air})] \dots \dots \dots (2.13)$$

Untuk menghitung beban EPS dan beban air yang bekerja dapat digunakan persamaan berikut (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004):

$$W_{EPS} = \frac{H (l_{atas} + l_{bawah})}{2} \times \gamma_d \dots \dots \dots (2.14)$$

$$W_{air} = \frac{1}{2} (h + S_{total}) \left(\frac{sh}{sv} \right) (h + S_{total}) \times \gamma_{air} \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana :

l_{atas} = Lebar timbunan EPS bagian atas (m)

l_{bawah} = Lebar timbunan EPS bagian bawah (m)

γ_d = berat jenis kering EPS (kN/m³)

$\frac{sh}{sv}$ = Perbandingan sisi horizontal dengan vertikal kemiringan timbunan

Pada perhitungan gaya angkat air pada struktur timbunan, hasil penurunan yang didapatkan harus diperhitungkan. Tinggi timbunan akan tetap sama, tetapi ketika timbunan mengalami penurunan kedalaman air yang mempengaruhi gaya angkat air akan bertambah. Sehingga kedalaman air pada kedua sisi timbunan menjadi :

$$h + Stotal \text{ dan } h' + Stotal \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana :

h = tinggi vertikal akumulasi air ke dasar timbunan (m)

h' = tinggi vertikal air buangan ke dasar timbunan (m)

$Stotal$ = penurunan total (m)

Tekanan air yang dihasilkan menjadi :

$$\gamma_w (h + S_{total}) \text{ dan } \gamma_w (h' + S_{total}) \dots \dots \dots (2.17)$$

Dimana :

- γ_w = berat jenis air (N/m^3)
- h = tinggi vertikal akumulasi air ke dasar timbunan (m)
- h' = tinggi vertikal air buangan ke dasar timbunan (m)
- S_{total} = penurunan total (m)

2.7 Gaya Hidrostatika dan Gaya Berat

2.7.1 Hukum Archimedes

Benda yang terendam di dalam zat cair akan mengalami tekanan dalam permukaannya. Apabila suatu benda diletakkan pada zat cair, maka benda tersebut akan tenggelam, terendam, atau terapung pada zat cair, tergantung pada gaya berat dan gaya apung. Gaya apung dijelaskan berdasarkan Hukum Archimedes yang dirumuskan sebagai berikut :

$$F_a = \rho \cdot g \cdot V \dots \dots \dots (2.16)$$

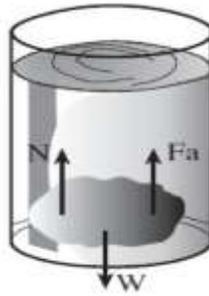
Dimana :

- F_a = gaya tekan keatas satuan Newton (N)
- ρ = massa jenis zat cair (kg/m^3)
- g = gravitasi satuan (m/s^2)
- V = volume benda yang tercelup (m^3)

Hukum Archimedes mengelompokkan benda menjadi 3 jenis yaitu :

1. Benda tenggelam

Benda disebut tenggelam dalam zat cair apabila posisi benda selalu terletak pada dasar tempat zat cair berada, seperti disajikan Gambar 2.20 berikut :



Gambar 2.20. Kondisi Benda Tenggelam

Dalam keadaan seimbang maka $W = N + F_a$ sehingga:

$$W > F_a \dots \dots \dots (2.17)$$

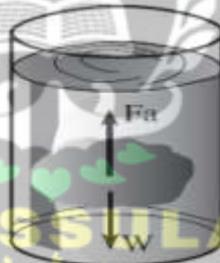
$$m \cdot g > \rho \cdot g \cdot V$$

$$\rho_b \cdot g \cdot V > \rho_f \cdot g \cdot V$$

$$\rho_b > \rho_f$$

2. Benda melayang

Benda melayang dalam zat cair apabila posisi benda di bawah permukaan zat cair dan di atas dasar tempat zat cair berada, seperti disajikan Gambar 2.21 berikut :



Gambar 2.21. Kondisi Benda Melayang

Pada benda melayang ada dua gaya yaitu F_a dan W . Keduanya dalam keadaan seimbang maka :

$$W = F_a \dots \dots \dots (2.18)$$

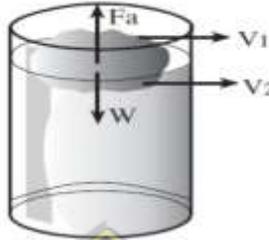
$$m \cdot g = \rho \cdot g \cdot V$$

$$\rho_b \cdot g \cdot V = \rho_f \cdot g \cdot V$$

$$\rho_b = \rho_f$$

3. Benda terapung

Benda terapung dalam zat cair apabila posisi benda sebagian muncul di permukaan zat cair dan sebagian terbenam dalam zat cair, seperti disajikan Gambar 2.22 berikut :



Gambar 2.22. Kondisi Benda Terapung

Pada benda terapung terdapat dua gaya yaitu : F_a dan W . Dalam keadaan seimbang maka:

$$W < F_a \dots\dots\dots (2.19)$$

$$m \cdot g < \rho \cdot g \cdot V$$

$$\rho_b \cdot g \cdot V_1 < \rho_f \cdot g \cdot V_2$$

$$V_1 < V_2$$

$$\rho_b < \rho_f$$

2.7.2 Hukum II Newton

Hukum II Newton menjelaskan hubungan antara gaya konstan benda terhadap percepatan yang timbul pada benda tersebut serta hubungan antara massa benda terhadap percepatan yang ada akibat gaya konstan benda. Bunyi Hukum II Newton adalah jika ada resultan gaya yang bekerja pada sebuah benda, maka akan dihasilkan suatu percepatan dalam arah yang sama dengan resultan gaya. Besarnya percepatan tersebut berbanding lurus terhadap resultan gaya dan berbanding terbalik terhadap massa bendanya.

Rumus Hukum Newton II adalah sebagai berikut :

$$F = m \cdot g \dots\dots\dots (2.20)$$

Dimana :

F = Gaya yang bekerja pada benda (N)

m = Massa benda (kg)

g = Gravitasi ($9,8 \text{ m/s}^2$)

2.8 Konsep Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga (*finite element methode*) merupakan numeric yang bertujuan untuk mendesain dan menganalisis berbagai masalah teknik praktis atau penelitian. FEM juga berguna untuk masalah dengan geometri yang rumit, pembebanan, dan sifat material dimana solusi dari analisis tidak dapat diperoleh. Ada tiga jenis elemen hingga yang sering digunakan yaitu satu dimensi (garis), dua dimensi (bidang), dan tiga dimensi (solid). Dari literatur yang ada, penggunaan elemen hingga dua dimensi menjadi pilihan banyak peneliti dalam stabilitas timbunan (Mamat et al., 2019).

Plaxis adalah perangkat lunak elemen hingga yang telah digunakan secara khusus untuk peninjauan dan analisis deformasi yang disebabkan oleh berbagai alasan dan tingkat stabilitas dalam pekerjaan geoteknik. Perangkat lunak ini berbentuk sederhana yaitu metode input grafis yang memungkinkan pembentukan cepat model elemen hingga yang kompleks, dan hasil output memberikan presentasi rinci matematika komputasi (Srivastava et al., 2018). Plaxis lebih mudah dalam pemodelan tanah, untuk menyelesaikan sederhana untuk memecahkan masalah dalam lapisan yang kompleks. Plaxis dapat menganalisis semua kasus geoteknik seperti timbunan, desain tiang pancang, pondasi, dinding penahan tanah, lereng, dan bendungan (Mamat et al., 2019).

Program plaxis merupakan program yang didasarkan oleh metode elemen hingga (*Finite Element*) yang mensimulasikan perilaku tanah untuk mendapatkan nilai deformasi dan stabilitas dari struktur geoteknik yang dibangun (Teguh et al., 2022). Analisis perhitungan yang dilakukan pada kondisi *plane-strain* dan *axis-symmetric*.

Model geometri ini terdiri dari *points*, *lines*, dan *cluster* (Setiawan et al., 2018). Input Plaxis terdiri dari (Teguh et al., 2022):

1. Mendefinisikan masalah
2. Penggambaran dimensi dan propertis material
3. Mendefinisikan kondisi awal

Plaxis versi 9.0 adalah program elemen hingga yang secara khusus digunakan untuk menganalisis deformasi dan penurunan pada bidang geoteknik. Untuk setiap kasus yang akan dianalisis, model geometri harus dibuat terlebih dahulu. Model geometri merupakan representasi dua dimensi dari masalah tiga dimensi yang nyata di lapangan (Juni Gultom, 2022). Dalam Plaxis 2D, setiap elemen pondasi didefinisikan oleh 15 node geometri. Pemodelan dengan 15 node dipilih untuk setiap elemen untuk mendapatkan perhitungan yang lebih akurat. Sedangkan untuk bentuk pemodelan 3D menjadi 2D dalam Plaxis, yaitu *plane strain* dan bentuk *axisymmetric* (Juni Gultom et al., 2023).

Plaxis 2D adalah sebuah paket program dalam dunia teknik sipil yang dibuat berdasarkan metode elemen hingga yang bisa digunakan untuk melakukan analisa deformasi, penurunan, ataupun stabilitas dalam bidang geoteknik (Anjani et al., 2021). Pada Plaxis 2D setiap elemen pondasi didefinisikan oleh 15 nodal geometri. Pemodelan dengan 15 nodal dipilih untuk setiap elemen agar memperoleh perhitungan yang lebih akurat. Terdapat dua bentuk permodelan dari 3 dimensi ke dalam 2 dimensi dalam Plaxis yaitu (Juni Gultom, 2022) :

1. Regangan bidang (*plane strain*)

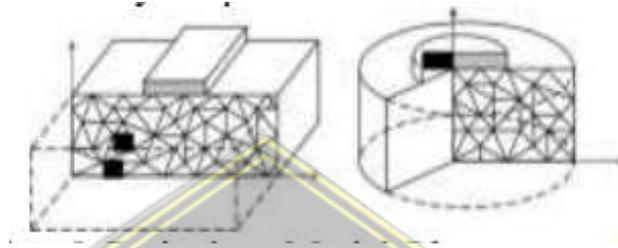
Model *plane strain* digunakan untuk geometri dengan potongan melintang yang relative seragam. Kondisi tegangan dan skema pembebanan dengan panjang tertentu dan tegak lurus terhadap arah sumbu z juga harus relatif seragam. Perpindahan dan regangan pada arah sumbu z diasumsikan nol. Tetapi tegangan normal pada arah sumbu z tetap memiliki nilai.

2. Axi-simetri (*Axisymmetric*)

Model *Axisymmetric* digunakan untuk struktur melingkar dengan potongan melintang secara radial dan skema pembebanan yang relative seragam di

sekitar titik pusat lingkaran dimana deformasi dan kondisi tegangan yang terjadi diasumsikan identik dalam semua arah radial. Sumbu x merepresentasikan radius, sementara sumbu y merepresentasikan garis sumbu simetri.

Gambar 2.23 perbedaan model *plane strain* dan *Axisymmetric* adalah sebagai berikut (Anjani et al., 2021):



Gambar 2.23. Ilustrasi Pemodelan *Plane Strain* dan *Axisymmetric* (Anjani et al., 2021)

Lines digunakan untuk mengekspresikan ikatan geometri, model, dan diskontinuitas pada geometri seperti dinding, lempengan, dan lain-lain. *Lines* dapat memiliki beberapa fungsi dan material yang berbeda. Cluster adalah area tertutup yang sepenuhnya dibatasi oleh garis. Dalam satu cluster hanya terdapat satu material (homogeny). Cluster dapat diaplikasikan sebagai lapisan atas. Proses simulasi dalam Plaxis terdiri 3 tahap yaitu (Juni Gultom et al., 2023):

1. *Input data*

Membuat dan memodifikasi geometri model sehingga menghasilkan model elemen hingga yang sesuai dengan kondisi sebenarnya.

2. *Calculation*

Proses perhitungan dilakukan setelah selesai membuat pemodelan. Pada tahap perhitungan ini perlu memilih jenis perhitungan yang sesuai.

3. *Output*

Proses *output* dari program perhitungan dilakukan sampai keseimbangan tercapai. Keluaran utama yang dapat diperoleh adalah deformasi mesh, penurunan profil, jumlah tegangan pada lapisan tanah, dan gaya-gaya yang

ditanggung oleh struktur yang dimodelkan. Proses diskritisasi akan akan berlangsung secara otomatis dalam Plaxis. Jumlah elemen yang dihasilkan tergantung pada pemilihan tingkat kekasaran (kekasaran global).

Plaxis menyediakan 5 tingkat kekasaran yaitu: sangat kasar, kasar, sedang, halus, sangat halus. Semakin halus levelnya, jumlahnya semakin banyak elemen. Dengan demikian, keakuratan hasil perhitungannya pun semakin tinggi. Akan tetapi, tentu saja hal itu akan membutuhkan waktu pemrosesan yang lebih lama karena memakan memori yang semakin banyak. Plaxis memiliki beberapa fitur yang dapat digunakan untuk memodelkan struktur. Fitur-fitur pemodelan tersebut adalah Pemodelan Tanah. Fitur pemodelan tanah digunakan untuk menggambarkan karakteristik tanah dan interaksi antar elemen. Pada Plaxis Versi 9.0, terdapat lima jenis pemodelan yang tersedia yang dapat digunakan adalah Mohr-Coulomb, *Jointed Rock*, *Hardening Soil*, *Soft Soil-Creep*, dan *Soft Soil*. Kelima tipe tersebut harus digunakan berdasarkan kondisi tanah (Juni Gultom et al., 2023).

Pelat, *Shells* *The plate* (cangkang pelat), dan *shell are modeled* (cangkang dimodelkan) dengan 3 nodal elemen atau 5 nodal elemen. Setiap simpul memiliki 3 derajat kebebasan. Tipe perilaku dari bentuk ini pemodelan ini dapat berupa elastis atau elastoplastik. Bentuk pelat dan cangkang biasanya digunakan untuk memodelkan dinding, lantai, dan terowongan. Perilaku elemen-elemen ini ditentukan oleh kekakuan lentur, kekakuan normal, dan ketebalan elemen. *Anchor* adalah elemen pegas elastoplastik yang digunakan untuk memodelkan penempatan jangkar dan penyangga. Perilaku jangkar didefinisikan dengan menggunakan kekakuan normal dan beban maksimum. Model geogrid sering digunakan untuk memperkuat timbunan atau konstruksi struktur penahan tanah. Geogrid hanya memiliki EA dan digunakan untuk menahan tarikan (Juni Gultom et al., 2023).

Interface Elements digunakan untuk menggambarkan interaksi antara tanah dengan struktur, seperti gesekan pada dinding penahan tanah. Properti materialnya adalah diambil dari properti material tanah dengan menggunakan faktor reduksi Rinter. Dalam menggunakan *software* Plaxis 2D, tentunya tentu saja ada batasan-batasan yang harus diperhatikan. Batasan yang pertama adalah bagaimana pemodelan

material yang digunakan. Berbagai perilaku mekanis tanah dapat dimodelkan dengan berbagai tingkat akurasi. Sebagai contoh, Hukum Hooke tentang elastisitas linier dan isotropik menjelaskan hubungan tegangan-regangan yang paling sederhana (Juni Gultom et al., 2023).

Penggunaan *modulus Young* dan angka *Poisson* menyajikan perilaku tanah kasar dan batuan. Untuk memodelkan struktur elemen lapisan yang lebih besar dan batuan dasar mungkin membutuhkan lebih banyak pemodelan elastisitas linier. Oleh karena itu, pemodelan tanah itu sendiri sangat penting untuk diperhatikan karena akan menentukan karakter output yang dihasilkan. Pada umumnya, analisis yang dilakukan untuk penelitian dimodelkan dalam bentuk *Mohr-Coulomb*. Model *Mohr-Coulomb* melibatkan lima parameter input, yaitu *Modulus Young* dan *rasio Poisson* untuk menggambarkan elastisitas tanah, sudut geser dan kohesi untuk menggambarkan plastisitas tanah, dan sudut pelebaran dari permukaan tanah. Model *Mohr-Coloumb* mewakili orde pertama dari perilaku tanah atau batuan (Juni Gultom et al., 2023).

Jenis model *Mohr-Coloumb* ini sangat direkomendasikan sebagai analisis pertama dari setiap masalah yang akan dibahas. Setiap lapisan tanah harus diratakan kekakuannya dan kekakuannya harus konstan. Karena kekakuan yang digunakan konstan, maka perhitungan akan relatif cepat dan hasil deformasi yang terjadi pada tanah akan langsung dapat dilihat dengan segera. Namun, selain kelima parameter yang telah disebutkan sebelumnya, kondisi awal tanah juga memegang peranan penting berperan penting dalam masalah deformasi tanah. Tekanan lateral awal lateral tanah juga harus sangat berpengaruh sehingga nilai K_0 harus dipilih dengan benar (Juni Gultom et al., 2023).

Meskipun Plaxis telah dikembangkan untuk mensimulasikan proses dan fenomena geoteknik yang sebenarnya, tetapi hasil simulasi yang dihasilkan sebenarnya hanya merupakan perkiraan saja, yang mungkin melibatkan kesalahan numerik dan pemodelan yang tidak dapat dihindari. Keakuratan keakuratan simulasi yang dihasilkan sangat tergantung pada bagaimana masalah yang mendasari dimodelkan, pemahaman terhadap tanah pemodelan tanah dan keterbatasannya,

pemilihan parameter model, dan kemampuan untuk menjustifikasi apakah hasil simulasi akurat atau tidak (Juni Gultom et al., 2023).

2.9 Korelasi dan Regresi

Fungsi korelasi untuk mengetahui derajat atau keeratan hubungan dan untuk mengetahui arah hubungan variable numerik. Symbol yang digunakan untuk korelasi adalah R. Derajat keeratan maksudnya hubungan kuat lemahnya hubungan, hubungan tersebut dapat dilihat dari tebaran datanya. Tebaran data semakin rapat maka semakin kuat hubungannya dan begitu pula sebaliknya apabila tebaran datanya melebar maka menunjukkan hubungan semakin melemah (Sugiyono, 2007).

Untuk nilai interpretasi koefisien korelasi dapat dilihat pada Tabel berikut (Sugiyono, 2007):

Tabel 2.16. Interpretasi Koefisien Korelasi

Interval Koefisien	Tingkat Hubungan
0 – 0,199	Sangat rendah
0,20 – 0,399	Rendah
0,40 – 0,599	Sedang
0,60 – 0,799	Kuat
0,80 – 1,00	Sangat kuat

Sumber : (Sugiyono, 2013)

Regresi yaitu untuk membuat suatu prediksi dari nilai suatu variable (*variable dependen*) melalui variable yang lain (*variable independen*) yang dinyatakan dalam bentuk fungsi persamaan. Untuk menentukan bentuk dari regresi diperlukan pemisah yang tegas antara variabel bebas yang sering disimbolkan dengan X dan variabel tak bebas yang sering disimbolkan dengan Y. Regresi harus memiliki *variable* yang ditentukan dan *variable* yang menentukan. Kedua *variable* tersebut biasanya bersifat kausal atau memiliki hubungan sebab akibat yang saling berpengaruh (Sihotang & Iskandar, 2014).

Koefisien determinasi merupakan besaran yang akan mengukur ketepatan garis regresi. Koefisien determinasi menunjukkan persentase besarnya variabilitas dalam data yang dijelaskan oleh model regresi. Untuk simbol yang digunakan adalah R^2 . R^2 semakin besar mendekati 1 maka pengaruh antara *variable* semakin kuat. $R^2 = 0$ maka antara *variable* tidak memiliki pengaruh. R^2 semakin kecil maka pengaruh

hubungan antara *variable* lemah, dan semakin besar nilai R^2 maka semakin baik model regresi yang diperoleh (Sugiyono, 2007).

Tingkat akurasi regresi linear berdasarkan koefisien determinasi R^2 dapat dilihat pada Tabel berikut (Sugiyono, 2007):

Tabel 2.17. Akurasi Regresi Linier Berdasarkan Koefisien Determinasi (R^2)

Nilai R^2	Akurasi Model Regresi
<0,25	Tidak baik
0,25 – 0,55	Relatif baik
0,56 – 0,75	Baik
>0,75	Sangat baik

Sumber : (Sugiyono, 2013)

Analisis regresi adalah suatu proses melakukan estimasi untuk memperoleh suatu hubungan fungsional antara variabel acak Y dengan variabel X. Persamaan regresi digunakan untuk memprediksi nilai Y untuk nilai X tertentu. Analisis regresi sederhana adalah analisis regresi antara satu variabel Y dan satu variabel X (Sugiyono, 2007).

Bila dua variabel X dan Y berhubungan sebab akibat, dengan variabel X sebagai variabel independent (variabel bebas, variabel yang nilainya mempengaruhi nilai variabel tak bebas) dan variabel Y sebagai variabel dependent (variabel tak bebas, variabel yang nilainya dipengaruhi oleh variabel bebas), maka bila nilai variabel X diketahui, nilai tersebut dapat dipergunakan untuk memperkirakan nilai variabel Y. jika bentuk hubungan kedua variabel tersebut diketahui. Untuk mengetahui pola hubungan yang mungkin terbentuk dari dua variabel X dan Y dapat dipergunakan Scatter diagram (diagram pencar) (Sugiyono, 2007).

Scatter diagram adalah grafik yang menunjukkan titik-titik perpaduan nilai observasi dari 2 variabel (X & Y). Pada umumnya dalam grafik, variabel independent (X) diletakkan pada garis horisontal, sedangkan variabel dependent (Y) pada garis vertikal. Dari scatter diagram dapat diperoleh informasi tentang bentuk hubungan antara dua variabel X dan Y dengan melihat macam pola yang terbentuk. Selain memberikan informasi tentang bentuk hubungan dari kedua variabel, pola yang terbentuk juga dapat menggambarkan keeratan hubungan dari kedua variabel tersebut (Sugiyono, 2007).

2.10 Literatur Yang Relevan

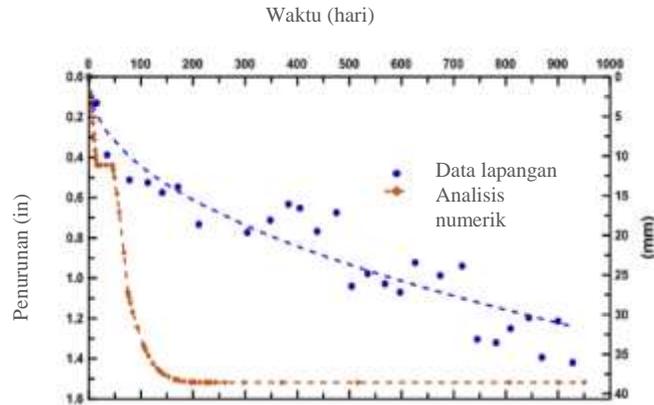
Berdasarkan hasil kajian pustaka yang dilakukan, ada beberapa literature yang relevan dengan topik penelitian ini. Penelitian Anand J.Puppala (2019) pada *Design and Construction of Lightweight EPS Geofoam Embedded Geomaterial Embankment System For Control of Settlements*, penelitian pada lokasi jembatan dimana terjadi penurunan pada *approach*. Metode penanganan yang dilakukan dengan timbunan *geofoam* untuk mengurangi penurunan. Pemodelan numerik yang dilakukan seperti pada Gambar 2.24 berikut :



Gambar 2.24. Model Timbunan Dengan Geofoam dan Distribusi Desai Beban

Desain beban mati perkerasan beton tebal 0,6 m sebesar 16,6 kPa (346 psf) digunakan untuk beban eksternal dalam model. Beban hidup (lalu lintas) diasumsikan berdasarkan beban truk standar berdasarkan AASTHO tentang beban.

Displacement vertikal maksimum terjadi sebesar 3,9 cm terjadi di atas lapisan *geofoam* di bagian tengah *approach slab*. Berikut kurva data pengujian skala lapangan dan pemodelan numerik ditunjukkan Gambar 2.25 berikut :



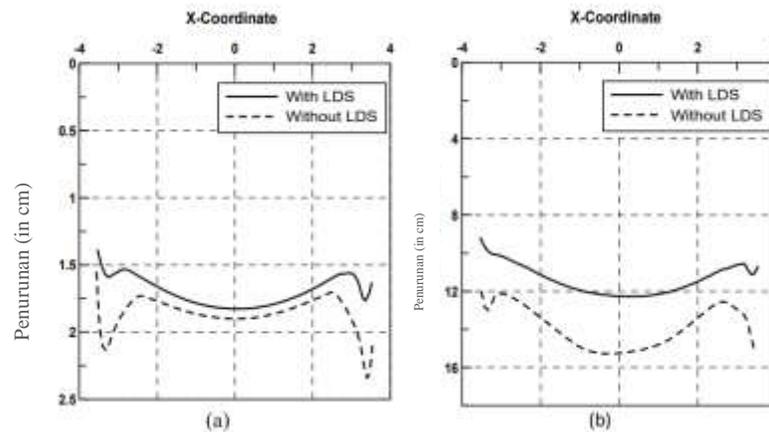
Gambar 2.25. Perbandingan Penurunan Bagian Atas dan Tengah Perkerasan dari Data Lapangan dan Model Numerik

Penelitian Umashankar et al (2015) tentang *Settlement of Embankment Constructed With Geofom*, model numerik yang digunakan untuk menganalisis tegangan vertikal pada Geofom akibat beban yang diberikan dengan variasi ketebalan penutup tanah di atas Geofom sebesar 30 cm, 75 cm, dan 100 cm. Pembebanan yang diberikan merujuk pada AASTHO (1996) yaitu sebesar 50 kPa pada bagian atas timbunan sepanjang 7m, pembebanan memperhitungkan lalu lintas dan beban perkerasan. Model numerik ditunjukkan Gambar 2.26 berikut :



Gambar 2.26. Skema Lapisan Timbunan dengan Geofom

Penurunan tanah dengan timbunan Geofom pada tanah lunak dengan menggunakan *Load Distribution Slab* (LDS) berkurang sebesar 25% dibandingkan tanpa menggunakan LDS. Tetapi pengaruh LDS terhadap penurunan dapat diabaikan apabila pada konstruksi *geofom* yang lebih kaku, seperti ditampilkan pada Gambar 2.27 berikut :



Gambar 2.27. Penurunan Timbunan dengan Tebal Cover 100 cm (a) $E_g = 10$ MPa

(b) $E_g = 1$ MPa

Kurva menampilkan penurunan yang signifikan sekitar 25% pada *geofoam* dengan *Elastis Modulus* (E_g) yang kecil yaitu 1 MPa, tetapi penurunan tersebut tidak terjadi signifikan pada *Elastis Modulus* (E_g) yang lebih kaku sebesar 10 MPa. Hasil penelitian dari literatur yang relevan pada Tabel berikut :

Tabel 2.18. Penelitian Terdahulu

No	Judul Paper	Tahun & Author	Tujuan	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
1.	<i>Design and construction of lightweight EPS geofoam embedded geomaterial embankment system for control of settlements</i>	(Puppala et al., 2019)	untuk mengetahui settlement pada timbunan <i>geofoam</i> EPS	<i>Numerical finite element</i>	<ul style="list-style-type: none"> Kinerja tiga tahun pertama blok <i>geofoam</i> EPS sebagai bahan timbunan alternatif telah terbukti menjadi ukuran yang efektif dalam mengurangi penurunan diferensial dari pelat jembatan mengurangi masalah kerusakan di dekat persimpangan jembatan dan perkerasan.
2.	<i>Influencing Parameters on experimental and theoretical analysis of</i>	(Jayanthi et al., 2022)	Untuk mengetahui pemanfaatan <i>geocell</i> sebagai perkuatan untuk perkerasan jalan dan fungsinya	Metode Laboratorium dan metode numerik	<ul style="list-style-type: none"> Dari tes laboratorium, bahan pengisi berbutir halus cocok untuk beban statis dan material yang lebih

No	Judul Paper	Tahun & Author	Tujuan	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
	<i>geocell reinforced soil</i>		serta dampak dalam aplikasi geoteknik		<p>kasar efektif di bawah beban dinamis.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Simulasi numerik tiga dimensi menunjukkan respon lebih baik sedangkan simulasi dua dimensi terjadi peningkatan lapisan geocell tetapi gagal mereplikasikan distribusi tegangan geocell yang lebih luas pada perkuatan.
3.	<i>Settlement of Embankment Constructed With Geofom</i>	(Umashankar et al., 2015)	Untuk mengetahui perbedaan program (FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua) digunakan untuk mendapatkan penurunan timbunan akibat pembebanan yang diterapkan.	Metode numerik	Model numerik dikembangkan untuk mensimulasikan timbunan dengan <i>geofom</i> dan pelat distribusi beban.
4.	<i>Floating road construction on soft soil</i>	(J. Gultom et al., 2022)	Untuk mengetahui daya dukung <i>raft pile foundation geofom</i> dengan beban maksimum 20 kN	Metode experimental dan Metode numerik (<i>Plaxis</i>)	<i>Settlement</i> yang terjadi pada <i>raft pile</i> tanpa <i>geofom</i> lebih besar dibandingkan <i>Settlement raft pile</i> dengan <i>geofom</i>
5.	Analisis Material Ringan Dengan Mortar Busa Pada Konstruksi	(D. Hidayat et al., 2016)	Untuk mendapatkan perbandingan deformasi pada tanah dasar akibat beban timbunan menggunakan timbunan konvensional dengan timbunan ringan yang dianalisis menggunakan program Plaxis.	Metode deskriptif kualitatif	Penggunaan timbunan ringan memberikan nilai penurunan lebih kecil jika dibandingkan dengan timbunan konvensional. Penggunaan timbunan ringan dapat mengurangi beban timbunan karena beratnya ringan, kekuatan cukup tinggi untuk <i>subgrade</i> , berat isi dan kuat tekan dapat didesain sesuai keinginan sehingga dapat mengurangi dampak penurunan pada jalan di atasnya.
6.	<i>Analysis of the</i>	(Carvajal &	Untuk mengevaluasi	<i>Finite element</i>	• Hasil vertikal permanen

No	Judul Paper	Tahun & Author	Tujuan	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
	<i>influence of soft soil depth on the subgrade capacity for flexible pavements.</i>	Romana, 2013)	pengaruh kedalaman tanah lunak terhadap respon perkerasan	<i>modelling</i>	<p>deformasi dari prosedur dibandingkan dengan persamaan empiris, sehingga intensitas kegagalan alur dapat diperkirakan.</p> <ul style="list-style-type: none"> Perawatan tanah dalam harus diterapkan untuk mencapai kapasitas yang diijinkan dari tanah lunak hingga kedalaman minimum sekitar 6 m.
7.	Aplikasi <i>Geofoam</i> Sebagai Material Timbunan di Atas Tanah Lunak.	(I. Hidayat & Suhendra, 2011)	Untuk mengetahui penggunaan <i>geofoam</i> sebagai material timbunan di atas tanah lunak melalui analisis teoritis menggunakan program Plaxis	<ul style="list-style-type: none"> Metode studi literatur. Metode pengujian laboratorium Metode numerik (<i>Plaxis</i>) 	Penggunaan <i>geofoam</i> sebagai material timbunan memberikan nilai faktor keamanan yang lebih tinggi dengan nilai deformasi yang lebih kecil jika dibandingkan dengan tanah laterit.
8.	<i>Laboratory Evaluation of Geogrids Used For Stabilizing Soft Subgrades</i>	(Zumrawi & Mansour, 2016)	Untuk mengetahui efisiensi penggunaan tulangan geogrid untuk stabilisasi <i>subgrade</i>	Metode pengujian laboratorium	<ul style="list-style-type: none"> Nilai CBR sangat dipengaruhi oleh letak lembaran geogrid tanah dan jumlah lembaran yang digunakan. Ketika lebar geogrid diletakkan pada lapisan 1 <i>gefo</i> tanah terjadi peningkatan nilai CBR 26%, dan nilai CBR meningkat 62% ketika lembar geogrid ditempatkan di keempat lapisan.
9.	<i>Geofoam: a potential for Indonesia's soil problem</i>	(Anthony Gunawan, 2020)	Untuk mengetahui penerapan <i>geofoam</i> untuk konstruksi jalan berdasarkan kondisi tanah sebenarnya di Indonesia	Metode Pengujian Metode numerik (<i>Plaxis</i>)	Penggunaan <i>geofoam</i> mengurangi timbunan yang dipadatkan dibutuhkan sebesar 40%.
10.	<i>On the role of geofoam</i>	(Meguid & Khan, 2019)	Untuk mengetahui karakteristik		<ul style="list-style-type: none"> Karakteristik geser <i>geofoam</i> dengan

No	Judul Paper	Tahun & Author	Tujuan	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
	<i>density on the interface shear behavior of composite geosystems</i>		kekuatan antarmuka <i>geofoam</i> di bawah kombinasi tegangan normal dan geser		<p>material antara lain beton, kayu dan baja. Tiga <i>geofoam</i> yang berbeda kepadatan yaitu, 15, 22 dan 39 kg/m³.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kepadatan <i>geofoam</i> dan tegangan normal yang diterapkan memiliki efek yang signifikan pada vertikal kompresi dan sifat kekuatan antarmuka (yaitu adhesi dan sudut gesekan). • Kekasaran permukaan memainkan peran penting dalam tahanan geser pada kontak. Antar muka <i>geofoam</i>-beton menunjukkan maksimum kekuatan dibandingkan dengan bahan kayu dan baja.
11.	<i>Performance Evaluation of Pavements Constructed on EPS Geofoam Backfill Using Repeated Plate Load</i>	(Khalaj et al., 2019)	Untuk mengetahui ketebalan tanah timbunan dengan menggunakan <i>geofoam</i> sebagai timbunan berdasarkan beban <i>cyclic plate load</i>	Metode eksperimental	<ul style="list-style-type: none"> • Uji siklik <i>uniaxial</i> pada EPS menunjukkan bahwa setiap kepadatan EPS memiliki rentang tekanan tertentu di mana ia menampilkan perilaku yang stabil. • Uji <i>plate load</i> menunjukkan bahwa ketebalan lapisan EPS memiliki pengaruh penting pada kedalaman alur dan tingkat kenaikannya. • Ketika tekanan yang diberikan adalah 275 kPa, ketebalan minimum dapat dipilih sebagai lapisan EPS atas dengan kepadatan tinggi dan perkerasan

No	Judul Paper	Tahun & Author	Tujuan	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
					<p>akan menunjukkan perilaku yang sesuai.</p> <ul style="list-style-type: none"> tekanan yang diberikan 550 kPa, ketika ketebalan tanah 400 mm, ketebalan EPS lapisan atas tidak boleh lebih rendah dari 200 mm karena menyebabkan penurunan yang besar dengan jumlah beban <i>cyclic</i> yang tidak signifikan dan mengakibatkan kegagalan permukaan perkerasan.
12.	<i>Sustainability assessment of EPS-geofoam in road construction: a case study</i>	(Srivastava et al., 2018)	Untuk mengetahui penilaian kinerja <i>polistiren</i> yang diperluas Lapisan <i>geofoam</i> EPS, yang digunakan dalam perbaikan dan rehabilitasi pekerjaan jalan, skala lapangan.	Metode pengujian skala lapangan dan Metode numerik (<i>Plaxis</i>)	Setelah 6 bulan pengamatan, tercatat bahwa <i>Pavement Quality Concrete</i> (PQC) dibangun di atas timbunan tanah menunjukkan tanda-tanda kerusakan dan retakan memanjang karena penurunan yang berlebihan, di sisi lain PQC yang dibangun di atas <i>EPS-geofoam</i> utuh tanpa tanda-tanda kerusakan.
13.	<i>Effects of Geofoam Panels on Static Behavior of Cantilever Retaining Wall</i>	(Hasanpouri Notash & Dabiri, 2018)	Untuk mengetahui pemasangan <i>geofoam</i> pada dinding penahan tanah <i>cantilever</i> untuk mereduksi beban statis	Metode numerik (<i>Plaxis</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Penggunaan EPS15 dengan kepadatan sama dengan 15 (kg/m³) yang memiliki kerapatan paling rendah di antara panel <i>geofoam</i> lainnya memiliki peran signifikan dalam pengurangan tegangan lateral. Efek <i>geofoam</i> dapat mereduksi tekanan statis hanya pada

No	Judul Paper	Tahun & Author	Tujuan	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
					<p>kondisi dinding penahan tanah <i>non-yielding</i>.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Penggunaan <i>geofoam</i> dibatasi hanya untuk ketebalan 0.005 H-0.2H untuk meningkatkan faktor aman akibat guling pada dinding penahan tanah.
14.	<i>Mechanical Characterization of Lightweight Foamed Concrete</i>	(Kozłowski & Kadela, 2018)	Untuk mengetahui karakteristik beton ringan dengan <i>foam</i>	Metode eksperimental	<ul style="list-style-type: none"> • Busa beton sebagai beton ringan dibuat dengan pengurangan agregat dan penggantian semen dengan <i>fly ash</i>. • Busa beton memiliki <i>density</i> 1400 kg/m³ mencapai kuat tekan turun sebesar 15% dari betin normal.
15.	<i>Experimental studies of bearing capacity and settlement of foundations on clays under regime block cyclic loading</i>	(Mirsayapov & Sharaf, 2020)	Untuk mengetahui daya dukung dan penurunan fondasi pada tanah lempung.	Metode eksperimental	Hubungan antara penurunan dan deformasi fondasi berdasarkan beban.
16.	<i>Effect of Seasonal Changes on a Hybrid Soil-Geofoam Embankment System</i>	(Shafikhani et al., 2017)	Untuk mengetahui analisis komprehensif tentang pengaruh suhu musiman dan variasi curah hujan pada infrastruktur jembatan terletak di Johnson County, Texas.	Metode eksperimental skala lapangan dengan memasang inclinometer	<ul style="list-style-type: none"> • Tekanan vertikal dan deformasi total meningkat dengan kenaikan suhu dan menurun dengan penurunan suhu • Peningkatan suhu, pada dinding penahan jembatan memberikan tekanan lateral pada <i>geofoam</i> dan dengan penurunan suhu tekanan menurun drastis.
17.	<i>Settlement</i>	(Puppala et	Untuk mengetahui	Metode	<ul style="list-style-type: none"> • Sistem timbunan

No	Judul Paper	Tahun & Author	Tujuan	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
	<i>Mitigation Using Light Weight Fill Embankment Systems</i>	al., 2013)	metode perbaikan tanah timbunan pada jembatan dengan <i>geofoam</i> terhadap penurunan dan juga mengurangi biaya perbaikan/pemeliharaan.	<i>Laboratory studies</i> dan <i>numerical analyses</i>	dengan <i>geofoam</i> ECS mengalami penurunan yang lebih rendah dibandingkan dengan timbunan konvensional. <ul style="list-style-type: none"> • Pemodelan numerik memberikan prediksi penurunan yang sangat cocok dengan pengukuran lapangan.
18	<i>Prediction of Structural Response Based on Ground Acceleration Using Artificial Neural Networks</i>	(Suryanita et al., 2017)	Penelitian ini memanfaatkan <i>Artificial Neural Network</i> (ANN) untuk memprediksi respon struktur bangunan bertingkat bangunan beton bertulang berdasarkan percepatan tanah	Metode numerik (ANN)	<ul style="list-style-type: none"> • ANN mampu memprediksi respon struktur berdasarkan percepatan tanah. • Akurasi respon struktur yang tinggi sangat membantu <i>engineer</i> dalam mengidentifikasi kondisi bangunan dengan cepat dan merencanakan pemeliharaan berkala
19	Analisis Produktivitas Pekerjaan <i>Prefabricated Vertical Drain</i> Menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan	(Susetyo & Fitriani, 2018)	Untuk menganalisis produktivitas pekerjaan <i>Prefabricated Vertical Drain</i> menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan	Metode numerik (ANN)	<ul style="list-style-type: none"> • Model prediksi produktivitas pekerjaan <i>Prefabricated Vertical Drain</i> menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan.
20	Karakteristik Parameter Kekuatan Tanah Yang Dipadatkan dengan Uji Triaksial Metode UU	(Susilo et al., 2018)	Untuk melakukan simulasi kondisi pemadatan pada kadar air optimum, dibawah kadar air optimum (OMC-2%) dan diatas kadar air optimum (OMC+2%) untuk	Metode eksperimental	<ul style="list-style-type: none"> • Nilai kohesi rata-rata yang diperoleh cenderung hampir sama, tetapi pada pemadatan dengan kondisi kadar air optimum terlihat terjadi peningkatan hampir 900% antara

No	Judul Paper	Tahun & Author	Tujuan	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
			mendapatkan parameter kekuatan tanah dari uji triaksial.		pemadatan standar dan modifikasi. Sedangkan parameter sudut geser dalam cenderung turun ketika dipadatkan pada kondisi lebih basah dari pada kadar air optimum
21	<i>Evaluation of Geofom as a Geotechnical Construction Material</i>	(Lin et al., 2010)	Kondisi inspeksi di Taiwan, Amerika Serikat, dan Jepang, investigasi kualitas produksi EPS, dan hasil eksperimen dan analisis kualitas produksi EPS dan uji homogenitas	Metode investigasi untuk menilai kualitas <i>Geofom</i> yang diproduksi	<ul style="list-style-type: none"> • Dapat memeriksa stabilitas prosedur pembuatan EPS. • Hasil analisis biaya penggunaan <i>Geofom</i> untuk proyek perluasan jalan raya.
22	<i>Shear strength properties of interlocked EPS-block geofom – Ottawa sand interface</i>	(A Tolga Özer et al., 2016)	Untuk mengetahui gesekan permukaan blok <i>geofom</i> dengan pasir <i>Ottawa</i>	Model eksperimental	Konsep blok <i>geofom</i> yang saling bergesekan dapat meningkatkan sifat kekuatan geser antara blok <i>geofom</i> dengan Pasir <i>Ottawa</i> . Mekanisme gesekannya adalah gesekan-adhesi.
23	Alternatif Perencanaan Timbunan dan Perbaikan Tanah Dasar pada Jalan Tol Krian-Legundi-Bunder-Manyar (STA 12+434 s/d STA 12+684)	(Maulana et al., 2020)	Untuk <i>mencari</i> alternatif timbunan yang murah, aman terhadap longsor, dan penurunan tidak seragam yang dapat dikendalikan.	Metode Numerik (Plaxis)	Timbunan material EPS <i>geofom</i> , asumsi muka air banjir yang terjadi dilapangan tidak melebihi 1 meter dengan kecepatan angin maksimal 30 km/jam. Berdasarkan SF rencana (1,2) maka timbunan EPS <i>geofom</i> tidak memerlukan perkuatan tambahan.
24	<i>Evaluating the Role of Geofom Properties in</i>	(Khan & Meguid, 2021)	Untuk mengetahui peran inklusi <i>geofom</i> antara	Metode Numerik (Plaxis)	Penyertaan <i>geofom</i> EPS dengan kepadatan rendah memberikan kinerja

No	Judul Paper	Tahun & Author	Tujuan	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
	<i>Reducing Lateral Loads on Retaining Walls : A Numerical Study</i>		penahan tanah yang kaku dan material timbunan pada tekanan tanah yang ditransfer ke struktur dinding		terbaik, khususnya terutama jika digabungkan dengan timbunan dengan sudut gesek rendah.
25	<i>Effect of EPS Geofom on Retaining Wall Subjected to Seismic Forces</i>	(Ayeh & Alam, 2021)	Untuk menganalisis posisi geofom EPS di belakang dinding penahan berbentuk L untuk mengontrol defleksi di bawah kekuatan seismik	Metode Numerik (Plaxis)	Kombinasi inklusi EPS vertikal dan horizontal ditemukan untuk mengurangi tekanan tanah lateral lebih dari 80% sehingga mengurangi lendutan lateral dinding penahan tanah berbentuk L.
26	<i>Behavior of Sandy Slopes Remediated by EPS-Block Geofom Under Seepage flow</i>	(Akay et al., 2013)	Perbaikan lereng, perilaku blok geofom untuk sistem lereng yang mengalami aliran rembesan	Model eksperimental	Konfigurasi blok Geofom ditemukan stabil terhadap kondisi rembesan yang akan menyebabkan kegagalan lereng yang dangkal tanpa adanya blok geofom. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa blok geofom dapat sepenuhnya mengisi massa material lereng yang ada yang mengalami kegagalan.
27	<i>Prediction of Swelling Pressures of Expansive Soils using Artificial Neural Networks</i>	(Ikizler et al., 2010)	Model prediksi tekanan swelling lateral yang ditransmisikan, dan tekanan swelling vertikal pada struktur penahan tanah dikembangkan dengan menggunakan pendekatan jaringan syaraf tiruan (JST)	Model eksperimental dan model ANN	Penelitian ini menunjukkan bahwa model prediksi berbasis jaringan syaraf tiruan dapat digunakan untuk mendapatkan tekanan swelling dari tanah ekspansif.
28	<i>Geofom: A potential for Indonesia's soil problem III – stabilizing retaining wall</i>	(Anthony Gunawan, 2022)	Penggunaan geofom untuk menstabilkan dinding penahan tanah setinggi sebelas meter	Studi kasus dan Metode Numerik (Plaxis)	Kegagalan akan terjadi jika timbunan terus ditimbun. Dengan mengganti tiga meter dari sisa timbunan sepanjang empat meter dengan

No	Judul Paper	Tahun & Author	Tujuan	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
					geofoam, perpindahan dinding penahan tanah dapat dikurangi dari 2,1 m menjadi 0,1 m.
29	<i>Geofoam: A potential for Indonesia's soil problem II</i>	(A. Gunawan, 2021)	Penggunaan geofoam untuk memitigasi kegagalan lereng	Studi kasus villa di Puncak, Bogor dan Metode Numerik (Plaxis)	Penggunaan geofoam sebagai bahan stabilisasi lereng yang efektif dapat mengurangi terjadinya kegagalan lereng/longsor.
30	<i>Geofoam: a potential for Indonesia's soil problem</i>	(A Gunawan, 2020)	Aplikasi geofoam untuk konstruksi jalan berdasarkan kondisi tanah asli di Indonesia	Metode Numerik (Plaxis)	Penggunaan geofoam dapat mengurangi timbunan yang dipadatkan yang dibutuhkan sebesar 40%. Hal ini tidak hanya menghemat waktu konstruksi, tetapi juga jejak karbon dari desain jalan tersebut. Ketika pengurangan waktu dengan menggunakan geofoam dipertimbangkan, geofoam menjadi solusi yang layak secara ekonomi dan juga lingkungan.
31	<i>Application of EPS Geofoam to a Soil-Steel Bridge to Reduce Seismic Excitations</i>	(Maleska et al., 2019)	Analisis non-linier jembatan baja-tanah dilakukan. Blok geofoam polistiren yang diperluas (EPS) digunakan dalam model numerik jembatan baja-tanah untuk menahan gelombang seismik yang diakibatkan oleh semburan batu (yang berasal dari tambang batu bara) dan juga alami (catatan El Centro)	program DIANA, Metode Elemen Hingga	<ul style="list-style-type: none"> • Penggunaan EPS menghasilkan pengurangan (sekitar 63%) tekanan timbunan (rockburst) dan timbunan hingga 53% (rockburst) pada kasus-kasus ketika EPS berada di bawah cangkang CSP (model Va). • Nilai yang diperoleh dalam model jembatan baja-tanah yang mengalami runtuh jauh lebih kecil dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dengan menggunakan efek seismik (gempa El Centro).
32	<i>Instrumented</i>	(Neto, 2021)	Untuk memverifikasi	Model skala	Hasilnya analisis dalam

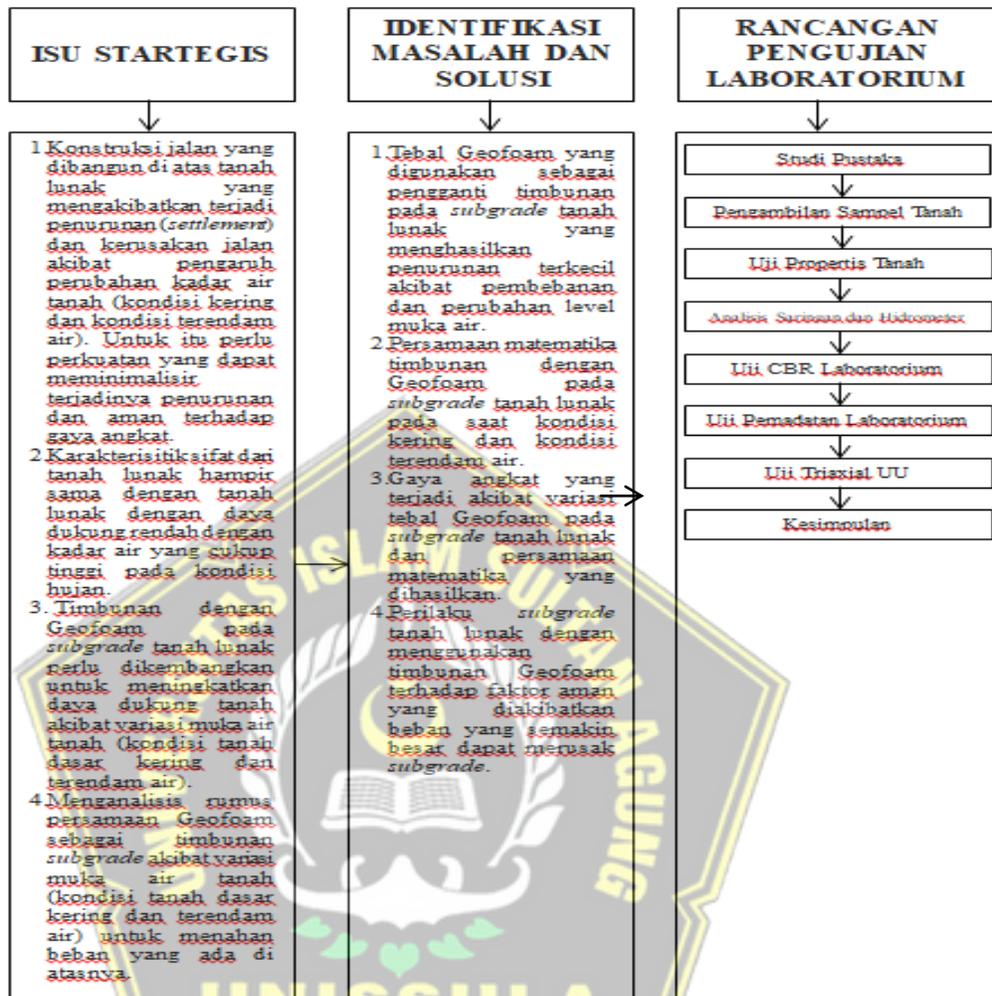
No	Judul Paper	Tahun & Author	Tujuan	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
	<i>Load Tests and Layered Elastic Theory Analysis of a Large-Scale EPS Block Embankment</i>		perilaku struktur skala penuh <i>geofoam</i> digunakan sebagai salah satu sub lapisan perkerasan.	penuh	LET menunjukkan bahwa penggunaan fleksibel yang dirancang dengan benar di atas <i>geofoam</i> menghasilkan struktur dengan kinerja yang memadai.

Sumber : dari berbagai jurnal

Yang membedakan dengan penelitian terdahulu adalah penurunan timbunan dengan *geofoam* pada *subgrade* akibat variasi muka air tanah (kondisi tanah dasar kering dan terendam air) apabila terjadi pembebanan.

2.11 Kerangka Berpikir

Pada penelitian ini dimulai dengan pengumpulan referensi yang berkaitan dengan tema penelitian dari peneliti-peneliti terdahulu. Referensi ini bertujuan untuk mempertajam pemahaman mengenai tanah lunak dan *Geofoam* sehingga mendapatkan keaslian dari penelitian. Telah banyak para peneliti yang telah melakukan penelitian yang serupa, tetapi dalam penelitian ini dikhususkan pada timbunan dengan *Geofoam* pada *subgrade* tanah lunak terhadap penurunan dan perubahan level muka air. Kerangka berpikir yang akan diterapkan seperti sketsa Gambar 2.28 berikut :



Gambar 2.28. Kerangka Berpikir (Sumber : Olahan Penelitian)

Novelty dari penelitian Kinerja Tanah Lunak dengan timbunan Geofom sebagai *Subgrade* adalah timbunan dengan Geofom pada *subgrade* tanah lunak dengan variasi muka air tanah (kondisi tanah dasar kering dan terendam air) dengan ketebalan Geofom (h_{gf}) antara $1/2$ sampai $2/3$ ketinggian tanah dasar (h_s), tebal tanah dasar yang digunakan untuk penelitian 60 cm. Untuk tebal Geofom digunakan variasi 20 cm, 30 cm, dan 40 cm.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Konsep dan Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan dengan konsep pendekatan eksperimental dengan model *prototype* skalatik di laboratorium. Konstruksi *subgrade* dimodelkan tanpa Geofom dan dengan Geofom. Geofom diletakkan di atas tanah lunak dengan asumsi tebal tanah dasar 60 cm (tanpa Geofom), tebal tanah dasar 60 cm dengan tebal Geofom variasi 20 cm, 30 cm, dan 40 cm, kondisi tanah dasar kering dan terendam air. Kondisi Geofom pada tanah lunak yang terendam air akan mendapatkan tekanan ke atas (*up-lift*), sehingga Geofom mengapung pada tanah lunak. Pembebanan diperhitungkan atas berat sendiri bahan uji dan beban luar yang bervariasi dari 0, 5, 10, 15, dan 20 kN. Ruang lingkup dari penelitian ini adalah :

1. Uji model *subgrade* dengan timbunan Geofom dengan kondisi tanah dasar kering dan terendam air.
2. *Prototype subgrade* dengan timbunan Geofom dengan kondisi tanah dasar kering dan terendam air, terlebih dahulu dianalisis menggunakan analisis numerik Plaxis 2D, analisis hasil pengujian eksperimental laboratorium dan terakhir divalidasi dengan numerik Plaxis 2D untuk mendapatkan model kinerja tanah lunak dengan Geofom.
3. Data tanah lunak yang digunakan dalam pengujian di laboratorium yaitu tanah lunak dari Jl. Badak Kota Pekanbaru, yang sama dengan tanah lunak pada umumnya.
4. Beban vertikal dalam model uji laboratorium menggunakan alat *hidrolik*.
5. Material beton yang digunakan sebagai pelat beton yang diletakkan di atas timbunan Geofom adalah K-250 (f_c 20,75 mpa) dengan ukuran 60 cm x 40 cm dan tebal 10 cm.

6. Material besi yang digunakan untuk plat beton adalah besi diameter 8 mm dengan f_y 240 Mpa.
7. Material Geofom yang digunakan adalah EPS 22 dengan spesifikasi densitas blok 20 kg/m^3 , tegangan elastis 50 kPa, dan modulus young 5 MPa, disajikan Gambar 3.1 :

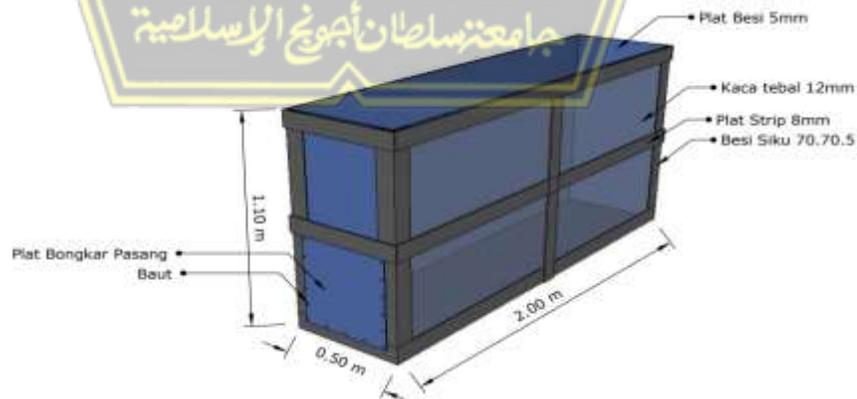


Gambar 3.1. Geofom EPS 22

Sumber: Dokumentasi Penelitian

Tahap pelaksanaan pembuatan model *prototype* yaitu :

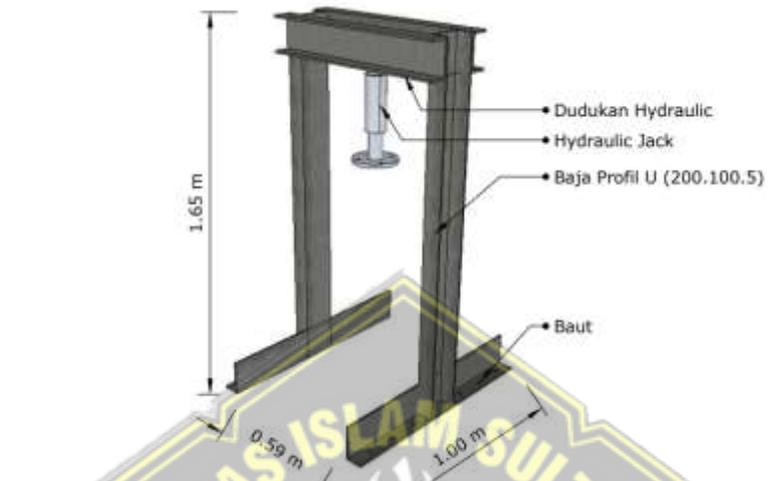
1. Penyediaan bak uji ukuran $200 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 110 \text{ cm}$, dengan menggunakan plat besi 5 mm, plat strip 8 mm untuk rangka tengah, dan besi siku 70.70.5 mm untuk rangka bagian bawah. Kaca tebal 12 mm untuk bagian depan, disajikan Gambar 3.2 :



Gambar 3.2. Gambar Bak Uji Penelitian

Sumber: Dokumentasi Penelitian

2. Pembuatan model *subgrade* dari tanah lunak yang di ambil di Jl. Badak Kota Pekanbaru.
3. Pemasangan *frame hydraulic jack*, disajikan Gambar 3.3 :

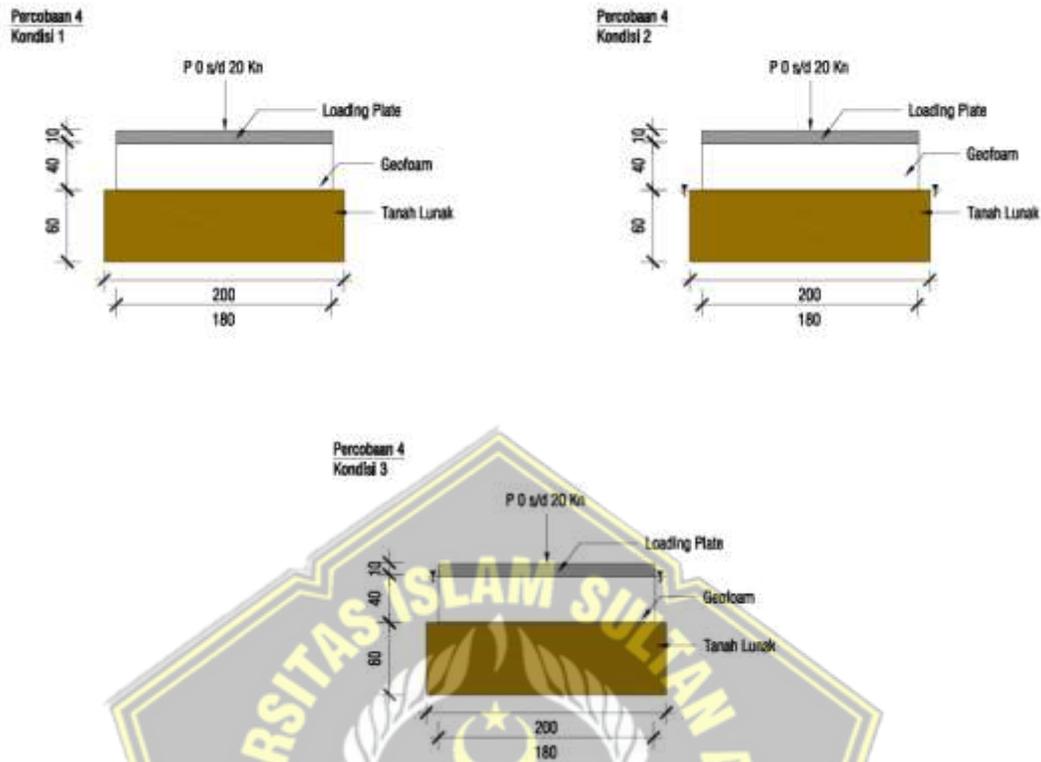


Gambar 3.3. *Frame Hydraulic Jack*

Sumber: Dokumentasi Penelitian

4. Tanah lunak yang sudah dites, dimasukkan ke dalam bak uji sesuai tebal yang telah ditentukan. Untuk kepadatan tanah laboratorium dibuat sama dengan kepadatan tanah lapangan. Uji kepadatan tanah dengan menggunakan alat DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*).
5. Geofom dan pelat beton diletakkan di atas tanah lunak, untuk tanah lunak dianggap sebagai tanah dasar.
6. Pembebanan dibantu dengan *hydraulic jack*.
7. Untuk membaca penurunan tanah menggunakan LVDT (*Linier Variable Differential Transformer*).
8. Untuk mencatat data penurunan dengan menggunakan data *logger*.

Tanah lunak dimodelkan sebagai tanah dasar (*subgrade*) dan Geofom dimodelkan sebagai timbunan ringan seperti Gambar 3.4 berikut :



Gambar 3.4. Model Benda Uji dalam Bentuk 2 Dimensi
Sumber: Olahan Penelitian

3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian untuk pengambilan sampel tanah lunak dilaksanakan di daerah Jl. Badak Kota Pekanbaru. Pengujian laboratorium dilaksanakan di laboratorium Program Studi Teknik Sipil Universitas Lancang Kuning dan laboratorium Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru. Untuk pengujian eksperimental dilakukan di PT. Harista Karsa Mandiri. Waktu penelitian mulai Desember 2023 sampai September 2024.

3.3 Konsep Penelitian

Konsep dari penelitian ini karena daya dukung tanah lunak yang rendah $< 6\%$, berdasarkan Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan jembatan.

Daya dukung rendah mengakibatkan terjadinya penurunan tanah akibat beban yang diterimanya, sehingga diperlukan material ringan Geofom untuk mereduksi berat struktur dengan memanfaatkan gaya apung (*uplift*) menjadi besar pada kondisi terendam air.

Pengujian sampel tanah dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Tanah Program Studi Teknik Sipil Universitas Lancang Kuning dan Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru. Hasil laboratorium yang sudah diolah datanya, kemudian dilakukan analisa numerik dengan metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D versi 2023. Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif, dimana sistem pengambilan data dilakukan dari hasil pengujian laboratorium atau metode eksperimental skala kecil di laboratorium. Geofom diletakkan di bawah pelat beton dalam sebuah bak uji, pelat beton berfungsi untuk tumpuan beban dari *hydraulic jack* pada bagian bak uji transparan yang terbuat dari kaca dan didalamnya diisi tanah lunak yang diasumsikan sebagai tanah dasar (*subgrade*). *Load cell* dipasang pada titik tertentu yaitu di atas plat beton yang disambung dengan data *logger* untuk melihat beban yang diberikan. *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) dipasang pada titik tertentu yang akan tersambung dengan data *logger* dan diteruskan ke komputer agar dapat direkam setiap perubahan *settlement* yang terjadi ketika menerima beban vertikal.

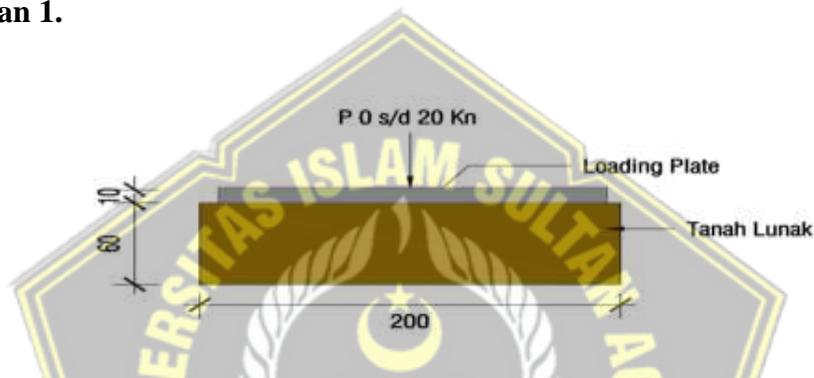
Pengujian dilakukan dengan memberikan beban secara vertikal dengan bertahap yaitu beban 0 – 20 kN. Besar pembebanan dari *Load Cell* akan disesuaikan dengan kebutuhan pada penelitian. Kamera disiapkan di depan bak uji untuk mengetahui *settlement* yang ditimbulkan akibat diberikan beban secara vertikal yang besar sesuai kebutuhan. Analisa numerik juga dilakukan dengan menggunakan *software Finite Element Method* dengan menggunakan program Plaxis 2D versi 2023 untuk mendapatkan nilai pendekatan induktif sebagai acuan awal dilakukan pemodelan untuk pengujian yang akan dilakukan di laboratorium. Data hasil pengujian laboratorium dan numerik nantinya dibandingkan dan sebagai validasi data yaitu dari numerik Plaxis 2D versi 2023, sehingga nanti akan diperoleh hasil yang lebih akurat tentang penurunan konstruksi akibat kondisi tanah dasar

kering dan kondisi basah (gaya angkat/ *uplift*) akibat diberi pembebanan secara vertikal pada model percobaan. Variabel yang akan diteliti adalah :

1. Besar penurunan *subgrade* berdasarkan beban, tebal tanah dasar, dan tebal Geofom yang berbeda-beda serta kondisi tanah dasar kering dan kondisi basah.
2. Ketebalam minimal Geofom dalam mendukung beban yang dipersyaratkan.
3. Gaya apung yang terjadi akibat perlawanan terhadap beban vertikal yang diberikan.

Untuk Kondisi masing-masing benda uji disajikan Gambar 3.5 berikut :

Percobaan 1.



Gambar 3.5. Model Percobaan 1 Tanpa Menggunakan Geofom

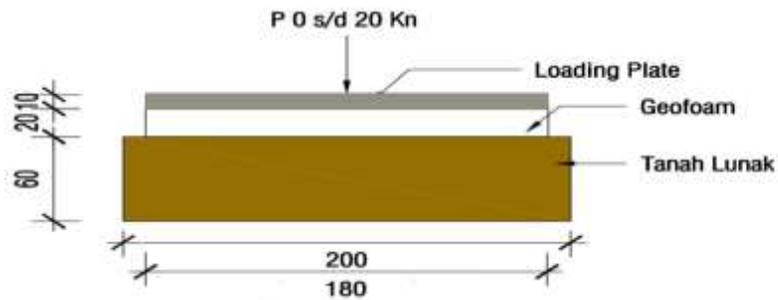
Sumber: Olahan Penelitian

Tebal tanah dasar diambil 60 cm mengacu pada Tabel 2.13, dimana kedalam tanah lunak < 2 m (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017). Tebal *load plate* 10 cm (standar minimum tebal pelat di atas Geofom) dan diberi beban mulai dari 0 – 20 kN mengacu pada SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan, dimana beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan menggunakan beban truk T dilakukan permodelan dengan beban terpusat menggunakan beban gandar terbesar 112,5 kN.

Percobaan 2

Untuk percobaan 2 ini dimodelkan dengan 3 kondisi seperti Gambar 3.6 – 3.8 berikut :

1. Kondisi 1



Gambar 3.6. Model Percobaan 2 Kondisi 1 Geofom Tebal 20 cm Kondisi Kering

Sumber: Olahan Penelitian

Tebal tanah dasar diambil 60 cm, tebal Geofom 20 cm diperoleh dari $1/2 H_s$ (tinggi *subgrade*) dimana tinggi timbunan diasumsikan < 90 cm berdasarkan Tabel 2.13 yaitu ketinggian akhir timbunan yang dicapai < 2 m (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017). Tebal *load plate* 10 cm (standar minimum tebal pelat di atas Geofom), diberi beban mulai dari 0 – 20 kN mengacu pada SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan, dimana beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan menggunakan beban truk T dilakukan permodelan dengan beban terpusat menggunakan beban gandar terbesar 112,5 kN.

2. Kondisi 2



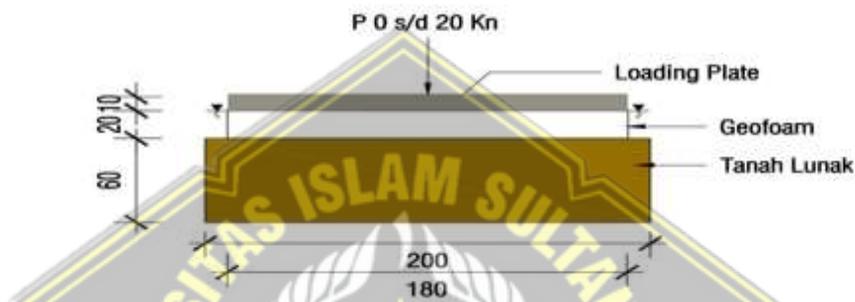
Gambar 3.7. Model Percobaan 2 Kondisi 2 Geofom Tebal 20 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofom pada *Subgrade*

Sumber: Olahan Penelitian

Tebal tanah dasar diambil 60 cm, tebal Geofom 20 cm diperoleh dari $1/2 H_s$ (tinggi *subgrade*) dimana tinggi timbunan diasumsikan 90 cm berdasarkan Tabel 2.13 yaitu ketinggian akhir timbunan yang dicapai < 2 m (Kementerian Pekerjaan

Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017). Tebal *load plate* 10 cm (standar minimum tebal pelat di atas Geofom), diberi beban mulai dari 0 – 20 kN mengacu pada SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan, dimana beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan menggunakan beban truk T dilakukan permodelan dengan beban terpusat menggunakan beban gandar terbesar 112,5 kN. Tinggi muka air berada di permukaan tanah dasar. Kondisi ini dianggap sebagai kondisi tanah dasar basah.

3. Kondisi 3



Gambar 3.8. Model Percobaan 2 Kondisi 3 Geofom Tebal 20 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton)

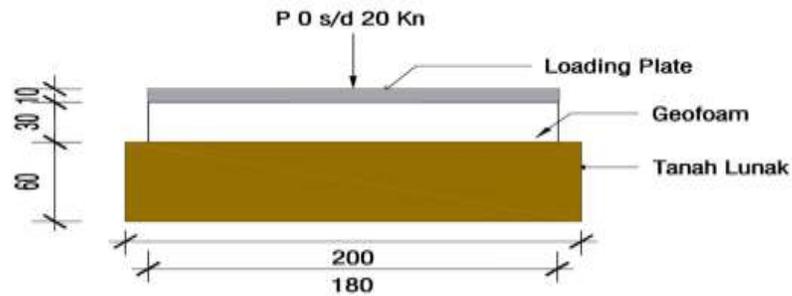
Sumber: Olahan Penelitian

Tebal tanah dasar diambil 60 cm, tebal Geofom 20 cm diperoleh dari 1/2 Hs (tinggi *subgrade*) dimana tinggi timbunan diasumsikan 90 cm berdasarkan Tabel 2.13 yaitu ketinggian akhir timbunan yang dicapai < 2 m (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017). Tebal *load plate* 10 cm (standar minimum tebal pelat di atas Geofom), diberi beban mulai dari 0 – 20 kN mengacu pada SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan, dimana beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan menggunakan beban truk T dilakukan permodelan dengan beban terpusat menggunakan beban gandar terbesar 112,5 kN. Tinggi muka air berada di tengah tebal plat beton. Percobaan ini dianggap sebagai kondisi tanah dasar basah.

Percobaan 3

Untuk percobaan 3 ini dimodelkan dengan 3 kondisi seperti Gambar 3.9 – 3.11 berikut :

1. Kondisi 1



Gambar 3.9. Model Percobaan 3 Kondisi 1 Geofom Tebal 30 cm Kondisi Kering

Sumber: Olahan Penelitian

Tebal tanah dasar diambil 60 cm, tebal Geofom 30 cm diperoleh dari $1/3 H_s$ (tinggi *subgrade*) dimana tinggi timbunan diasumsikan 80 cm berdasarkan Tabel 2.13 yaitu ketinggian akhir timbunan yang dicapai < 2 m (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017). Tebal *load plate* 10 cm (standar minimum tebal pelat di atas Geofom), diberi beban mulai dari 0 – 20 kN mengacu pada SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan, dimana beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan menggunakan beban truk T dilakukan permodelan dengan beban terpusat menggunakan beban gandar terbesar 112,5 kN. Kondisi ini dianggap sebagai kondisi tanah dasar kering.

2. Kondisi 2



Gambar 3.10. Model Percobaan 3 Kondisi 2 Geofom Tebal 30 cm Kondisi Muka

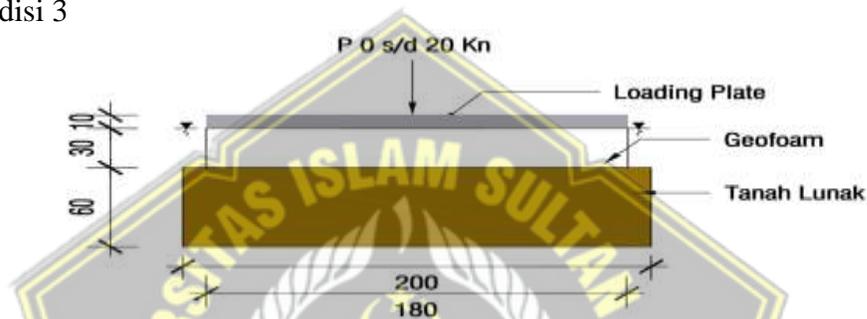
Air di bawah Geofom (pada *Subgrade*)

Sumber: Olahan Penelitian

Tebal tanah dasar diambil 60 cm, tebal Geofom 30 cm diperoleh dari $1/3 H_s$ (tinggi *subgrade*) dimana tinggi timbunan diasumsikan 80 cm berdasarkan Tabel

2.13 yaitu ketinggian akhir timbunan yang dicapai < 2 m (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017). Tebal *load plate* 10 cm (standar minimum tebal pelat di atas Geofom), diberi beban mulai dari 0 – 20 kN mengacu pada SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan, dimana beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan menggunakan beban truk T dilakukan permodelan dengan beban terpusat menggunakan beban gandar terbesar 112,5 kN. Tinggi muka air berada di permukaan tanah dasar. Kondisi ini dianggap sebagai kondisi tanah dasar basah.

3. Kondisi 3



Gambar 3.11. Model Percobaan 3 Kondisi 3 Geofom Tebal 30 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton)

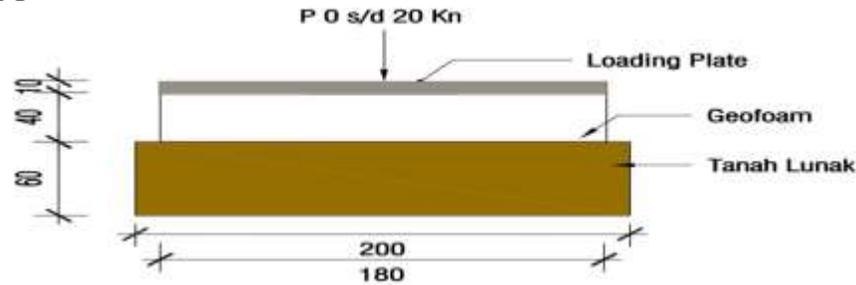
Sumber: Olahan Penelitian

Tebal tanah dasar diambil 60 cm, tebal Geofom 30 cm diperoleh dari $1/3 H_s$ (tinggi *subgrade*) dimana tinggi timbunan diasumsikan 80 cm berdasarkan Tabel 2.13 yaitu ketinggian akhir timbunan yang dicapai < 2 m (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017). Tebal *load plate* 10 cm (standar minimum tebal pelat di atas Geofom), diberi beban mulai dari 0 – 20 kN mengacu pada SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan, dimana beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan menggunakan beban truk T dilakukan permodelan dengan beban terpusat menggunakan beban gandar terbesar 112,5 kN. Tinggi muka air berada di tengah tebal plat beton. Percobaan ini dianggap sebagai kondisi tanah dasar basah.

Percobaan 4

Untuk percobaan 4 ini dimodelkan dengan 3 kondisi seperti Gambar 3.12 – 3.14 berikut :

1. Kondisi 1

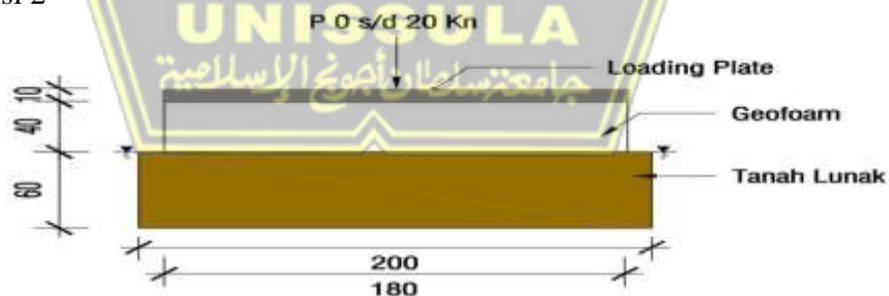


Gambar 3.12. Model Percobaan 4 Kondisi 1 Geofoam Tebal 40 cm Kondisi Kering

Sumber: Olahan Penelitian

Tebal tanah dasar diambil 60 cm, tebal Geofoam 40 cm diperoleh dari $\frac{2}{3}$ Hs (tinggi *subgrade*) dimana tinggi timbunan diasumsikan 100 cm berdasarkan Tabel 2.13 yaitu ketinggian akhir timbunan yang dicapai < 2 m (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017). Tebal *load plate* 10 cm (standar minimum tebal pelat di atas Geofoam), diberi beban mulai dari 0 – 20 kN mengacu pada SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan, dimana beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan menggunakan beban truk T dilakukan permodelan dengan beban terpusat menggunakan beban gandar terbesar 112,5 kN. Kondisi ini dianggap sebagai kondisi tanah dasar kering.

2. Kondisi 2



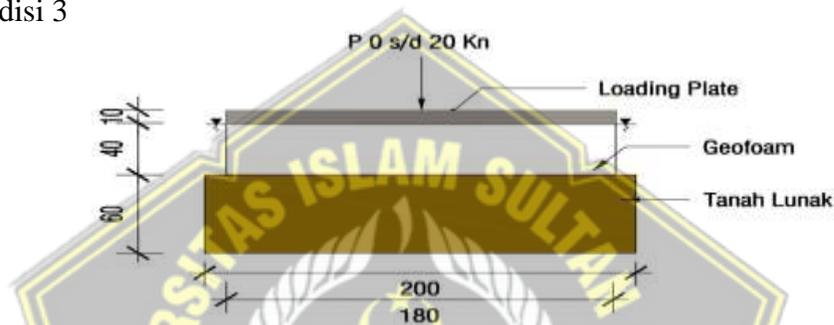
Gambar 3.13. Model Percobaan 4 Kondisi 2 Geofoam Tebal 40 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofoam (pada *Subgrade*)

Sumber: Olahan Penelitian

Tebal tanah dasar diambil 60 cm, tebal Geofoam 40 cm diperoleh dari $\frac{2}{3}$ Hs (tinggi *subgrade*) dimana tinggi timbunan diasumsikan 100 cm berdasarkan

Tabel 2.13 yaitu ketinggian akhir timbunan yang dicapai < 2 m (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017). Tebal *load plate* 10 cm (standar minimum tebal pelat di atas Geofom), diberi beban mulai dari 0 – 20 kN mengacu pada SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan, dimana beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan menggunakan beban truk T dilakukan permodelan dengan beban terpusat menggunakan beban gandar terbesar 112,5 kN. Tinggi muka air berada di permukaan tanah dasar. Kondisi ini dianggap sebagai kondisi tanah dasar basah.

3. Kondisi 3



Gambar 3.14. Model Percobaan 4 Kondisi 3 Geofom Tebal 40 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton)

Sumber: Olahan Penelitian

Tebal tanah dasar diambil 60 cm, tebal Geofom 40 cm diperoleh dari $\frac{2}{3}$ Hs (tinggi *subgrade*) dimana tinggi timbunan diasumsikan 100 cm berdasarkan Tabel 2.13 yaitu ketinggian akhir timbunan yang dicapai < 2 m (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017). Tebal *load plate* 10 cm (standar minimum tebal pelat di atas Geofom), diberi beban mulai dari 0 – 20 kN mengacu pada SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan, dimana beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan menggunakan beban truk T dilakukan permodelan dengan beban terpusat menggunakan beban gandar terbesar 112,5 kN. Tinggi muka air berada di tengah tebal plat beton. Percobaan ini dianggap sebagai kondisi tanah dasar basah.

3.4. Metode Pengumpulan Data Penelitian

Metode pengumpulan data dilakukan dengan metode eksperimen di laboratorium dan metode elemen hingga. Tahapan eksperimen antara lain :

1. Pengambilan Sampel tanah di lapangan

Dilakukan pengambilan sampel tanah terganggu dan tanah tidak terganggu untuk sampel penelitian. Sampel tanah terganggu diambil menggunakan alat berat untuk diuji sifat mekanis tanah dan untuk dijadikan sampel model eksperimental sebagai *subgrade*. Sampel tanah tidak terganggu diambil menggunakan *hand auger boring* pada kedalaman 1 – 2 m.

2. Uji tanah di laboratorium

Tanah yang telah diambil di lapangan, kemudian dilakukan pengujian di laboratorium, parameter yang didapat nantinya untuk menentukan klasifikasi tanah dan untuk mendapat nilai daya dukung tanahnya. Untuk pengujian yang akan dilakukan adalah :

a) Uji sifat – sifat fisik

- Pengujian analisa saringan

Untuk pengujian analisa saringan menggunakan standar SNI 3423-2008.

- Pengujian kadar air

Untuk pengujian kadar air menggunakan standar SNI 1965-2008.

- Pengujian berat isi tanah

Untuk pengujian berat isi tanah menggunakan standar SNI 03-3637-1994.

- Pengujian *atterberg*

- Untuk pengujian *atterberg* menggunakan standar SNI 1967 – 2008.

- Pengujian berat jenis

Untuk pengujian berat jenis standar SNI 1964 – 2008.

b) Uji sifat – sifat mekanis

- Uji *triaxial compression test*

Untuk pengujian kuat geser menggunakan standar SNI 4813:2015.

- Uji CBR laboratorium
Untuk pengujian CBR (*California Bearing Ratio*) menggunakan standar SNI 03-1744-2008.
- Uji *proctor*
Untuk pengujian pemadatan tanah menggunakan standar SNI 1742-2008.

3. Uji beton K-250

Beton K-250 dengan komposisi terdiri dari agregat kasar, agregat halus, semen, dan air. Sebelumnya dibuat terlebih dahulu *Job Mix Design* (JMD) beton, kemudian dilakukan *trial mix design* dalam bentuk silinder, dimana mutu beton K-250 setara dengan f_c 20 MPa. Komposisi ini nanti yang akan dijadikan acuan dalam pembuatan pelat beton.

4. Tahap persiapan benda uji

Material yang digunakan dalam pembuatan bak uji sebagai wadah tanah lunak dan tempat *prototype* adalah sebagai berikut :

- a. Bak uji dirangkai dari bahan plat besi, plat strip, besi siku dan kaca transparan dengan dimensi bak uji 200 cm x 50 cm x 110 cm.
- b. Rangka utama bak uji dari plat strip 8 mm untuk rangka tengah dan atas, dan besi siku 70.70.5 mm untuk rangka bawah.
- c. Dinding bagian bawah terbuat dari plat besi 5 mm.
- d. Dinding bagian samping dan belakang terbuat dari plat besi 5 mm.
- e. Dinding bagian depan terbuat dari kaca transparan $t = 12$ mm.
- f. Rangkaian bajan dan dinding dihubungkan dengan menggunakan las.

5. Tahap pengujian model *prototype*

- a) Pengujian dengan beban vertikal dengan kondisi tanah dasar kering

Bak uji yang sudah diisi dengan tanah lunak. Timbunan dengan Geofom tanpa Geofom. Pada saat dilakukan pengujian beban awal yang diberikan adalah 5 kN dengan bantuan *hydraulic jack* dan *load cell*, dari pembebanan ini data-data akan terekam langsung kedalam data *logger* yang sudah terhubung dengan komputer. *Settlement* yang terjadi akan tercatat dalam

data *logger* yang dibaca dengan alat LVDT. Kemudian dilanjutkan dengan tahap selanjutnya dengan beban 10 kN, 15 kN, dan 20 kN.

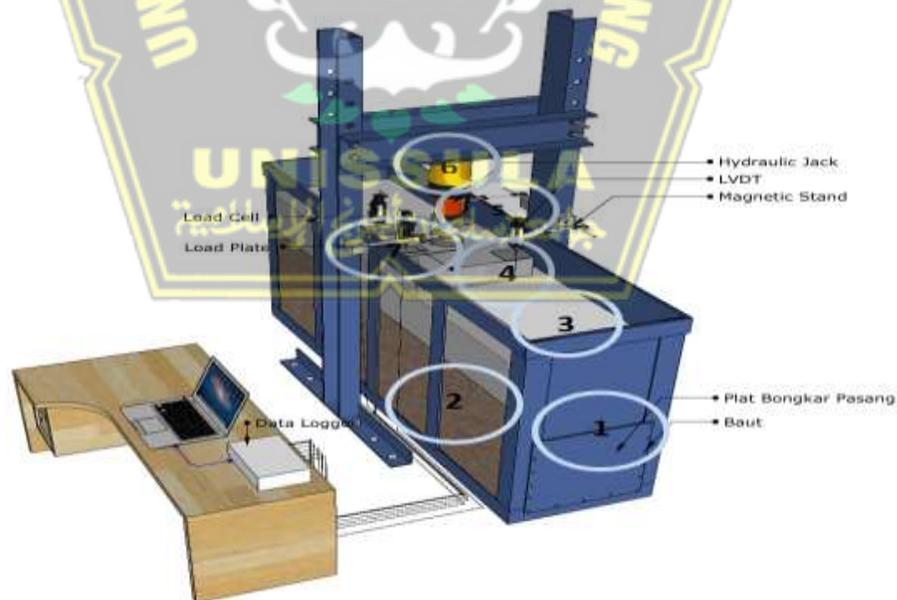
- b) Pengujian dengan beban vertikal dengan kondisi tanah dasar basah
Bak uji yang sudah diisi dengan tanah lunak. Timbunan dengan Geofom tanpa Geofom. Pada saat dilakukan pengujian beban awal yang diberikan adalah 5 kN dengan bantuan *hydraulic jack* dan *load cell*, dari pembebanan ini data-data akan terekam langsung kedalam data *logger* yang sudah terhubung dengan komputer. *Settlement* yang terjadi akan tercatat dalam data *logger* yang dibaca dengan alat LVDT. Kemudian dilanjutkan dengan tahap selanjutnya dengan beban 10 kN, 15 kN, dan 20 kN.

6. Tahap analisa numerik

Tahapan ini dibantu dengan *software Finite Element Method* dengan program Plaxis 2D versi 2023 untuk mendapatkan hasil *settlement* .

3.5. Instrument dan Proses Penelitian

Instrument penelitian berupa model fisik adalah seperti Gambar 3.15 berikut :



Gambar 3.15. Skematik *Prototype* Penelitian

Sumber: Olahan Penelitian

Keterangan :

1. Bak uji yang terbuat dari plat besi 5 mm dan kaca tebal 12 mm.
2. Tanah lunak dalam bak uji sebagai model *subgrade*.
3. Geofom sebagai timbunan.
4. Pelat beton bertulang.
5. Batang penghubung, *load cell*.
6. *Hydroulik jack*
7. LVDT

Tanah lunak yang dimasukkan ke dalam bak uji tebal 60 cm, asumsi tebal 60 cm berdasarkan Tabel 2.13 dimana ketinggian akhir timbunan akhir timbunan yang dicapai < 2 m (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017). Pada eksperimen waktu tunggu sampai dengan tanah dalam kondisi 100% *saturated* adalah selama 24 jam (1 hari). Titik pantau pengamatan penurunan pada LVDT dan direkam oleh data logger.

3.5.1 Tahap Persiapan Alat dan Pembuatan Benda Uji

Pada tahap persiapan, langkah awal yang dilakukan adalah belajar teori dan aplikasi yang berkaitan dengan ilmu geoteknik dan melakukan study literatur terkait perkembangan terbaru bidang geoteknik yang sesuai dengan tema penelitian. Tahap selanjutnya adalah persiapan material yaitu material untuk membuat bak uji, tanah lunak untuk sampel penelitian, dan pembelian Geofom pada PT. Panca Cipta Bersama yang berada di Jakarta. Material ini nantinya akan dibuat untuk model pada saat eksperimental.

Penyelidikan tanah dilakukan bersamaan dengan pembuatan model bak uji dan pembelian Geofom. Penyelidikan tanah yang dilakukan adalah pengambilan sampel tanah terganggu (*disturbed soil*) dengan menggunakan cangkul dan sampel tanah tidak terganggu (*undisturbed soil*) dengan menggunakan *hand auger boring*. Sampel tanah tersebut dibawa ke laboratorium untuk dilakukan pengujian sifat fisis dan mekanis tanah yang merujuk kepada kajian pustaka. Karakteristik beton yang digunakan sebagai *loading plat* yaitu K-250 setara dengan $f_c' 20$ Mpa.

Setelah semua bahan eksperimental telah dipersiapkan, selanjutnya dilakukan perakitan seluruh instrument yang digunakan. Alat-alat instrument yang digunakan adalah :

1. *Load Cell*

Load cell dapat membaca beban yang diberikan pada model, yang besarnya langsung terbaca paad data *logger*. *Load cell* yang digunakan pada penelitian ini yaitu 1 (satu) unit kapasitas 50 ton. Gambar 3.16 berikut adalah Gambar *Load cell* yang digunakan :



Gambar 3.16. *Load Cell* Kapasitas 50 Ton

Sumber: Dokumentasi Penelitian

2. LVDT

Linier Variabel Differential Transformer (LVDT) adalah sensor yang daya kerjanya dapat melihat penurunan yang terjadi. LVDT dipasang pada permukaan *geofoam* yaitu pada 4 titik yang diletakkan pada bagian masing-masing sudut *geofoam*. LVDT yang digunakan ukuran 50 mm, seperti Gambar 3.17 berikut :



Gambar 3.17. LVDT Ukuran 50 mm

Sumber: Dokumentasi Penelitian

3. *Data Logger* (Perekam Data)

Data *logger* adalah sebuah alat elektronik yang fungsinya mencatat data-data dari waktu ke waktu secara kontinu dari suatu percobaan. Data *logger* yang sudah dihubungkan dengan LVDT akan langsung terhubung dengan perangkat komputer sehingga data-data pergerakan Geofom dan beban yang diberikan akan terekam secara terus menerus kedalam komputer. Gambar 3.18 berikut adalah Gambar Data *logger* :



Gambar 3.18. Data *Logger*

Sumber: Dokumentasi Penelitian

4. Kamera

Digunakan untuk memantau atau memotret perilaku yang terjadi pada benda uji khususnya data penurunan. Kamera diletakkan pada bagian box uji yang transparan (kaca).

5. Komputer

Komputer fungsinya sebagai alat bantu perekaman data dan pengolahan data.

6. *Hydroulic Jack*

Hydroulic jack adalah dongkrak yang digerakkan secara manual yang memiliki kapasitas 2 Ton.

3.5.2 Pelaksanaan Pengujian di Laboratorium

Pengujian yang dilakukan pada eksperimen ini adalah :

1. Tahap pengujian material

Pengujian sampel tanah lunak yang dilakukan adalah pengujian sifat fisis dan sifat mekanis tanah lunak. Pengujian yang dilakukan adalah :

a. Pengujian analisa saringan

- Untuk pengujian analisa saringan menggunakan standar SNI 3423-2008.
- b. Pengujian kadar air
Untuk pengujian kadar air menggunakan standar SNI 1965-2008.
 - c. Pengujian berat isi tanah
Untuk pengujian berat isi tanah menggunakan standar SNI 03-3637-1994.
 - d. Pengujian *atterberg*
Untuk pengujian *atterberg* menggunakan standar SNI 1967 – 2008.
 - e. Pengujian berat jenis
Untuk pengujian berat jenis standar SNI 1964 – 2008.
 - f. Uji kuat geser
Untuk pengujian kuat geser menggunakan standar SNI 3420:2016.
 - g. Uji CBR laboratorium
Untuk pengujian CBR (*California Bearing Ratio*) menggunakan standar SNI 03-1744-2008.
 - h. Uji *proctor*
Untuk pengujian pemadatan tanah menggunakan standar SNI 1742-2008.
2. Tahap pengujian model bak uji
Tahap pengujian beban yang diberikan adalah :
- a. Pengujian dengan beban vertikal 5 kN
Sampel tanah lunak sudah dimasukkan ke dalam bak uji sesuai dengan dimensi yang telah direncanakan, tanah lunak ini dimodelkan sebagai tanah dasar (*subgrade*). Di atas tanah lunak dipasang Geofom sesuai dengan dimensi yang direncanakan. Pada tahapan pengujian benda uji akan diberikan secara beban vertikal sebesar 5 kN dengan tumpuan beban pada *loading plat* ukuran 60 cm x 40 cm dengan tebal 10 cm, dengan *load cell* untuk mengontrol beban yang diberikan dan bantuan *hydraulic jack* untuk menekan sampel. Hasil pengujian pada pembebanan pertama data akan langsung terekam ke dalam data *logger* dengan LVDT yang berfungsi untuk membaca penurunan yang terjadi. Tahap selanjutnya menambah beban sebesar 5 kN sehingga beban menjadi 10 kN, demikian selanjutnya sampai beban akhir

sebesar 20 kN. Semua data pengujian direkam pada data *logger*, disamping itu juga dicatat secara manual, dengan cara membuat ukuran pada kaca bak uji.

b. Pengujian dengan beban vertikal kondisi terendam air

Tahap ini sebagaimana tahap sebelumnya, tetapi pada tahap ini diberi air setinggi permukaan tanah lunak, kemudian diberi pembebanan seperti yang dijelaskan point 1. Dilanjut tahap selanjutnya pada kondisi terendam sampai permukaan Geofom dan diberi pembebanan bertahap.

3.5.3 Tahap Pengumpulan Data

Hasil eksperimental yang dilakukan pada timbunan Geofom pada tanah lunak dengan skala kecil yang dilakukan di laboratorium, akan terkumpul data – data seperti besaran penurunan (*settlement*) pada besaran beban vertikal yang diberikan, pengukuran dilakukan menggunakan data *logger* yang terhubung dengan komputer.

Pengumpulan data dari perhitungan numerik dengan menggunakan *Finite Element Method* dengan bantuan program Plaxis 2D versi 2023 dilakukan untuk mengetahui besaran deformasi yang terjadi pada pembebanan vertikal yang sesuai dengan tahapan pembebanan, yang selanjutnya dibandingkan dengan data eksperimen di laboratorium.

3.5.4 Tahap Analisa Data dan Penyajian Hasil Penelitian

Analisis data laboratorium dan analisis numerik dengan program Plaxis 2D versi 2023 disajikan dalam bentuk grafik ataupun tabel sesuai dengan tahapan pembebanan. Data-data yang akan dianalisis adalah sebagai berikut :

1. Membandingkan setiap besar beban yang diberikan terhadap penurunan (*settlement*) yang terjadi.
2. Perhitungan gaya apung yang terjadi akibat *uplift* Geofom akibat terendam air.
3. Melakukan studi komperasi dari hasil eksperimen di laboratorium dengan hasil numerik program Plaxis 2D versi 2023, dan berapa besar kesesuaiannya.

Penyajian hasil penelitian akan disajikan dalam beberapa bentuk yaitu :

1. Tabel dan grafik hubungan antara besar pembebanan dengan besar penurunan (*settlement*) akibat vertikal beban vertikal yang sama dari pengujian model di laboratorium dan numerik program Plaxis 2D versi 2023.
2. Tabel dan grafik hubungan gaya apung yang terjadi akibat *uplift* Geofom yang terendam air dengan tebal geofom berdasarkan pengujian model di laboratorium dan numerik program Plaxis 2D versi 2023.

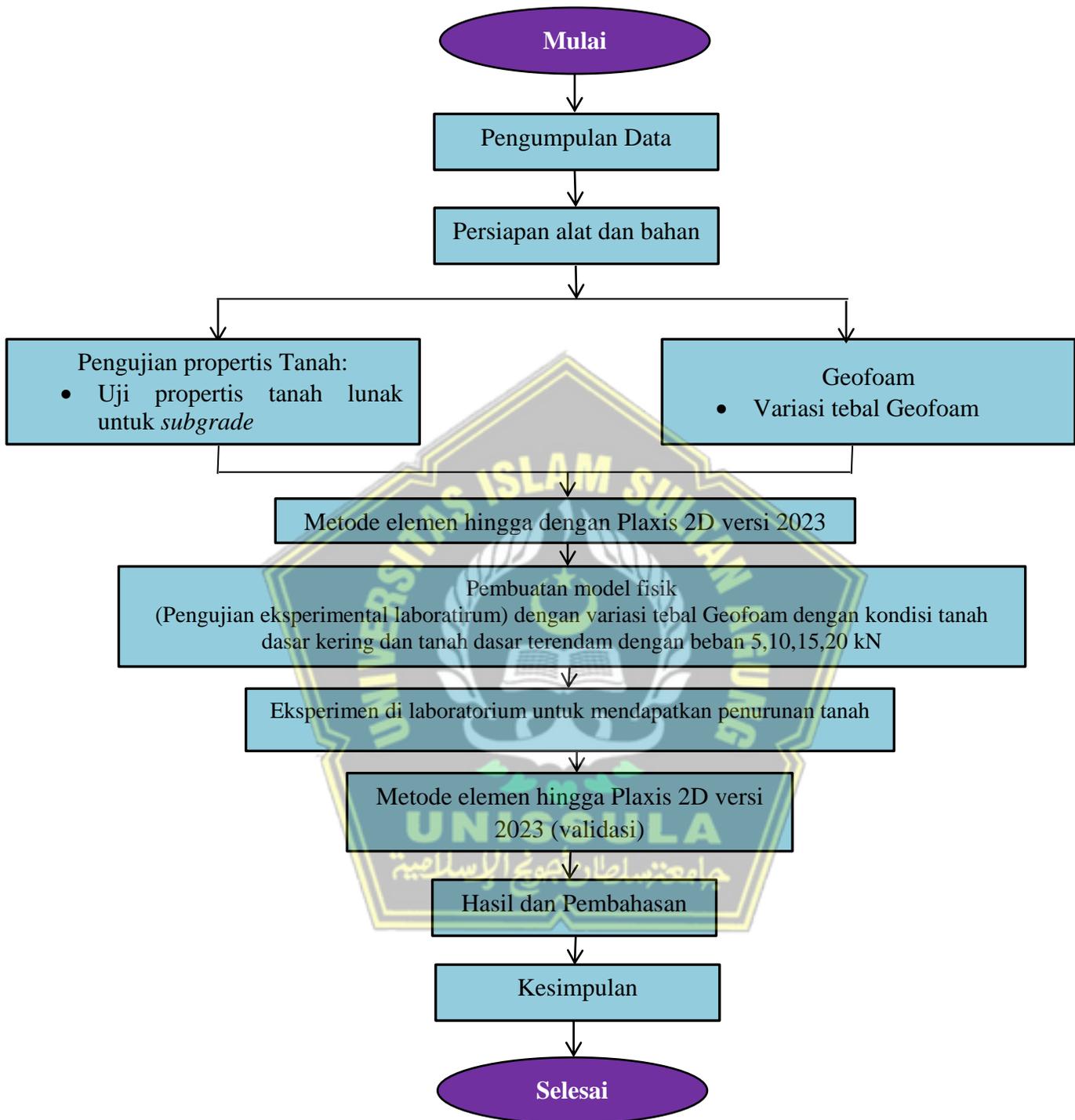
3.6 Metode Analisis

Tahapan dalam menganalisis yang dilaksanakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Pengambilan tanah di lapangan dengan menggunakan *handbore*.
2. Melakukan pengujian di laboratorium untuk mengetahui karakteristik propertis tanah. Pengujian tanah dilakukan di laboratorium Mekanika Tanah Program Studi Teknik Sipil Universitas Lancang Kuning dan laboratorium Mekanika Tanah Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru.
3. Melakukan uji model (eksperimen) di laboratorium untuk menganalisis penurunan tanah.
4. Melakukan analisis matematik untuk menentukan daya dukung tanah dasar yang ideal dengan timbunan Geofom.
5. Melakukan modeling (analisis numerik) dengan menggunakan aplikasi Plaxis 2D versi 2023 sebagai validasi hasil eksperimen di laboratorium.
6. Mendapatkan hasil penurunan tanah akibat variasi pembebanan dengan beban maksimum 20 kN.
7. Melakukan simulasi tebal Geofom yang efektif terhadap penurunan tanah akibat beban yang diberikan.

3.7 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian ini adalah sebagai disajikan Gambar 3.19 berikut :



Gambar 3.19. Bagan Alir Penelitian

Sumber: Olahan Penelitian

BAB IV

ANALISIS DATA DAN HASIL ANALISIS

4.1 Analisis Data

Sampel tanah yang diambil dari lapangan diuji di laboratorium untuk mendapatkan sifat fisis dan sifat mekanis tanah. Tanah ini yang digunakan untuk model eksperimen yaitu sebagai tanah dasar (*subgrade*) dalam bak uji.

Pembuatan model uji untuk pengujian eksperimen di laboratorium dengan memasukan tanah lunak yang dimodelkan sebagai tanah dasar (*subgrade*) kemudian di atas tanah dasar diletakkan Geofom yang dimodelkan sebagai timbunan. Analisis numerik juga dilakukan dengan aplikasi Plaxis 2D versi 2023. Hasil pengujian tersebut nanti akan dibandingkan analisis hasil pengujian laboratorium dan analisis numerik.

4.2 Persiapan Bak Uji

Pelaksanaan pengujian eksperimen yang dilakukan di laboratorium dan pengujian tanah di laboratorium perlu dilakukan dan direncanakan dengan baik agar hasil yang diperoleh sesuai dengan yang diinginkan.

Persiapan bak uji merupakan tahapan awal dalam mempersiapkan *prototype* eksperimen yang akan dilakukan di laboratorium. Pada persiapan ini tahapan yang akan dilakukan adalah :

1. Persiapan Material Bak Uji

Sebelum perakitan bak uji yang perlu dilakukan adalah persiapan material masing – masing yang akan digunakan sebagai bahan untuk membuat bak uji. Penyediaan bak uji ukuran 200 cm x 50 cm x 110 cm, dengan menggunakan plat besi 5 mm, plat strip 8 mm untuk rangka tengah, dan besi siku 70.70.5 mm untuk rangka bagian bawah. Pada bagian depan dari bak uji ditutup dengan kaca tebal

12 mm, fungsi kaca disini untuk mempermudah melihat secara visual proses terjadinya penurunan pada tanah saat dibebani.

2. Pembuatan Bak Uji

Rangka bak uji untuk yaitu rangka utama dari plat strip 8 mm untuk rangka tengah dan rangka, besi siku 70.70.5 mm untuk rangka bawah. Untuk rangka bak uji seperti Gambar 4.1 berikut :



Gambar 4.1. Proses Pembuatan Rangka Bak Uji

Sumber: Dokumentasi Penelitian

Perakitan bak uji dilakukan dengan cara menyambung *joint-joint* dengan menggunakan alat las agar bak uji menjadi kaku dan kuat sehingga tidak terjadi kegagalan pada saat melakukan eksperimen. Bak uji dengan frame *hidroulik jack* dibuat terpisah, Gambar 4.2 berikut adalah Gambar bak uji dan frame *hidroulik jack* :



Gambar 4.2. Bak Uji dan Frame *Hidroulik Jack*

Sumber: Dokumentasi Penelitian

4.3 Pengujian Tanah Lunak

Beberapa tahapan untuk mengetahui sampel tanah yang akan dijadikan sebagai model tanah dasar (*subgrade*) dalam bak uji, maka perlu dilakukan pengujian laboratorium untuk memastikan sampel tanah yang digunakan adalah tanah lunak. Tahapan persiapan tanah lunak adalah sebagai berikut :

1. Data tanah lunak diperoleh dari penyelidikan lapangan untuk pengambilan sampel tanah. Sampel tanah terganggu diambil menggunakan cangkul pada kedalaman 1 m. Sebelumnya dibuat lubang ukuran sekitar 1 m x 1m x 1m pada satu titik, setelah itu diambil sampel tanah terganggu (*disturbed*) untuk dilakukan pengujian di laboratorium. Gambar 4.3 berikut adalah Gambar pengambilan sampel tanah terganggu (*disturbed*) :



Gambar 4.3. Proses Pengambilan Sampel Tanah Terganggu (*Disturbed*)

Sumber : Dokumentasi Penelitian

Sampel tanah terganggu ini dibawa ke laboratorium untuk dilakukan pengujian CBR laboratorium dan pengujian *proctor* (pemadatan laboratorium). Tujuan penelitian ini adalah untuk memastikan tanah yang akan di uji sesuai dengan kriteria tanah lunak yaitu daya dukung rendah berdasarkan nilai CBR yaitu $< 6\%$. Sampel tanah tak terganggu (*undisturbed*) diperoleh dengan menggunakan alat *hand auger boring* sebanyak 1 titik dari kedalaman 0,5 m – 1,00 m. jumlah sampel yang diperoleh adalah sebanyak 1 sampel. Gambar 4.4 berikut adalah Gambar proses pengambilan sampel tanah tak terganggu (*undisturbed*).



Gambar 4.4. Proses Pelaksanaan Pengambilan Tanah Tak Terganggu
(*Undisturbed*)

Sumber: Dokumentasi Penelitian

2. Pengujian Tanah di Laboratorium

Sampel tanah yang sudah diambil di lapangan dibawa ke laboratorium untuk mendapatkan klasifikasi tanah. Hasil pengujian tanah asli disajikan Tabel berikut:

Tabel 4.1. Rekapitan Data Pengujian Tanah Asli

Pengujian		Hasil	Satuan
Berat volume basah (γ_b)		20,47	kN/m ³
Berat volume kering (γ_d)		14,47	kN/m ³
Angka pori (e)		0,80	-
Porositas (n)		0,44	-
Kadar air (w)		41,49	%
Berat jenis (G_s)		2,649	-
Sieve analisis	Gravel	0,00	%
	Sand	1,07	
	Silt		
	Clay	98,93	
Atterberg Limits	LL	50,80	%
	PL	35,27	
	PI	15,53	
Triaxial UU	c	20,98	kN/m ²
	ϕ	4,551	°

Sumber : Hasil Pengujian

Pengujian sifat mekanis tanah dengan melakukan pengujian *triaxial compression test* untuk mendapatkan nilai kohesi (c) dan sudut geser (ϕ). Parameter ini

digunakan untuk input dalam analisis Plaxis 2D. Dokumentasi pengujian laboratorium ditampilkan pada Gambar 4.5 berikut :



Gambar 4.5. Pengujian *Triaxial Test*

Sumber: Dokumentasi Penelitian

3. Pengisian Tanah Kedalam Bak Uji

Tanah dimasukkan secara manual kedalam bak uji dengan bantuan alat yaitu cangkul dan ember. Pengisian tanah dalam bak uji dilakukan secara bertahap sampai tinggi 60 cm. Proses pengisian dan pemadatan dilakukan per lapisan yaitu setiap 20 cm dilakukan pemadatan dengan cara memukul permukaan tanah dengan menggunakan alat pemadat manual yang terbuat dari kayu.

4. Persiapan Pelat Beton

Pelat beton yang digunakan adalah beton kelas C, digunakan untuk struktur dengan daya beban beton rendah, mutu betonnya adalah K-250 atau setara dengan $f_c'20$ Mpa. Komposisi beton terdiri dari :

A. Agregat kasar

Agregat kasar yang digunakan adalah batu pecah ukuran ½ mm yang diambil dari *quarry* Kampar.

B. Agregat halus

Agregat halus yang digunakan adalah diambil dari *quarry* Kampar.

C. Semen

Semen yang digunakan adalah semen *Portland Cement Composit (PCC)* dari Semen Padang.

D. Air

Dari hasil uji tekan yang diperoleh yaitu sesuai dengan mutu beton K-250 atau setara dengan $f'c$ 20 MPa, maka komposisi tersebut akan dijadikan acuan sebagai *loading plate*. Untuk nilai mutu beton $f'c$ 20 MPa adalah sebagai berikut :

Tabel 4.2. Hasil Pegujian Kuat Tekan Beton

Benda Uji	Umur beton (Hari)	Mutu Beton (MPa)	Mutu Beton Rencana (MPa)
Sampel 1	7	27,88	20
Sampel 2	7	20,51	20
Sampel 3	7	26,63	20
Sampel 4	28	21,83	20
Sampel 5	28	20,82	20
Sampel 6	28	20,65	20

Sumber : Hasil Penelitian

Dari hasil uji beton yang dilakukan, maka Job Mix Design Rencana untuk mutu beton $f'c$ 20 MPa bisa digunakan untuk membuat *loading plate* pada bak uji. Persiapan *loading plate* dimulai dengan merakit tulangan baja BJTP diameter 8 mm pada bagian pelat, tahap selanjutnya adalah melakukan pengecoran pada mutu beton $f'c$ 20 MPa. Sebelum pengecoran dilakukan dibuat bekisting dari multiplek ukuran 60 cm x 40 cm x 10 cm. Pengecoran dilakukan secara manual, pada saat pengecoran dilakukan pemukulan atau diberi getaran agar pelat bisa padat dan tidak ada rongga dalam beton. Setelah pengecoran dilakukan dan mutu beton sudah mencapai 100%

sekurang-kurangnya umur beton 21 hari setelah pengecoran, maka bekisting sudah bisa dilepas. Gambar 4.6 pelat beton K250 disajikan seperti Gambar berikut :



Gambar 4.6. *Loading Plate* Beton K250

Sumber : Dokumentasi Penelitian

4.4 Persiapan *Prototype* dan Pemasangan Instrumen

Instrumen yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari persiapan *prototype* Geofom, sesuai dengan dimensi yang akan diuji. Pemasangan instrument untuk pengujian yang dikerjakan di labortaorium.

4.4.1 Persiapan *Prototype* Geofom

Geofom yang digunakan adalah Geofom EPS 22 diletakkan di atas tanah lunak (*subgrade*), untuk dimensi Geofom yang digunakan adalah :

Tabel 4.3. Dimensi Geofom

Benda Uji	Dimensi (cm)
Geofom 1	180 x 50 x 40
Geofom 2	180 x 50 x 30
Geofom 3	180 x 50 x 20

Sumber : Hasil Penelitian

Tahapan persiapan *prototype* Geofom adalah :

1. Memotong Geofom sesuai dengan dimensi yang sudah direncanakan. Untuk memotong Geofom menggunakan alat pemotong gabus.
2. Menimbang Geofom untuk mendapatkan berat Geofom .
3. Memasukkan Geofom dalam bak uji.

4.4.2 Pemasangan Instrumen Data Logger

Instrumen *data logger* digunakan untuk merekam data pergerakan Geofoam ketika diberi beban. *Data logger* berkapasitas 7 kabel data yang terhubung dengan LVDT dan langsung dihubungkan dengan komputer, setiap kabel data yang terhubung dengan instrument LVDT diberi kode untuk memudahkan dalam analisis pada komputer.

Pengkodean kabel data dalam *data logger* yang terhubung dengan komputer seperti pada Tabel 4.4. berikut :

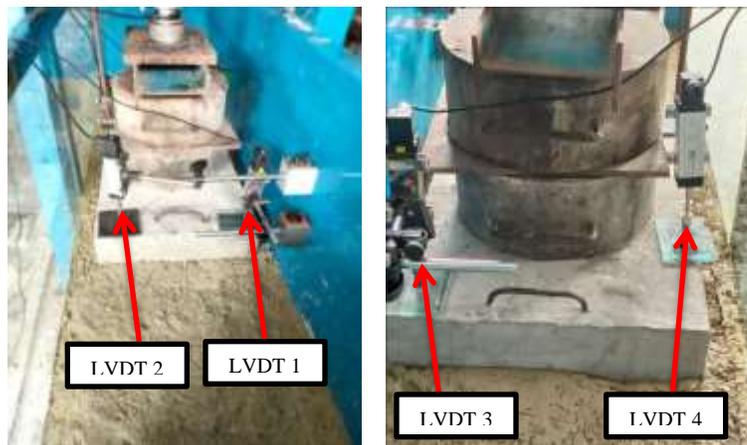
Tabel 4.4. Perletakkan dan Kode Sensor LVDT

No	Perletakan	Sensor	Penamaan Sensor	Kode
1	Geofoam	Sensor 1	Geofoam sudut 1	GS1
2	Geofoam	Sensor 2	Geofoam sudut 2	GS2
3	Geofoam	Sensor 3	Geofoam sudut 3	GS3
4	Geofoam	Sensor 4	Geofoam di tengah	GS4

Sumber : Hasil Penelitian

4.4.3 Pemasangan Instrumen LVDT

Linier Variabel Differential Transformer (LVDT) adalah sensor yang daya kerjanya dapat melihat penurunan yang terjadi. LVDT dipasang pada permukaan *loading plate* yaitu pada 4 titik, dengan mekanismen 3 titik diletakkan pada masing-masing sudut *loading plate* dan 1 titik di tengah bidang *loading plate* . LVDT yang digunakan ukuran 50 mm. Pemasangan LVDT digunakan untuk melihat penurunan yang terjadi pada Geofoam akibat diberi beban. LVDT kemudian disambungkan pada *data logger* agar nanti bisa direkam pembacaannya. Gambar 4.7 adalah pemasangan LVDT sebagai berikut :



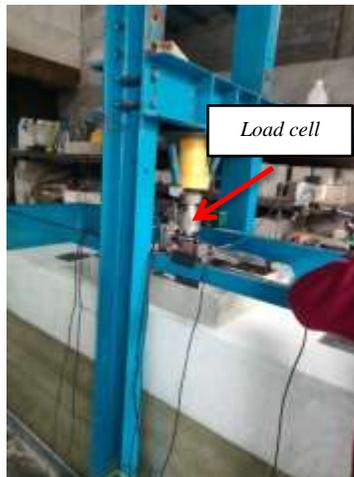
Gambar 4.7. Pemasangan LVDT

Sumber : Dokumentasi Penelitian

Data logger disambungkan ke laptop untuk merekam pembacaan penurunan tanah yang terjadi akibat variasi beban yang diberikan melalui *hydraulic jack*. Variasi beban diberikan secara bertahap mulai dari beban 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN, dan 20 kN.

4.4.4 Pemasangan Instrumen *Load Cell*

Load cell dapat membaca beban yang diberikan pada model, yang besarnya langsung terbaca pada *data logger*. *Load cell* yang digunakan pada penelitian ini yaitu 1 (satu) unit kapasitas 50 ton. Instrumen ini berfungsi untuk memastikan beban yang diberikan sudah sesuai dengan kebutuhan yaitu 5 kN, 10 kN, 15 kN, dan 20 kN. Pemasangan *load cell* disajikan Gambar 4.8 berikut :



Gambar 4.8. Pemasangan *load cell*

Sumber : Dokumentasi Penelitian

Load cell disambungkan ke data *logger* kemudian dari data *logger* disambungkan ke laptop untuk melihat beban yang diberikan dengan bantuan *hydraulic jack*.

4.5 Pelaksanaan Pengujian

Sebelum dilaksanakan pengujian, terlebih dahulu melakukan pemeriksaan terhadap *instrument* alat yang telah terpasang dan melakukan uji coba terhadap alat yang sudah terpasang untuk memastikan bahwa sensor yang telah dipasang pada material model (Geofoam) berfungsi dengan baik.

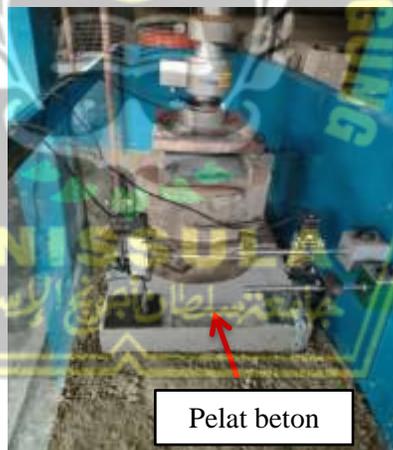
Langkah-langkah yang dilakukan dalam pelaksanaan pengujian eksperimen skala laboratorium ini adalah sebagai berikut :

1. Aplikasi pembebanan dan waktu yang diperlukan dalam skema pembebanan vertikal yang diberikan dengan bantuan dongkrak *hidrolik jack*.
2. Persiapan pembebanan vertikal
Beban vertikal yang diberikan adalah 5 kN, 10 kN, 15 kN, dan 20 kN. Pengoperasiaannya dilakukan secara manual dengan menggunakan bantuan *hidrolik jack*.
3. Pelat beton dengan dimensi 60 cm x 40 cm x 10 cm dengan berat jenis beton 2400 kg/m³ sehingga berat total (w) yang diperoleh adalah 57,6 kg setara 0,56

kN. Pelat beton terletak di bawah *load cell* sehingga fungsinya hanya sebagai perletakan beban veritikal yang akan diberikan.

4. Pelaksanaan pengujian dengan pembebanan vertikal yaitu 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN. Pengaturan kapasitas pembebanan vertikal pada *load cell* disesuaikan dengan kebutuhan.
5. Sebelum proses pengambilan data dilaksanakan, pastikan bahwa semua instrument sensor telah terpasang dengan baik.
6. Perekaman data hasil penelitian dilaksanakan setelah semua instrument sensor berfungsi dengan baik.
7. Pada saat pelaksanaan pengujian, dilakukan perekaman data ke komputer untuk mengetahui penurunan per satuan waktu sesuai dengan beban yang diberikan. Setelah peralatan terhubung dengan komputer, kemudian dilakukan perekaman selama proses pembebanan yang diberikan.

Dalam pelaksanaan eksperimen di laboratorium titik monitoring *settlement* terdapat di permukaan pelat beton seperti terlihat pada Gambar 4.9 berikut :



Gambar 4.9. Titik Monitoring *Settlement*

Sumber : Dokumentasi Penelitian

Material yang digunakan pada eksperimen di laboratorium adalah Geofom dan pelat beton. Masing-masing memiliki berat, untuk berat masing-masing material disajikan pada Tabel berikut :

Tabel 4.5. Berat Material Benda Uji

No	Material	Berat (kg)
1.	Geofoam tebal 20 cm	4,00
2.	Geofoam tebal 30 cm	6,60
3.	Geofoam tebal 40 cm	8,45
4.	Pelat beton	57,6

Sumber : Hasil Penelitian

Eksperimen skala laboratorium untuk masing – masing percobaan adalah sebagai berikut :

1. Percobaan *subgrade* tanpa Geofoam. Model percobaan Gambar 3.5. Prosesnya adalah sebagai berikut :
 - a. Masukkan tanah lunak dalam bak uji.
 - b. Uji DCP tanah lunak dan uji *sandcone* pada tanah lunak.
 - c. Masukkan *loading plate* ke dalam bak uji.
 - d. Lakukan pembebanan dengan alat *hydraulic jack* pada *loading cell*.
 - e. Hasil *settlement* tercatat pada *data loger* pada komputer.

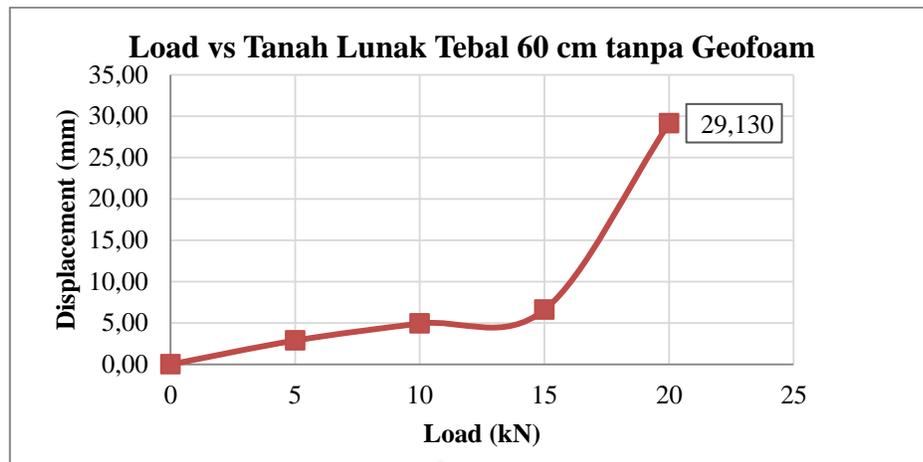
Tabel rekapan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak tebal 60 cm tanpa kekuatan Geofoam :

Tabel 4.6. *Settlement* Tanah Lunak 60 cm Tanpa Geofoam

Beban (kN)	<i>Settlement</i> (mm)
0	0
5	2,884
10	4,936
15	6,598
20	29,130

Sumber : Hasil Penelitian

Pada Eksperimen ini lama *settlement* yang terjadi dari pembebanan 0 – 20 kN adalah 2 menit. Untuk Gambar *settlement* yang terjadi pada tanah tanpa kekuatan Geofoam disajikan Gambar 4.10 berikut :



Gambar 4.10. *Settlement* Yang Terjadi Pada Tanah Lunak Tebal 60 cm Tanpa Geofoam

Sumber : Hasil Penelitian

Pada Eksperimen ini lama *settlement* yang terjadi dari pembebanan 0 – 20 kN adalah 2 menit. Pada Gambar terlihat terjadi penurunan maksimum pada beban 20 kN sebesar 29,130 mm.

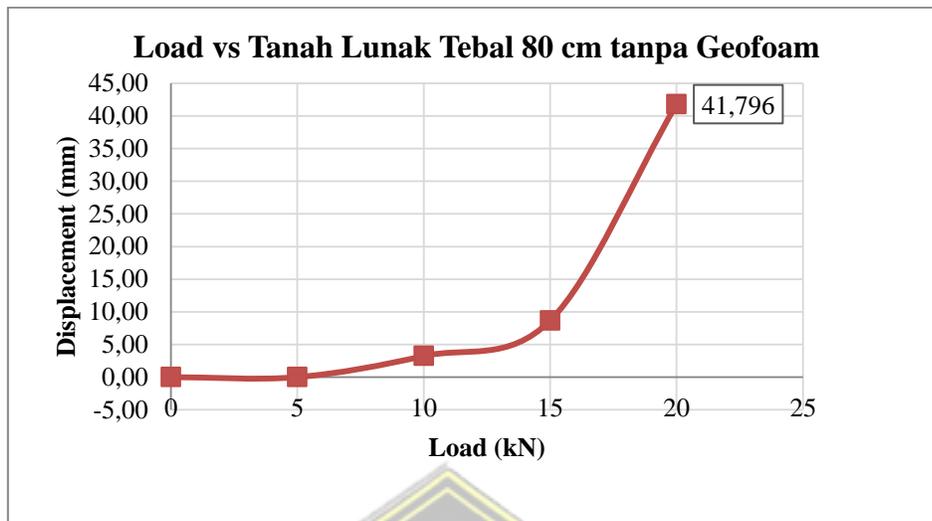
Tabel rekapan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak tebal 80 cm tanpa kekuatan Geofoam :

Tabel 4.7. *Settlement* Tanah Lunak 80 cm Tanpa Geofoam

Beban (kN)	<i>Settlement</i> (mm)
0	0
5	3,122
10	3,228
15	8,655
20	41,796

Sumber : Hasil Penelitian

Untuk Gambar *settlement* yang terjadi pada tanah lunak tebal 80 cm tanpa kekuatan Geofoam disajikan Gambar 4.11 berikut :



Gambar 4.11. *Settlement* Yang Terjadi Pada Tanah Lunak Tebal 80 cm Tanpa Geofom

Sumber : Hasil Penelitian

Pada Gambar terlihat terjadi penurunan maksimum pada beban 20 kN sebesar 41,796 mm.

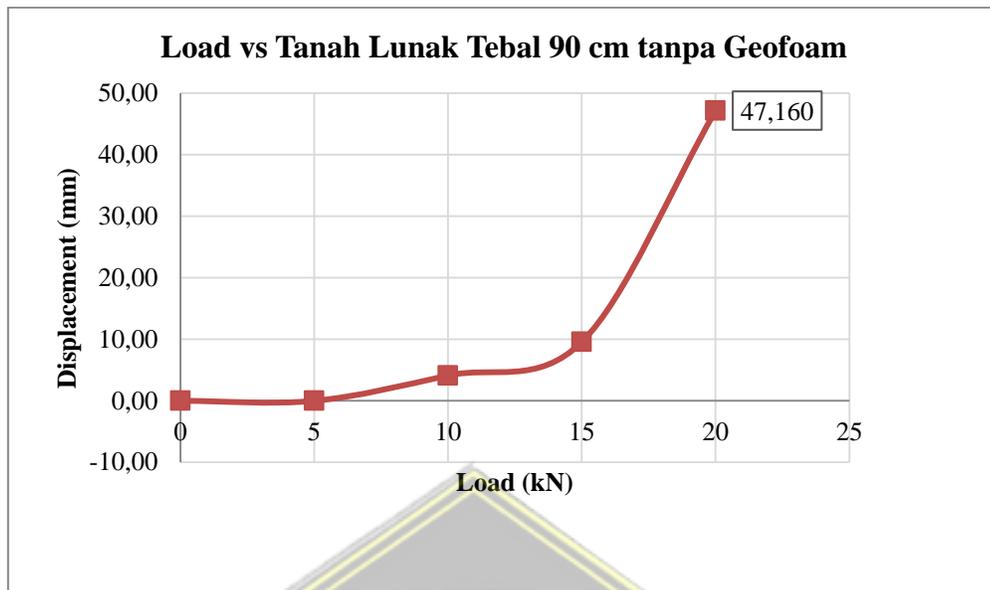
Tabel rekapan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak tebal 90 cm tanpa perkuatan Geofom :

Tabel 4.8. *Settlement* Tanah Lunak 90 cm Tanpa Geofom

Beban (kN)	<i>Settlement</i> (mm)
0	0
5	3,870
10	4,122
15	9,570
20	47,160

Sumber : Hasil Penelitian

Untuk Gambar *settlement* yang terjadi pada tanah lunak tebal 90 cm tanpa perkuatan Geofom disajikan Gambar berikut :



Gambar 4.12. *Settlement* Yang Terjadi Pada Tanah Lunak Tebal 90 cm Tanpa Geofoam

Sumber : Hasil Penelitian

Pada Gambar terlihat terjadi penurunan maksimum pada beban 20 kN sebesar 47,160 mm.

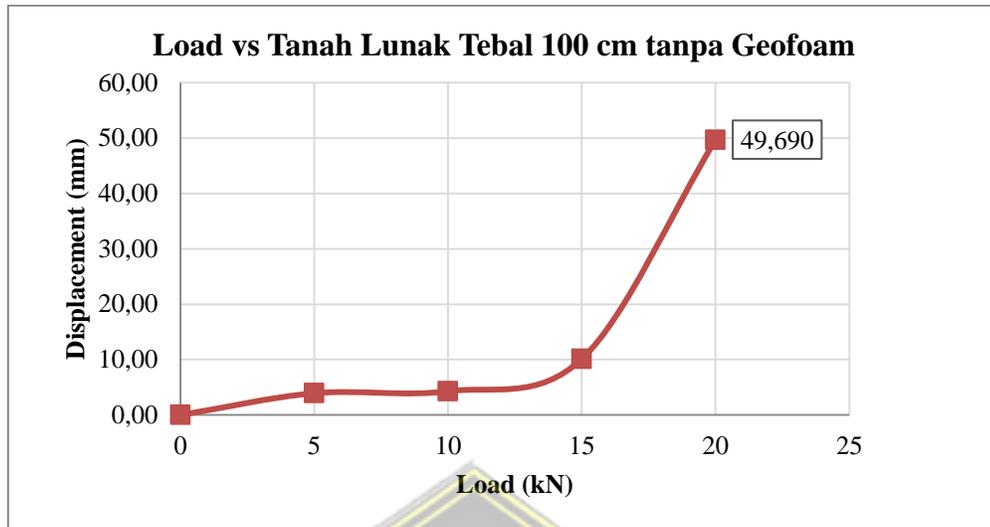
Tabel rekapan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak tebal 100 cm tanpa perkuatan Geofoam :

Tabel 4.9. *Settlement* Tanah Lunak 100 cm Tanpa Geofoam

Beban (kN)	<i>Settlement</i> (mm)
0	0
5	3,930
10	4,285
15	10,119
20	49,690

Sumber : Hasil Penelitian

Pada Eksperimen ini lama *settlement* yang terjadi dari pembebanan 0 – 20 kN adalah 2 menit. Untuk Gambar *settlement* yang terjadi pada tanah lunak tebal 100 cm tanpa perkuatan Geofoam disajikan Gambar 4.13 berikut :



Gambar 4.13. *Settlement* Yang Terjadi Pada Tanah Lunak Tebal 100 cm Tanpa Geofoam

Sumber : Hasil Penelitian

Pada Gambar terlihat terjadi penurunan maksimum pada beban 20 kN sebesar 49,690 mm.

2. Percobaan 2

Pembebanan benda uji (*subgrade*) dengan Geofoam tebal 20 cm kondisi kering. Model percobaan Gambar 3.6. Prosesnya adalah sebagai berikut :

- a. Masukkan tanah lunak tebal 60 cm dalam bak uji.
- b. Uji DCP tanah lunak dan uji *sandcone* pada tanah lunak.
- c. Masukkan *prototype* Geofoam tebal 20 cm ke dalam bak uji.
- d. Masukkan *loading plate* ke dalam bak uji.
- e. Lakukan pembebanan dengan alat *hydraulic jack* pada *loading cell*.
- f. Hasil *settlement* tercatat pada *data loger* pada komputer.

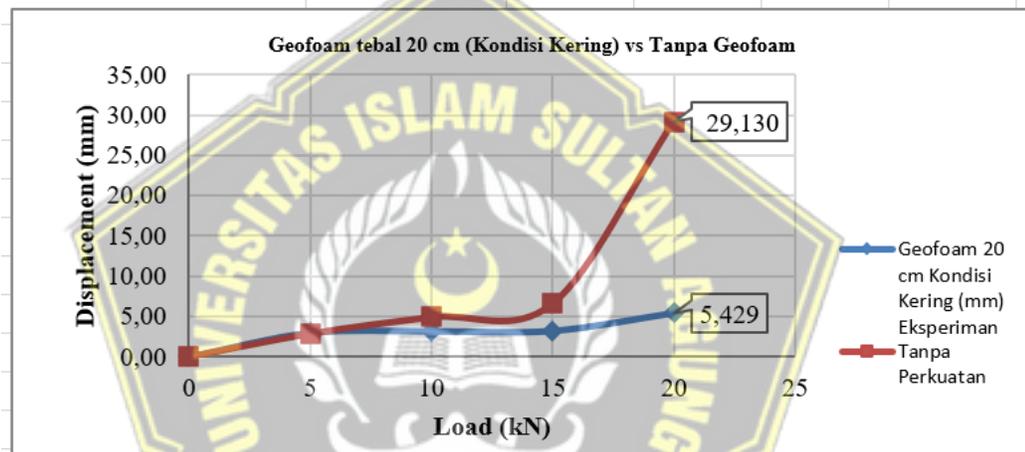
Tabel rekapan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofoam tebal 20 cm :

Tabel 4.10. *Settlement* Tanah Lunak Dengan Geofoaam Tebal 20 cm Kondisi Kering

Beban (kN)	<i>Settlement</i> (mm)
0	0
5	2,981
10	3,177
15	3,226
20	5,429

Sumber : Hasil Penelitian

Untuk Gambar *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofoaam tebal 20 cm disajikan Gambar 4.14 berikut :



Gambar 4.14. *Settlement* Yang Terjadi Pada *Subgrade* Tanah Lunak Tanpa Geofoaam dan dengan Geofoaam Tebal 20 cm

Sumber : Hasil Penelitian

Pada Gambar terlihat terjadi penurunan maksimum untuk tanah dengan Geofoaam tebal 20 cm pada beban 20 kN sebesar 5,429 mm. Geofoaam dapat mengurangi terjadinya penurunan, dimana pada tanah tanpa Geofoaam dengan tebal tanah lunak 60 cm, penurunan maksimum pada beban 20 kN sebesar 29,130 mm. Timbunan dengan Geofoaam tebal 20 cm dapat mengurangi penurunan tanah sebesar 81,36% apabila dibandingkan tanpa menggunakan Geofoaam.

3. Percobaan 3

Pembebanan benda uji (*subgrade*) dengan Geofoaam tebal 30 cm kondisi kering. Model percobaan Gambar 3.9. Prosesnya adalah sebagai berikut :

- Masukkan tanah lunak dalam bak uji.
- Uji DCP tanah lunak tebal 60 cm dan uji *sandcone* pada tanah lunak.
- Masukkan *prototype* Geofom tebal 30 cm ke dalam bak uji.
- Masukkan *loading plate* ke dalam bak uji.
- Lakukan pembebanan dengan alat *hydraulic jack* pada *loading cell*.
- Hasil *settlement* tercatat pada *data loger* pada computer.

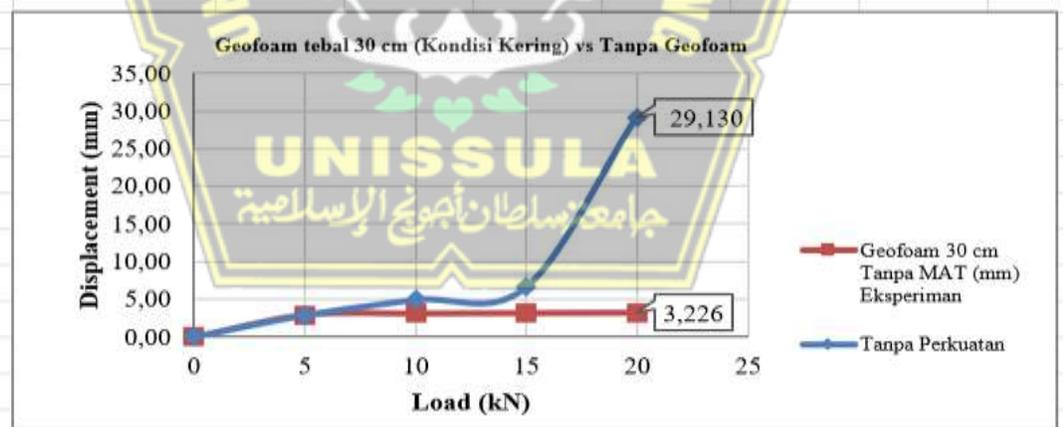
Tabel rekapan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofom tebal 30 cm :

Tabel 4.11. *Settlement* Tanah Lunak Dengan Geofom Tebal 30 cm Kondisi Kering

Beban (kN)	<i>Settlement</i> (mm)
0	0
5	2,933
10	3,128
15	3,177
20	3,226

Sumber : Hasil Penelitian

Untuk Gambar *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofom tebal 30 cm disajikan Gambar 4.17 berikut :



Gambar 4.15. *Settlement* Yang Terjadi Pada *Subgrade* Tanah Lunak Tanpa Geofoam dan Dengan Geofoam Tebal 30 cm

Sumber : Hasil Penelitian

Pada Gambar terlihat terjadi penurunan maksimum untuk tanah dengan Geofom tebal 30 cm pada beban 20 kN sebesar 3,226 mm. Geofom dapat mengurangi

terjadinya penurunan dimana pada tanah tanpa Geofom dengan tebal tanah lunak 60 cm, penurunan maksimum pada beban 20 kN sebesar 29,130 mm. Timbunan dengan Geofom tebal 30 cm dapat mengurangi penurunan tanah sebesar 88,93% apabila dibandingkan tanpa menggunakan Geofom.

4. Percobaan 4

Pembebanan benda uji (*subgrade*) dengan Geofom tebal 40 cm kondisi kering. Model percobaan Gambar 3.12. Prosesnya adalah sebagai berikut :

- a. Masukkan tanah lunak tebal 60 cm dalam bak uji.
- b. Uji DCP tanah lunak.
- c. Masukkan *prototype* Geofom tebal 40 cm ke dalam bak uji.
- d. Masukkan *loading plate* ke dalam bak uji.
- e. Lakukan pembebanan dengan alat *hydraulic jack* pada *loading cell*.
- f. Hasil *settlement* tercatat pada *data logger* pada komputer.

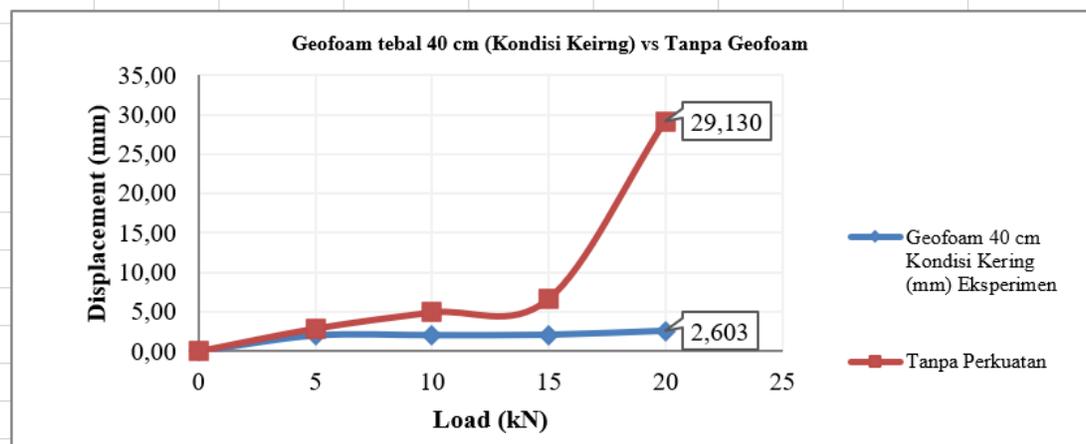
Tabel rekapan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofom tebal 40 cm :

Tabel 4.12. *Settlement* Tanah Lunak Dengan Geofom Tebal 40 cm Kondisi Kering

Beban (kN)	<i>Settlement</i> (mm)
0	0
5	2,004
10	2,053
15	2,102
20	2,603

Sumber : Hasil Penelitian

Untuk Gambar *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofom tebal 40 cm disajikan Gambar 4.16 berikut :



Gambar 4.16. *Settlement* Yang Terjadi Pada *Subgrade* Tanah Lunak Tanpa Geofoam dan Dengan Geofoam Tebal 40 cm

Sumber: Hasil Penelitian

Pada Gambar terlihat terjadi penurunan maksimum untuk tanah dengan Geofoam tebal 40 cm pada beban 20 kN sebesar 2,603 mm. Geofoam dapat mengurangi terjadinya penurunan dimana pada tanah tanpa Geofoam tebal tanah lunak 60 cm penurunan maksimum pada beban 20 kN sebesar 29,130 mm. Timbunan dengan Geofoam tebal 40 cm dapat mengurangi penurunan tanah sebesar 91,06% apabila dibandingkan tanpa menggunakan Geofoam.

5. Percobaan 5

Pembebanan benda uji (permukaan *subgrade*) dengan Geofoam tebal 20 cm kondisi muka air di bawah Geofoam (permukaan *subgrade*). Model percobaan Gambar 3.7. Prosesnya adalah sebagai berikut :

- a. Masukkan tanah lunak tebal 60 cm dalam bak uji.
- b. Uji DCP tanah lunak dan uji *sandcone* pada tanah lunak.
- c. Masukkan *prototype* Geofoam tebal 20 cm ke dalam bak uji.
- d. Masukkan air dengan Muka Air di permukaan *subgrade*
- e. Masukkan *loading plate* ke dalam bak uji.
- f. Lakukan pembebanan dengan alat *hydraulic jack* pada *loading cell*.
- g. Hasil *settlement* tercatat pada *data logger* pada komputer.

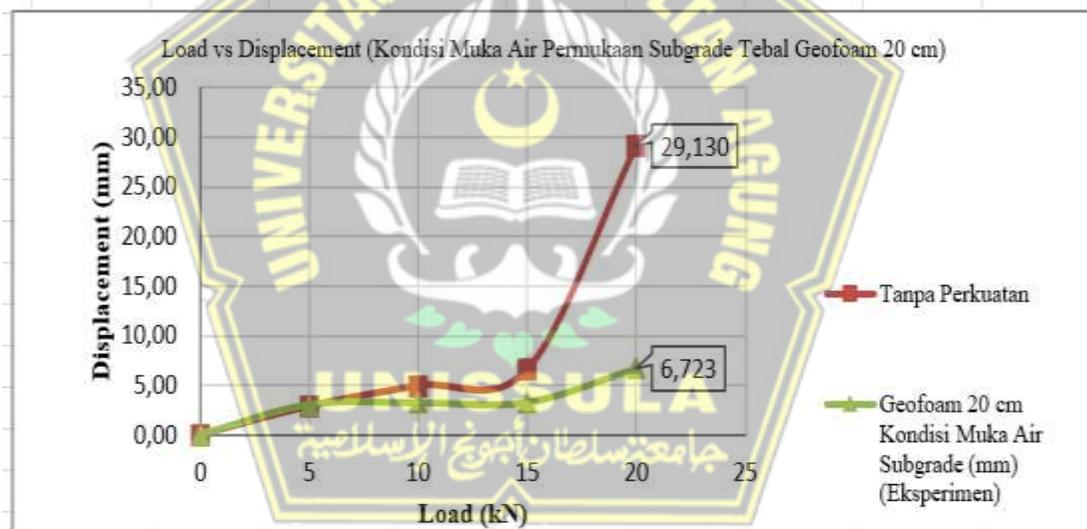
Tabel rekapan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofom tebal 20 cm kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) :

Tabel 4.13. *Settlement* Tanah Lunak Dengan Geofom Tebal 20 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofom (Permukaan *Subgrade*)

Beban (kN)	<i>Settlement</i> (mm)
0	0
5	3,073
10	3,226
15	3,274
20	6,723

Sumber : Hasil Penelitian

Untuk Gambar *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofom tebal 20 cm kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) disajikan Gambar 4.17 berikut :



Gambar 4.17. *Settlement* Yang Terjadi Pada *Subgrade* Tanah Lunak Tanpa Geofom dan Dengan Geofom Tebal 20 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofom (Permukaan *Subgrade*)

Sumber: Hasil Penelitian

Pada Gambar terlihat terjadi penurunan maksimum untuk tanah dengan Geofom tebal 20 cm kondisi muka air di bawah Geofom (Permukaan *Subgrade*) pada beban 20 kN sebesar 6,723 mm. Geofom dapat mengurangi terjadinya

penurunan dimana pada tanah tanpa Geofom penurunan maksimum pada beban 20 kN sebesar 29,130 mm. Kondisi muka air di bawah Geofom tidak mengakibatkan terjadinya penurunan tanah semakin besar apabila dibandingkan dengan tanah tanpa perkuatan Geofom, sebaliknya memperkecil terjadi penurunan pada tanah. Timbunan dengan Geofom tebal 20 cm kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) dapat mengurangi penurunan tanah sebesar 76,92% apabila dibandingkan tanpa menggunakan Geofom.

6. Percobaan 6

Pembebanan benda uji (*subgrade*) dengan Geofom tebal 30 cm kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*). Model percobaan Gambar 3.10. Prosesnya adalah sebagai berikut :

- a. Masukkan tanah lunak tebal 60 cm dalam bak uji.
- b. Uji DCP tanah lunak dan uji *sandcone* pada tanah lunak.
- c. Masukkan *prototype* Geofom tebal 30 cm ke dalam bak uji.
- d. Masukkan air dengan Muka Air di permukaan *subgrade*.
- e. Masukkan *loading plate* ke dalam bak uji.
- f. Lakukan pembebanan dengan alat *hydraulic jack* pada *loading cell*.
- g. Hasil *settlement* tercatat pada *data logger* pada komputer.

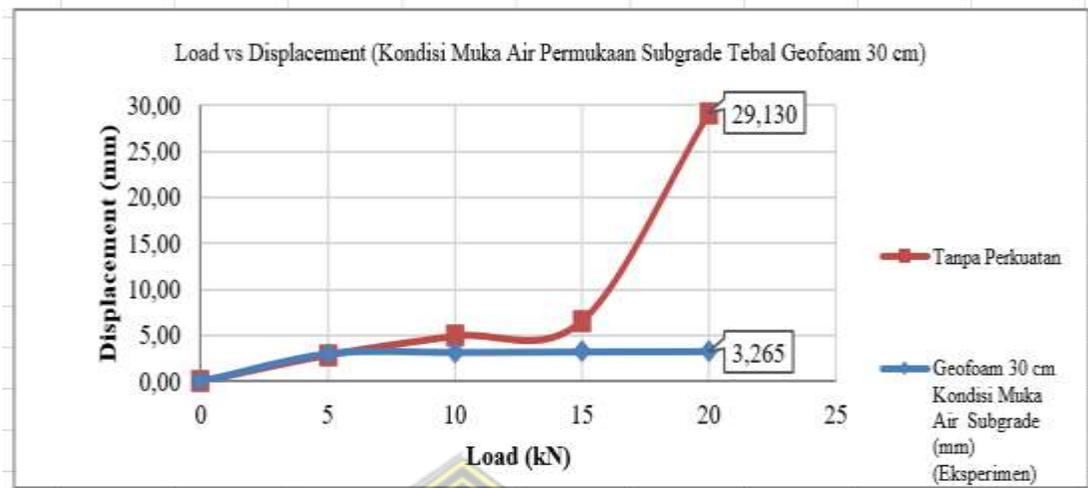
Tabel rekapan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofom tebal 30 cm Kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*):

Tabel 4.14. *Settlement* Tanah Lunak Dengan Geofom Tebal 30 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofom (Permukaan *Subgrade*)

Beban (kN)	<i>Settlement</i> (mm)
0	0
5	3,030
10	3,170
15	3,226
20	3,265

Sumber : Hasil Penelitian

Untuk Gambar *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofom tebal 30 cm kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) disajikan Gambar 4.18 berikut :



Gambar 4.18. *Settlement* Yang Terjadi Pada Tanah Lunak Tanpa Geofom dan Dengan Geofom Tebal 30 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofom (Permukaan *Subgrade*)

Sumber : Hasil Penelitian

Pada Gambar terlihat terjadi penurunan maksimum untuk tanah dengan Geofom tebal 30 cm Kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) pada beban 20 kN sebesar 3,265 mm. Geofom dapat mengurangi terjadinya penurunan dimana pada tanah tanpa Geofom penurunan maksimum pada beban 20 kN sebesar 29,130 mm. Kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) tidak mengakibatkan terjadinya penurunan tanah semakin besar apabila dibandingkan dengan tanah tanpa perkuatan Geofom, sebaliknya memperkecil terjadi penurunan pada tanah. Timbunan dengan Geofom tebal 30 cm kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) dapat mengurangi penurunan tanah sebesar 88,79% apabila dibandingkan tanpa menggunakan Geofom.

7. Percobaan 7

Pembebanan benda uji (*subgrade*) dengan Geofom tebal 40 cm dan Muka Air Tanah di permukaan *subgrade*. Model Gambar percobaan 3.13. Prosesnya adalah sebagai berikut :

- a. Masukkan tanah lunak tebal 60 cm dalam bak uji.

- b. Uji DCP tanah lunak dan uji *sandcone* pada tanah lunak.
- c. Masukkan *prototype* Geofom tebal 40 cm ke dalam bak uji.
- d. Masukkan air dengan Muka Air di permukaan *subgrade*.
- e. Masukkan *loading plate* ke dalam bak uji.
- f. Lakukan pembebanan dengan alat *hydraulic jack* pada *loading cell*.
- g. Hasil *settlement* tercatat pada *data logger* pada komputer.

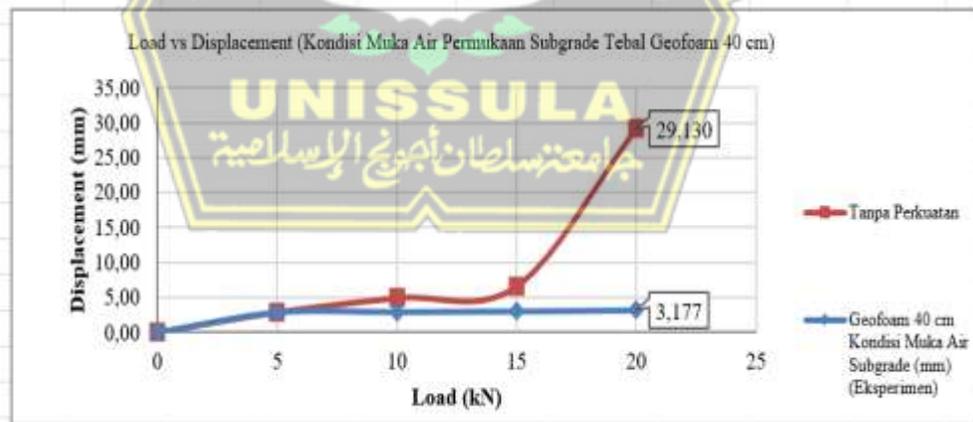
Tabel rekapan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofom tebal 40 cm kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) :

Tabel 4.15. *Settlement* Tanah Lunak Dengan Geofom Tebal 40 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofom (Permukaan *Subgrade*)

Beban (kN)	<i>Settlement</i> (mm)
0	0
5	2,884
10	2,933
15	3,030
20	3,177

Sumber : Hasil Penelitian

Untuk Gambar *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofom tebal 40 cm kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) disajikan Gambar 4.19 berikut:



Gambar 4.19. *Settlement* Yang Terjadi Pada Tanah Lunak Tanpa Geofom dan Dengan Geofom Tebal 40 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofom (Permukaan *Subgrade*)

Sumber : Hasil Penelitian

Pada Gambar terlihat terjadi penurunan maksimum untuk tanah dengan Geofom tebal 40 cm kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) pada beban 20 kN sebesar 3,177 mm. Geofom dapat mengurangi terjadinya penurunan dimana pada tanah tanpa Geofom penurunan maksimum pada beban 20 kN sebesar 29,130 mm. Muka air tidak mengakibatkan penurunan tanah terjadi semakin besar apabila dibandingkan dengan tanah tanpa perkuatan Geofom, sebaliknya memperkecil terjadi penurunan pada tanah. Timbunan dengan Geofom tebal 40 cm kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) dapat mengurangi penurunan tanah sebesar 89,09% apabila dibandingkan tanpa menggunakan Geofom.

8. Percobaan 8

Pembebanan benda uji (*subgrade*) dengan Geofom tebal 20 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton). Model percobaan Gambar 3.8. Prosesnya adalah sebagai berikut :

- a. Masukkan tanah lunak dalam bak uji.
- b. Uji DCP tanah lunak.
- c. Masukkan *prototype* Geofom tebal 20 cm ke dalam bak uji.
- d. Masukkan air dengan Muka Air di pelat beton.
- e. Masukkan *loading plate* ke dalam bak uji.
- f. Lakukan pembebanan dengan alat *hydraulic jack* pada *loading cell*.
- g. Hasil *settlement* tercatat pada *data logger* pada komputer.

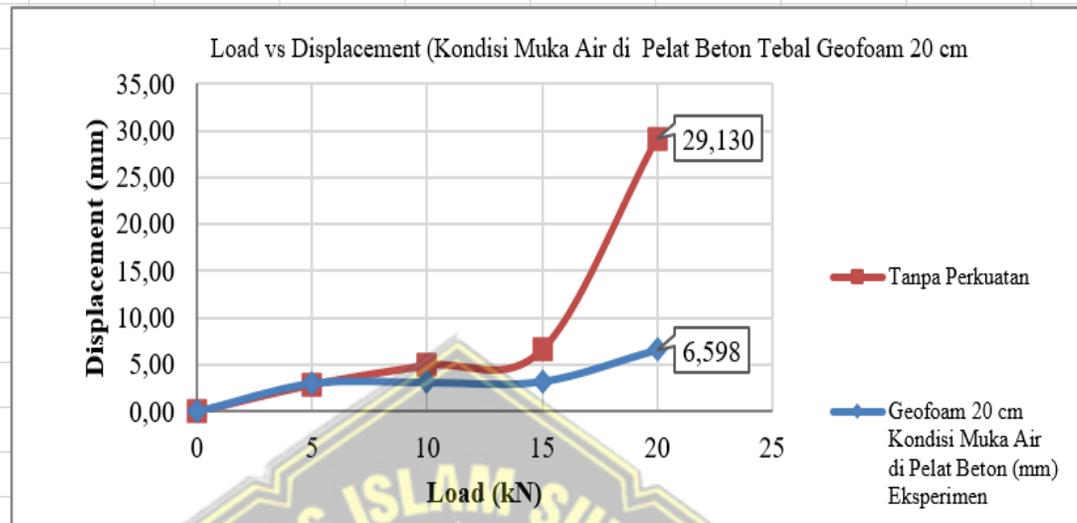
Tabel rekapan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofom tebal 20 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton):

Tabel 4.16. *Settlement* Tanah Lunak Dengan Geofom Tebal 20 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton)

Beban (kN)	<i>Settlement</i> (mm)
0	0
5	3,029
10	3,120
15	3,212
20	6,598

Sumber : Hasil Penelitian

Untuk Gambar *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofom tebal 20 cm MAT pada pelat beton disajikan Gambar 4.20 berikut :



Gambar 4.20. *Settlement* Yang Terjadi Pada *Subgrade* Tanah Lunak Tanpa Geofom dan Dengan Geofom Tebal 20 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pada Pelat Beton)

Sumber : Hasil Penelitian

Pada Gambar terlihat terjadi penurunan maksimum untuk tanah dengan Geofom tebal 20 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton) dengan beban 20 kN sebesar 6,598 mm. Geofom dapat mengurangi terjadinya penurunan dimana pada tanah tanpa Geofom penurunan maksimum pada beban 20 kN sebesar 29,130 mm. Muka air tidak mengakibatkan penurunan tanah terjadi semakin besar apabila dibandingkan dengan tanah tanpa perkuatan Geofom, sebaliknya memperkecil terjadi penurunan pada tanah. Timbunan dengan Geofom tebal 20 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton) dapat mengurangi penurunan tanah sebesar 77,35% apabila dibandingkan tanpa menggunakan Geofom.

9. Percobaan 9

Pembebanan benda uji (*subgrade*) dengan Geofom tebal 30 cm dan kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton). Model percobaan Gambar 3.11. Prosesnya adalah sebagai berikut :

- Masukkan tanah lunak dalam bak uji.
- Uji DCP tanah lunak tebal 60 cm dan uji *sandcone* pada tanah lunak.
- Masukkan *prototype* Geofom tebal 30 cm ke dalam bak uji.
- Masukkan air dengan Muka Air di pelat beton.
- Masukkan *loading plate* ke dalam bak uji.
- Lakukan pembebanan dengan alat *hydraulic jack* pada *loading cell*.
- Hasil *settlement* tercatat pada *data logger* pada komputer.

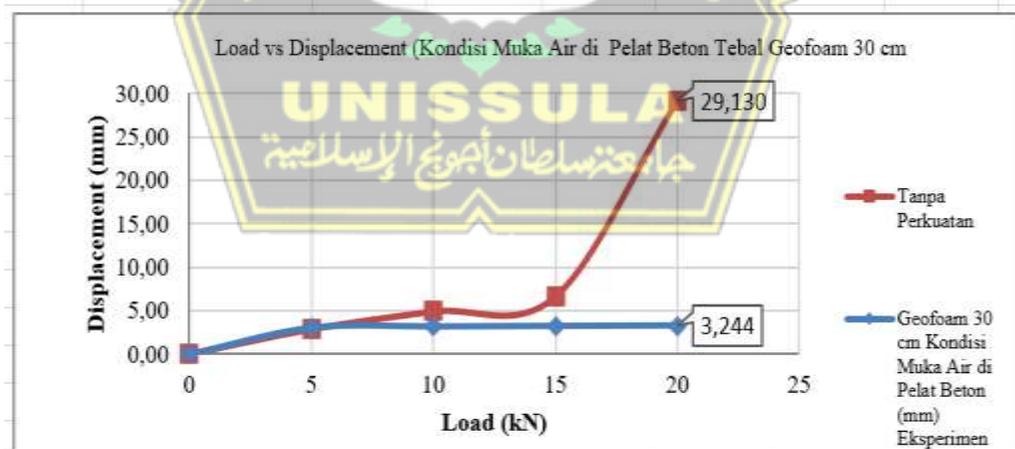
Tabel rekapan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofom tebal 30 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton):

Tabel 4.17. *Settlement* Tanah Lunak Dengan Geofom Tebal 30 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton)

Beban (kN)	<i>Settlement</i> (mm)
0	0
5	2,981
10	3,128
15	3,187
20	3,244

Sumber : Hasil Penelitian

Untuk Gambar *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofom tebal 30 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton) disajikan Gambar 4.21 berikut :



Gambar 4.21. *Settlement* Yang Terjadi Pada *Subgrade* Tanah Lunak Tanpa Geofom dan Dengan Geofom Tebal 30 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton)

Sumber : Hasil Penelitian

Pada Gambar terlihat terjadi penurunan maksimum untuk tanah dengan Geofom tebal 30 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton) dengan beban 20 kN sebesar 3,244 mm. Geofom dapat mengurangi terjadinya penurunan dimana pada tanah tanpa Geofom penurunan maksimum pada beban 20 kN sebesar 29,130 mm. Muka air tidak mengakibatkan penurunan tanah terjadi semakin besar apabila dibandingkan dengan tanah tanpa perkuatan Geofom, sebaliknya memperkecil terjadi penurunan pada tanah. Timbunan dengan Geofom tebal 30 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton) dapat mengurangi penurunan tanah sebesar 88,86% apabila dibandingkan tanpa menggunakan Geofom.

10. Percobaan 10

Pembebanan benda uji (*subgrade*) dengan Geofom tebal 40 cm dan kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton). Model percobaan Gambar 3.14. Prosesnya adalah sebagai berikut :

- a. Masukkan tanah lunak tebal 60 cm dalam bak uji.
- b. Uji DCP tanah lunak.
- c. Masukkan *prototype* Geofom tebal 40 cm ke dalam bak uji.
- d. Masukkan air dengan Muka Air di pelat beton.
- e. Masukkan *loading plate* ke dalam bak uji.
- f. Lakukan pembebanan dengan alat *hydraulic jack* pada *loading cell*.
- g. Hasil *settlement* tercatat pada *data logger* pada komputer.

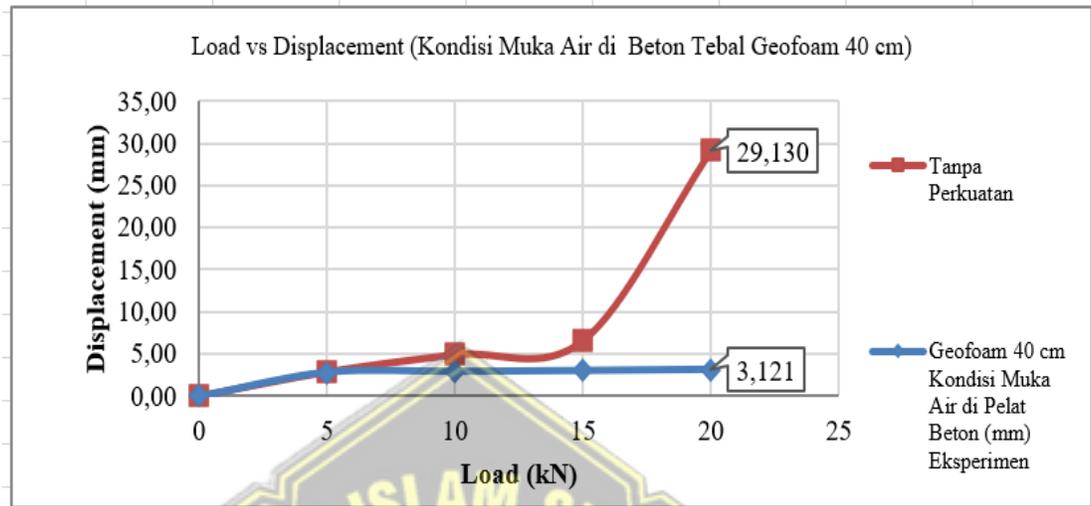
Tabel rekapan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofom tebal 40 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton):

Tabel 4.18. *Settlement* Tanah Lunak Dengan Geofom Tebal 40 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton)

Beban (kN)	<i>Settlement</i> (mm)
0	0
5	2,788
10	2,874
15	2,984
20	3,121

Sumber : Hasil Penelitian

Untuk Gambar *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan Geofom tebal 40 cm MAT pada pelat beton disajikan Gambar 4.22 berikut :



Gambar 4.22. *Settlement* Yang Terjadi Pada *Subgrade* Tanah Lunak Tanpa Geofom dan Dengan Geofom Tebal 40 cm Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton)

Sumber: Hasil Penelitian

Pada Gambar terlihat terjadi penurunan maksimum untuk tanah dengan Geofom tebal 40 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton) pada beban 20 kN sebesar 3,121 mm. Geofom dapat mengurangi terjadinya penurunan dimana pada tanah tanpa Geofom penurunan maksimum pada beban 20 kN sebesar 29,130 mm. Muka air tidak mengakibatkan penurunan tanah terjadi semakin besar apabila dibandingkan dengan tanah tanpa perkuatan Geofom, sebaliknya memperkecil terjadi penurunan pada tanah. Timbunan dengan Geofom tebal 40 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton) dapat mengurangi penurunan tanah sebesar 89,29% apabila dibandingkan tanpa menggunakan Geofom.

Hasil-hasil dalam penelitian ini yaitu dari hasil pengujian tanah dasar di laboratorium dijelaskan pada bab ini. Hasil-hasil pengujian tersebut akan dibahas berdasarkan pengolahan data hasil pengujian di laboratorium dan disesuaikan dari referensi yang ada kesesuai data tanah dan eksperimen laboratorium yang dilakukan

dibandingkan dengan hasil analisa numerik dengan menggunakan aplikasi Plaxis 2D versi 2023.

Berdasarkan hasil seluruh eksperimen, dimana penurunan terbesar terjadi pada beban maksimum 20 kN dengan hasil eksperimen disajikan Tabel berikut :

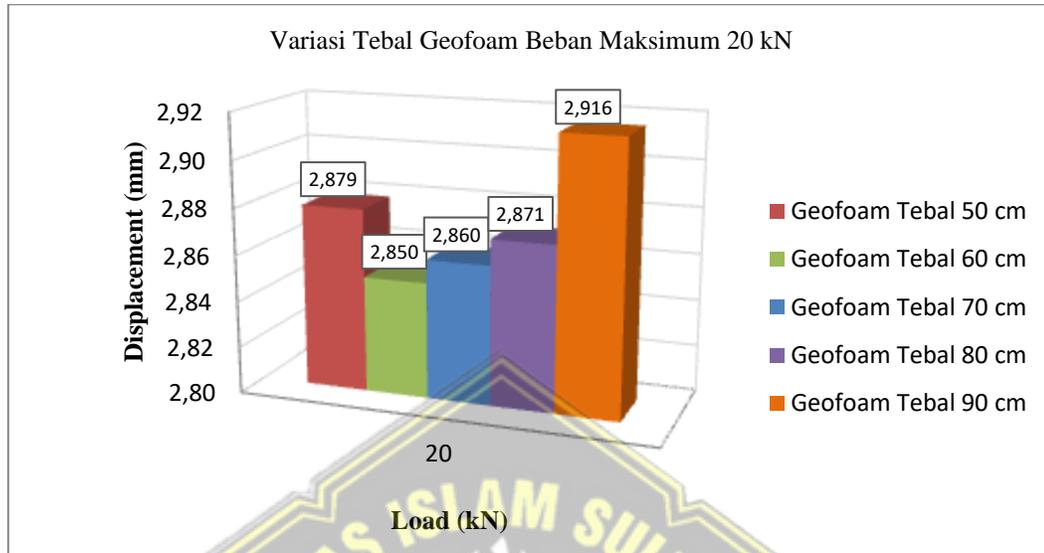
Tabel 4.19. Rekapitan Eksperimen di Laboratorium Beban 20 kN

No	Jenis Eksperimen	Settlement (mm)
1.	Percobaan 1 (<i>subgrade</i> tanah lunak 60 cm tanpa Geofom)	29,130
2.	Percobaan 2 (<i>subgrade</i> tanah lunak 80 cm tanpa Geofom)	41,796
3.	Percobaan 3 (<i>subgrade</i> tanah lunak 90 cm tanpa Geofom)	47,160
4.	Percobaan 4 (<i>subgrade</i> tanah lunak 100 cm tanpa Geofom)	49,690
5.	Percobaan 5 (model percobaan 2 kondisi 1, Geofom tebal 20 cm kondisi kering)	5,429
6.	Percobaan 6 (model percobaan 2 kondisi 2, Geofom tebal 20 cm kondisi muka air di bawah Geofom (pada <i>subgrade</i>))	6,723
7.	Percobaan 7 (model percobaan 2 kondisi 3, Geofom tebal 20 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton))	6,598
8.	Percobaan 8 (model percobaan 3 kondisi 1, Geofom tebal 30 cm kondisi kering)	3,226
9.	Percobaan 9 (model percobaan 3 kondisi 2, Geofom tebal 30 cm kondisi muka air di bawah Geofom (pada <i>subgrade</i>))	3,265
10.	Percobaan 10 (model percobaan 3 kondisi 3, Geofom tebal 30 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton))	3,244
11.	Percobaan 11 (model percobaan 4 kondisi 1, Geofom tebal 40 cm kondisi kering)	2,603
12.	Percobaan 12 (model percobaan 4 kondisi 2, Geofom tebal 40 cm kondisi muka air di bawah Geofom (pada <i>subgrade</i>))	3,177
13.	Percobaan 13 (model percobaan 3 kondisi 3, Geofom tebal 30 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton))	3,121

Sumber : Hasil Penelitian

Waktu penurunan yang terjadi selama eksperimen dari percobaan 1 sampai percobaan 13 adalah 1,5 – 2 menit. Dari hasil analisis data pada Tabel di atas semakin tebal Geofom yang digunakan sebagai perkuatan pada tanah lunak maka penurunan yang terjadi akan semakin kecil. Timbunan dengan Geofom tebal 40 cm tanpa MAT dapat mengurangi terjadinya penurunan tanah sebesar 91,06% apabila dibandingkan tanpa menggunakan Geofom. Hasil analisis perkuatan Geofom akibat Muka Air Tanah yaitu semakin tinggi Muka Air Tanah maka penurunan yang terjadi juga akan semakin kecil. Timbunan dengan Geofom tebal 40 cm MAT pada pelat beton dapat mengurangi terjadinya penurunan tanah sebesar 89,29% apabila dibandingkan tanpa menggunakan Geofom.

Batasan tebal Geofom yang digunakan berdasarkan tebal tanah dasar (*subgrade* tanah lunak tebal 60 cm), disajikan pada Gambar 4.23 berikut :

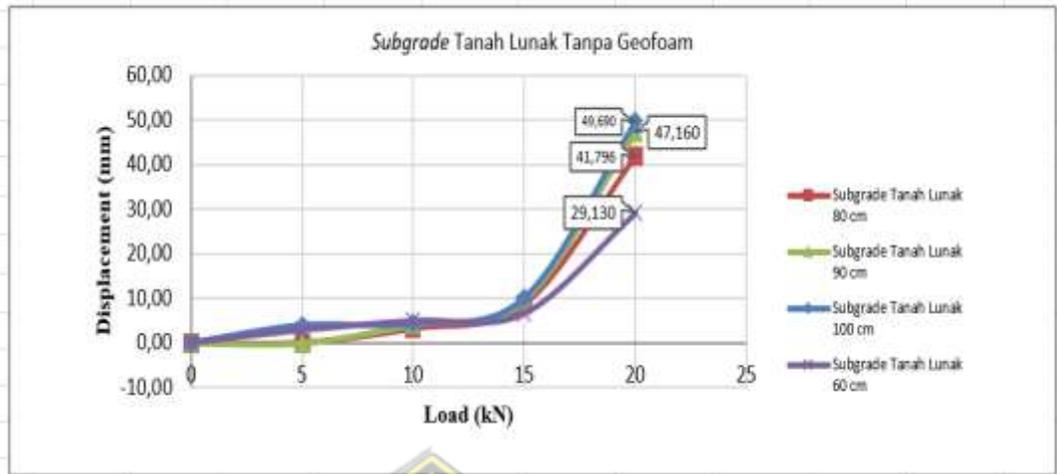


Gambar 4.23. *Settlement* Yang Terjadi Pada *Subgrade* Tanah Lunak Tebal 60 cm Dengan Variasi Tebal Geofom (Plaxis 2D)

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar di atas menampilkan terjadi kenaikan penurunan tanah akibat tebal Geofom pada beban maksimum 20 kN. Apabila dibandingkan dengan variasi tebal Geofom yang dijadikan sebagai timbunan variasi 20 cm, 30 cm, dan 40 cm, penurunan tanah terjadi hanya sampai pada tebal Geofom 60 cm. Pada tebal Geofom 60 cm terjadi kenaikan penurunan tanah. Ketebalan Geofom tidak menjadi acuan bahwa semakin tebal Geofom maka penurunan tanah akan semakin kecil. Pada penelitian ini, untuk ketebalan Geofom maksimal pada kondisi tebal tanah dasar 60 cm yaitu 6/6 dari tebal tanah dasar.

Untuk perbandingan hasil eksperimen pengujian variasi tebal *subgrade* tanah lunak tanpa timbunan Geofom disajikan Gambar 4.24 berikut :



Gambar 4.24. Settlement Yang Terjadi Pada Variasi Tebal Subgrade Tanah Lunak Tanpa Geofilm

Sumber: Hasil Penelitian

Gambar di atas menampilkan hasil penurunan tanah yang terjadi akibat variasi beban dan variasi tinggi tanah lunak. Hasil eksperimen menampilkan nilai penurunan terbesar pada tinggi tanah lunak 100 cm dengan penurunan sebesar 49,690 mm. Kondisi ini apabila dibandingkan dengan tanah lunak dengan timbunan Geofilm disajikan pada Tabel berikut :

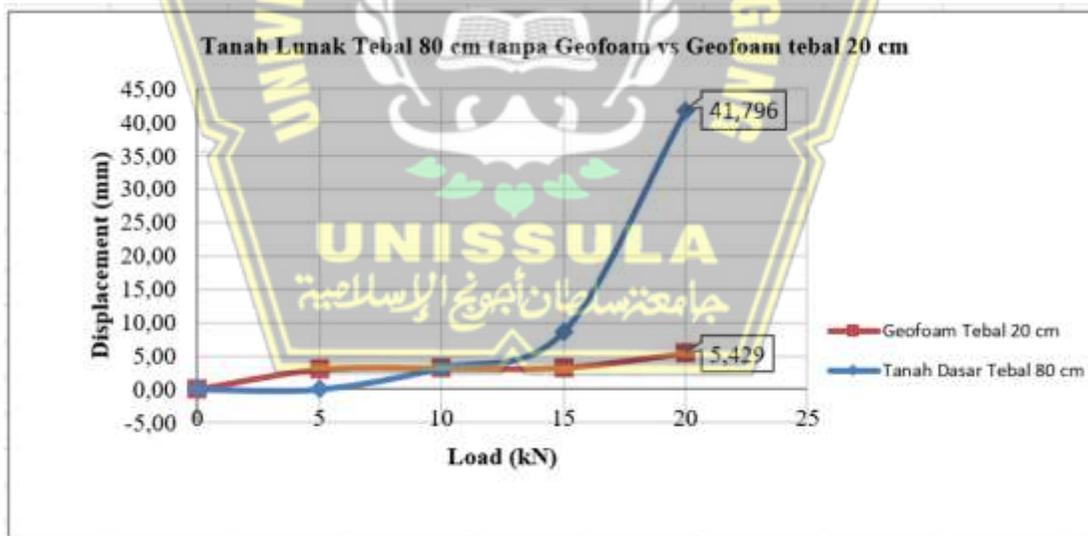
Tabel 4.20. Rekapitan Eksperimen di Laboratorium Beban 20 kN Variasi Tebal Subgrade Tanah Lunak Tanpa Geofilm dan Dengan Geofilm (Subgrade Tanah Lunak Tebal 60 cm)

No	Jenis Eksperimen	Settlement (mm)	Deviasi (mm)	Perbandingan Deviasi (%)
1.	Subgrade Tanah lunak tebal 80 cm	41,796	36,367	87
2.	Subgrade Tanah lunak 60 cm dengan Geofilm tebal 20 cm kondisi kering	5,429		
3.	Subgrade Tanah lunak tebal 90 cm	47,160	43,934	93,2
4.	Subgrade Tanah lunak 60 cm dengan Geofilm tebal 30 cm kondisi kering	3,226		
5.	Subgrade Tanah lunak tebal 100 cm	49,690	47,387	95,4
6.	Subgrade Tanah lunak 60 cm dengan Geofilm tebal 40 cm kondisi kering	2,303		

Sumber : Hasil Penelitian

Geofoam dapat memperkecil terjadinya penurunan tanah apabila dibandingkan tanpa menggunakan timbunan Geofoam. Hasil eksperimen dengan kondisi tinggi yang sama yaitu untuk tinggi tanah lunak 80 cm apabila dibandingkan dengan tanah lunak 60 cm dengan timbunan Geofoam tebal 20 cm menghasilkan perbandingan deviasi penurunan sebesar 87%. Geofoam merupakan salah satu jenis geosintetik yang digunakan sebagai pengganti tanah timbunan. Hasil eksperimen menampilkan bahwa Geofoam cocok digunakan sebagai timbunan di atas tanah lunak untuk mengurangi penurunan, sesuai dengan penelitian (A. Gunawan, 2024). Penelitian (P. P. Rahardjo et al., 2023) Geofoam digunakan sebagai material ringan pengganti tanah timbunan untuk mengurangi penurunan dan gaya pergerakan yang bekerja pada tanah. Kondisi awal konstruksi jalan dibangun menggunakan timbunan tanah setinggi 20 m, tetapi belum mencapai timbunan akhir terjadi pergerakan tanah yang signifikan.

Gambar hasil pengujian eksperimen tanah dasar tebal 80 cm, 90 cm, dan 100 cm dengan tanah dasar tebal 60 cm menggunakan timbunan Geofoam tebal 20 cm, 30 cm, dan 40 cm disajikan pada Gambar 4.25 – 4.27 berikut :

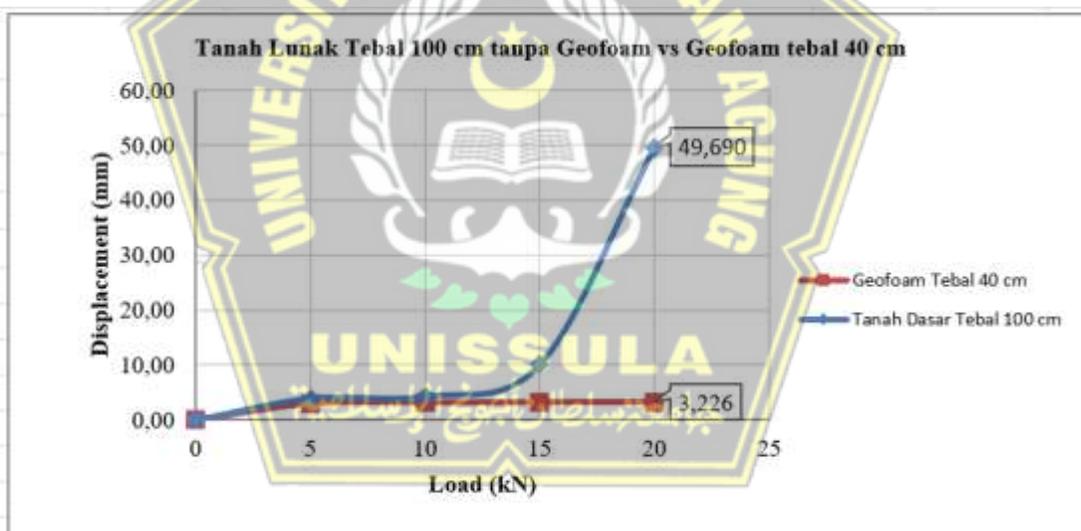


Gambar 4.25. *Settlement* Yang Terjadi Pada *Subgrade* Tanah Lunak Tebal 80 cm dengan Timbunan Geofoam Tebal 20 cm (*Subgrade* Tanah Lunak 60 cm)

Sumber : Hasil Penelitian



Gambar 4.26. *Settlement* Yang Terjadi Pada *Subgrade* Tanah Lunak Tebal 90 cm dengan Timbunan Geofom Tebal 30 cm (*Subgrade* Tanah Lunak 60 cm)
Sumber : Hasil Penelitian



Gambar 4.27. *Settlement* Yang Terjadi Pada *Subgrade* Tanah Lunak Tebal 100 cm dengan Timbunan Geofom Tebal 40 cm (*Subgrade* Tanah Lunak 60 cm)

Hasil eksperimen menampilkan bahwa Geofom cocok digunakan sebagai timbunan di atas tanah lunak untuk mengurangi penurunan, sesuai dengan penelitian (A. Gunawan, 2024). Penelitian (P. P. Rahardjo et al., 2023) Geofom digunakan sebagai material ringan pengganti tanah timbunan untuk mengurangi penurunan dan gaya pergerakan yang bekerja pada tanah. Kondisi awal konstruksi jalan dibangun

menggunakan timbunan tanah setinggi 20 m, tetapi belum mencapai timbunan akhir terjadi pergerakan tanah yang signifikan.

4.6 Analisis Uji Sampel Tanah di Laboratorium

Pengujian sampel tanah di laboratorium yaitu pengujian *indeks properties* tanah yaitu pengujian sifat fisis dan sifat mekanis tanah. Pengujian tanah yang dilakukan adalah pengujian sifat fisik dan sifat mekanis tanah dasar. Berikut adalah analisis pengujian tanah dasar yang diperoleh dari pengujian di laboratorium :

1. Pengujian Sifat Fisik

A. Pengujian kadar air

Hasil pengujian kadar air tanah dasar di laboratorium diperoleh nilainya sebesar 28,15%. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa tanah yang akan dijadikan pada media bak uji memiliki karakteristik tanah lempung kaku berdasarkan (M.Das, 2010) pada Tabel 2.1.

B. Pengujian berat jenis tanah

Berat jenis tanah yang diperoleh adalah sebesar 2,649, berdasarkan Tabel 2.5 pada buku (Hardiyatmo, 2019) tanah yang dijadikan pada media bak uji tergolong jenis tanah lempung organik yaitu berkisar antara 2,58 – 2,65.

C. Pengujian Atterberg Limits

Hasil pengujian *atterberg limits* dimana parameter yang diperoleh adalah:

Batas Cair (LL) = 50,80%

Batas Plastis (PL) = 35,27%

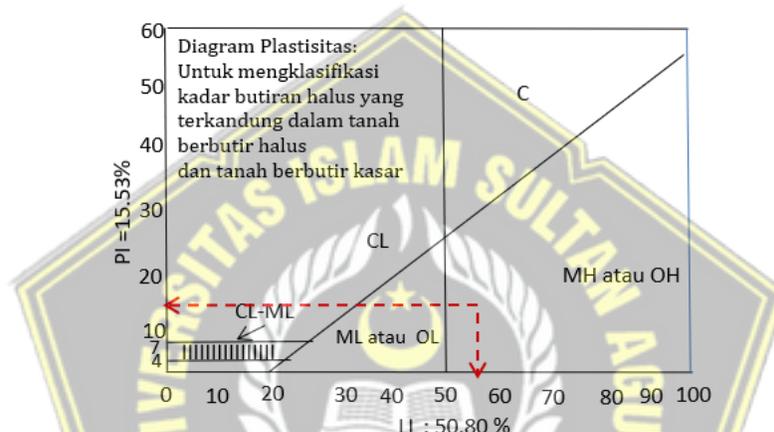
Indeks Plastisitas (PI) = 15,53%

Berdasarkan nilai Indeks Plastisitas (PI) jenis tanah yang dijadikan pada media bak uji adalah kategori lempung berlanau dengan plastisitas sedang berdasarkan Tabel 2.7 menurut Jumikis (1962).

D. Pengujian analisa saringan

Tanah tergolong gradasi halus karena > dari 50 % lolos saringan No 200 yaitu 96,93%.

Apabila mengacu pada klasifikasi *Unified Soil Classification System (USCS)*, maka tanah yang > 50% lolos saringan No. 200 maka diklasifikasikan sebagai tanah berbutir halus. Tanah berbutir halus yaitu lanau (*silt*) dan lempung (*clay*). Pada sampel tanah ini besar tanah yang lolos saringan No. 200 adalah 98,93%, sehingga tanah tersebut dikategorikan tanah berbutir halus. Berdasarkan nilai Batas cair (LL) dan Batas Plastis PL maka tanah dapat diklasifikasi menurut USCS yaitu disajikan Gambar 4.28 :



Gambar 4.28. Grafik Klasifikasi Tanah Metode USCS

Sumber : Hasil Penelitian

Klasifikasi tanah yang diperoleh adalah MH yaitu lanau tak organik (lanau plastisitas tinggi). Berdasarkan klasifikasi tanah metode *American Association of State Highway and Transportation Officials Classification (AASTHO)*, dimana berdasarkan nilai LL sebesar 50,80% dan nilai PI sebesar 15,53% tergolong klasifikasi kelompok A-7. A-7 dibagi menjadi dua yaitu A-7-5 dan A-7-6. Berdasarkan nilai PI sebesar 15,53% yaitu > LL - 30% ($50,80\% - 30\% = 20,8\%$) maka tanah dikelompokkan menjadi A-7-6 yaitu tanah berlempung. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sampel tanah yang digunakan dalam bak uji dapat digunakan sebagai *prototype* dalam bak uji.

2. Pengujian sifat mekanis

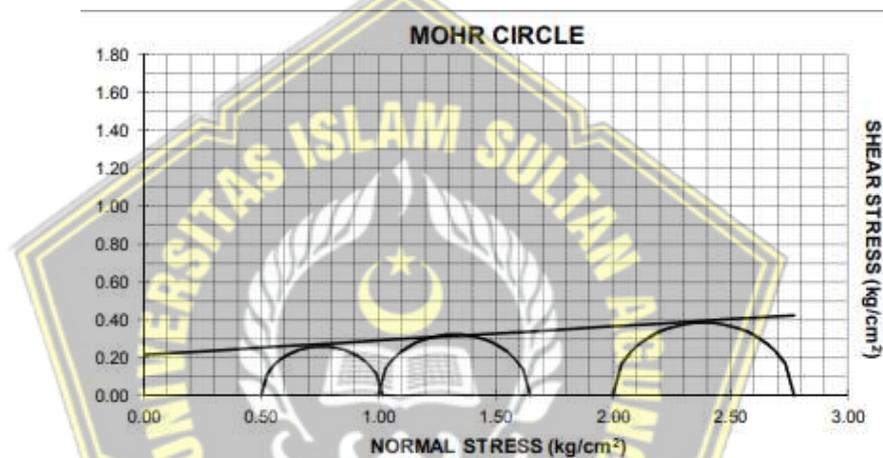
A. Uji Triaxial UU

Uji triaxial UU dilakukan di laboratorium Mekanika Tanah Teknik Sipil Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru. Parameter yang diperoleh dari pengujian ini adalah nilai kohesi (c) dan nilai sudut geser (ϕ) tanah dasar lunak. Nilai ini nanti digunakan untuk parameter dalam analisa numerik dengan aplikasi Plaxis 2D versi 2023. Hasil pengujian yang diperoleh adalah:

$$\text{Kohesi (} c \text{)} = 20,98 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Sudut geser (} \phi \text{)} = 4,551^\circ$$

Untuk grafik pengujian triaxial UU dapat dilihat pada Gambar 4.29 berikut :



Gambar 4.29. Grafik Triaxial UU

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan Tabel 2.4 dari nilai C_u 20,98 kN/cm² maka tanah lempung tergolong konsistensi lunak, dimana konsistensi lunak berdasarkan Tabel 2.4 adalah 20 – 50 kN/cm². Triaxial UU digunakan untuk kondisi *short term* sedangkan triaxial CU dan CD digunakan untuk kondisi *long term*. Pada penelitian ini menggunakan triaxial UU karena kondisi *quick* konstruksi. Apabila tanah mengalami pembebanan maka tanah akan mengalami tekanan disetiap titik hingga ke dasar. Pada salah satu bidang, jika tegangan geser menjadi lebih tinggi daripada kekuatan geser tanah maka akan terjadi keruntuhan tanah. Bidang-bidang ini disebut tegangan utama dan tegangan pada bidang dikenal dengan tegangan mayor (σ_1), menengah (σ_2), dan minor

(σ_3). Setiap bidang pada massa tanah yang membentuk sudut (φ) dari sumbu utama akan memiliki tegangan pada lingkaran Mohr. Pada grafik di atas ada garis lurus selubung memotong sumbu tegangan geser vertikal pada suatu titik. Pemotongan ini menunjukkan kohesi (c). Kemiringan garis memberikan sudut gesek internal (φ). Lingkaran Mohr menggambarkan keadaan tegangan dalam tanah pada suatu titik, selubung Mohr menggambarkan kekuatan geser tanah.

B. Pengujian pemadatan laboratorium (*proctor*)

Pengujian pemadatan laboratorium dilakukan untuk mendapatkan parameter kadar air optimum (w_{opt}) dan berat isi kering maksimum (γ_{dmaks}). Hasil pengujian pemadatan laboratorium adalah sebagai berikut :

Kadar air optimum (w_{opt}) = 18,22%

Berat isi kering maksimum (γ_{dmaks}) = 1,410 gr/cc

C. Pengujian *California Bearing Ratio* (CBR)

Pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) laboratorium diperoleh nilai CBR sebesar 1,80%. Nilai CBR yang diperoleh < 6 % yang disyaratkan oleh Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yang menunjukkan daya dukung rendah.

Berdasarkan pengujian sifat fisik dan sifat mekanis dari pengujian di laboratorium, tanah yang akan dijadikan sebagai media *subgrade* pada bak uji masuk dalam klasifikasi sebagai tanah lunak.

4.7 Pengujian *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) dan *Sandcone*

Pengujian *Dinamic Cone Penetrometer* (DCP) yaitu jenis pengujian dalam lapisan tanah untuk mengetahui kekuatan tanah atau nilai daya dukung tanah dengan mendapatkan nilai CBR berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Pada penelitian ini pengujian DCP dilakukan sebelum dilakukan pengujian eksperimen timbunan Geofom di atas tanah lunak. Dari hasil pengujian ini nantinya dapat dipastikan bahwa tanah yang digunakan merupakan tanah dengan jenis tanah lunak dengan tingkat kepadatan yang sangat rendah. Pengujian DCP dilakukan sebanyak 3 (tiga) titik dalam bak uji. Hasil pengujian DCP dilihat pada Tabel berikut :

Tabel 4.21. Hasil Pengujian DCP

Titik	Hasil (%)
1	1,46
2	1,61
3	2,43
Rata-rata	1,83

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil nilai CBR dengan pengujian DCP diperoleh nilai CBR rata-rata untuk 3 titik pengujian sebesar 1,80 %. Nilai yang diperoleh < 6%, berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, tanah tersebut tergolong tanah yang memiliki daya dukung yang rendah yaitu kategori tanah lunak.

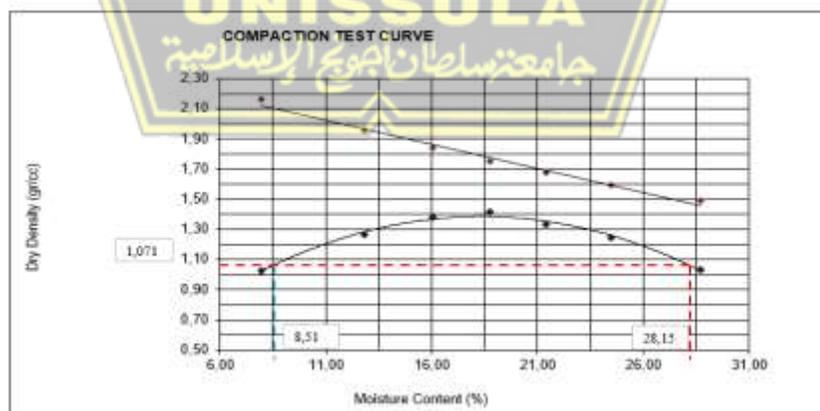
Untuk kepadatan tanah dasar diuji dengan pengujian *sandcone*, kepadatan tanah dalam box dibuat sama dengan kepadatan kondisi tanah asli di lapangan. Hasil pengujian *sandcone* dilihat pada Tabel berikut :

Tabel 4.22. Hasil Pengujian *Sandcone*

Titik	Hasil (%)
1	75,83
2	75,86
3	75,82
Rata-rata	75,84

Sumber : Hasil Penelitian

Nilai kepadatan tanah yang ada dalam bak uji rata rata sebesar 75,84 %. Untuk nilai kepadatan tanah asli di lapangan berdasarkan Gambar 4.30 berikut :



Gambar 4.30. Nilai Berat Volume Kering Berdasarkan Kadar Air Tanah Asli Lapangan

Sumber : Hasil Penelitian

Kadar air asli lapangan diperoleh sebesar 28,15 %, sehingga berdasarkan grafik pengujian pemadatan lapangan (*proctor*) maka diperoleh nilai berat volume kering sebesar 1,071 gr/cc dan berdasarkan pengujian pemadatan di laboratorium diperoleh nilai berat volume kering maksimum sebesar 1,410 gr/cc . Berdasarkan data ini, maka diperoleh nilai kepadatan tanah asli di lapangan adalah :

$$\text{Kepadatan tanah asli lapangan} = \frac{\gamma_{\text{lapangan}}}{\gamma_{\text{maks}}} \times 100 = \frac{1,071}{1,410} \times 100 = 75,95 \%$$

Berdasarkan hasil perhitungan nilai kepadatan tanah asli di lapangan dan dibandingkan dengan nilai kepadatan tanah dalam bak uji maka kondisi kepadatan tanah bak uji sama dengan kepadatan tanah asli di lapangan yaitu dengan rata – rata sebesar 75,84%.

4.8 Pemodelan Plaxis 2D

Model tanah dasar pada pemodelan plaxis 2D yaitu model Mohr-Coulomb karena uji geser yang dilakukan di laboratorium yaitu uji traiksial UU (*Unconsolidated Undrained*) sehingga nilai kuat geser dan sudut geser pada tipe tidak terdarinase. Mohr-Coulomb digunakan karena pada penelitian ini diasumsikan kondisi *quick* konstruksi (*short term*). Model elastis linier untuk pelat beton K-250 dan Geofom karena material tersebut tergolong kaku yang tidak memiliki permeabilitas. Model *soft soil* pada kondisi *long term* berlaku di lapangan.

Model geometri untuk tanah dasar mengacu pada dimensi bak uji untuk pengujian eksperimental yaitu 200 cm x 50 cm x 110 cm, sehingga model geometry pada plaxis 2D mengasumsikan batas-batas model elemen hingga yang digunakan pada penelitian yaitu arah horizontal ditetapkan sejauh 4 kali lebar dimensi tanah dasar dan untuk tinggi 2 kali dimensi dimensi tanah dasar untuk melihat bidang gelincir.

BAB V

PEMBAHASAN HASIL PENELITIAN

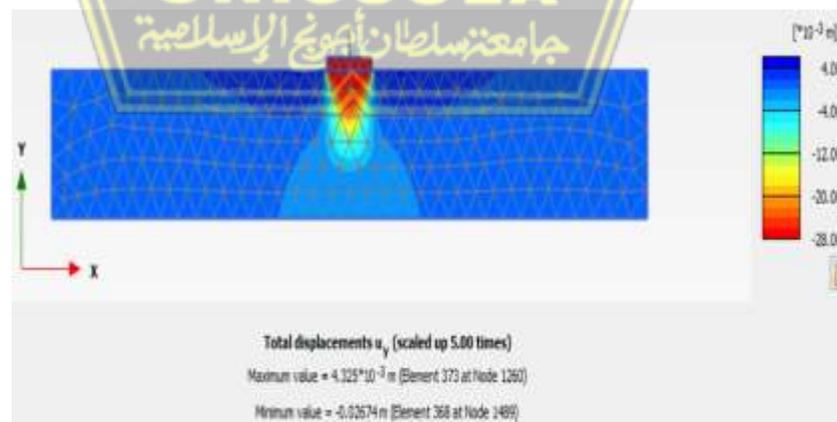
5.1 Interpretasi Hasil Pemodelan Plaxis 2D

Model tanah dasar pada pemodelan plaxis 2D yaitu model Mohr-Coulomb karena pada penelitian ini diasumsikan kondisi *quick* konstruksi (*short term*). Model elastis linier untuk pelat beton K-250 dan Geofom karena material tersebut tergolong kaku yang tidak memiliki permeabilitas.

Model geometri untuk tanah dasar mengacu pada dimensi bak uji untuk pengujian eksperimental yaitu 200 cm x 50 cm x 110 cm, sehingga model geometry pada plaxis 2D mengasumsikan batas-batas model elemen hingga yang digunakan pada penelitian yaitu arah horizontal ditetapkan sejauh 4 kali lebar dimensi tanah dasar dan untuk tinggi 2 kali dimensi dimensi tanah dasar untuk melihat bidang gelincir.

5.1.1 Interpretasi Hasil Pemodelan Plaxis *Subgrade* Tanah Lunak Tanpa Geofom

Gambar hasil total *displacements uy subgrade* tanpa Geofom beban 0 kN – 20 kN disajikan pada Lampiran 6 halaman 237 – 239. Untuk beban 20 kN disajikan Gambar 5.1 berikut :



Gambar 5.1. Total *Displacements uy Subgrade* Tanah Lunak Tanpa Geofom

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $26,687 \times 10^{-3}$ m atau sebesar 26,687 mm.

5.1.2 Interpretasi Hasil Pemodelan Plaxis *Subgrade* Tanah Lunak Dengan Geofilm Kondisi Kering

a. Geofilm tebal 20 cm

Gambar hasil total *displacements* *uy* *subgrade* dengan Geofilm tebal 20 cm beban 0 kN – 20 kN disajikan pada Lampiran 6 halaman 240 – 241. Untuk beban 20 kN disajikan Gambar 5.2 berikut :



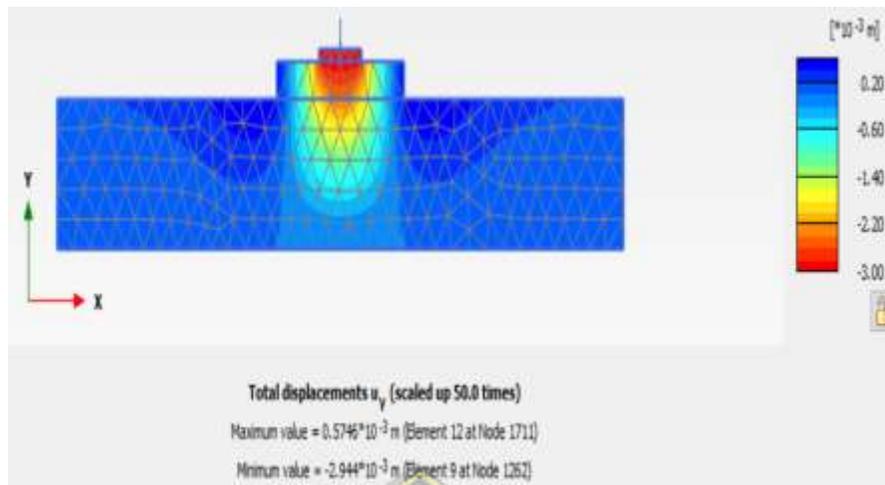
Gambar 5.2. Total *Displacements* *uy* *Subgrade* Tanah Lunak dengan Geofilm Tebal 20 cm Kondisi Kering

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $5,989 \times 10^{-3}$ m atau sebesar 5,989 mm.

b. Geofilm tebal 30 cm

Gambar hasil total *displacements* *uy* *subgrade* dengan Geofilm tebal 30 cm beban 0 kN – 20 kN disajikan pada Lampiran 6 halaman 242 – 243. Untuk beban 20 kN disajikan Gambar berikut :



Gambar 5.3. Total *displacements* u_y Subgrade Tanah Lunak dengan Geofoam Tebal

30 cm Kondisi Kering

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $2,944 \times 10^{-3}$ m atau sebesar 2,944 mm.

c. Geofoam tebal 40 cm

Gambar hasil total *displacements* u_y subgrade dengan Geofoam tebal 40 cm beban 0 kN – 20 kN disajikan pada Lampiran 6 halaman 244 – 245. Untuk beban 20 kN disajikan Gambar berikut :



Gambar 5.4. Total *Displacements* u_y Subgrade Tanah Lunak dengan Geofoam Tebal

40 cm Kondisi Kering

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $2,905 \times 10^{-3}$ m atau sebesar 2,905 mm.

5.1.3 Interpretasi Hasil Pemodelan Plaxis *Subgrade* Tanah Lunak Dengan Geofilm Kondisi Muka Air di Bawah Geofilm (Permukaan *Subgrade*)

a. Geofilm tebal 20 cm

Gambar hasil total *displacements* *uy subgrade* dengan Geofilm tebal 20 cm kondisi muka air di bawah Geofilm (permukaan *subgrade*) beban 0 kN – 20 kN disajikan pada Lampiran 6 halaman 246 – 247. Untuk beban 20 kN disajikan Gambar 5.5 berikut :



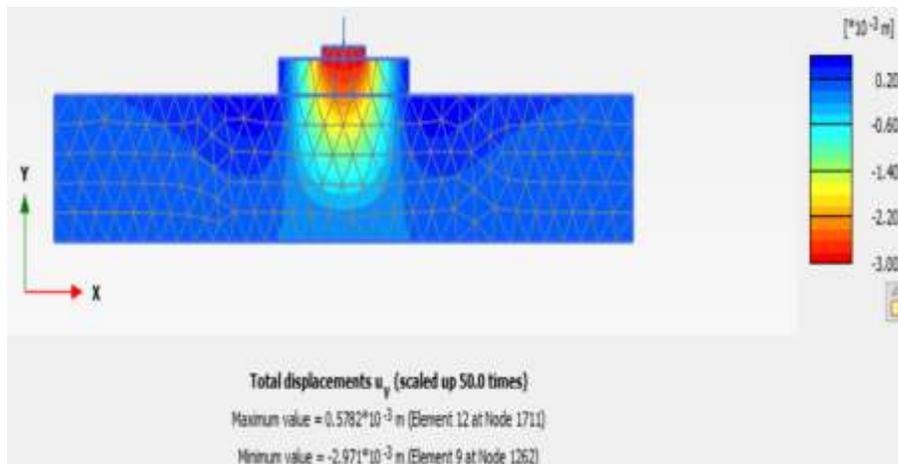
Gambar 5.5. Total *Displacements uy Subgrade* Tanah Lunak dengan Geofilm Tebal 20 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofilm (Permukaan *Subgrade*)

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $6,068 \times 10^{-3}$ m atau sebesar 6,068 mm.

b. Geofilm tebal 30 cm

Gambar hasil total *displacements* *uy subgrade* dengan Geofilm tebal 30 cm kondisi muka air di bawah Geofilm (permukaan *subgrade*) beban 0 kN – 20 kN disajikan pada Lampiran 6 halaman 248 – 249. Untuk beban 20 kN disajikan Gambar 5.6 berikut :



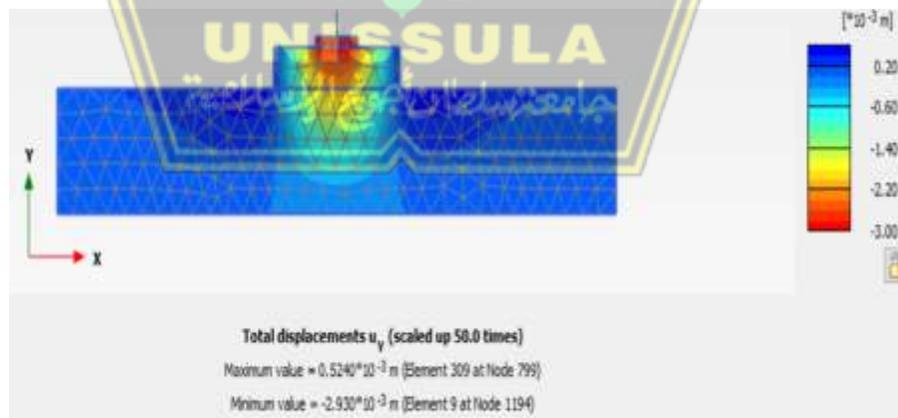
Gambar 5.6. Total Displacements u_y subgrade Tanah Lunak dengan Geofabric Tebal 30 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofabric (Permukaan Subgrade)

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $2,971 \times 10^{-3}$ m atau sebesar 2,971 mm.

c. Geofabric tebal 40 cm

Gambar hasil total displacements u_y subgrade dengan Geofabric tebal 40 cm kondisi muka air di bawah Geofabric (permukaan subgrade) beban 0 kN – 20 kN disajikan pada Lampiran 6 halaman 250 – 251. Untuk beban 20 kN disajikan Gambar 5.7 berikut :



Gambar 5.7. Total Displacements u_y Subgrade Tanah Lunak dengan Geofabric Tebal 40 cm Kondisi Muka Air di bawah Geofabric (Permukaan Subgrade)

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $2,930 \times 10^{-3}$ m atau sebesar 2,930 mm.

5.1.4 Interpretasi Hasil Pemodelan Plaxis *Subgrade* Dengan Geofom Kondisi Muka Air di Atas Geofom (Pelat Beton)

a. Geofom tebal 20 cm

Gambar hasil total *displacements* *uy subgrade* dengan Geofom tebal 20 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton) beban 0 kN – 20 kN disajikan pada Lampiran 6 halaman 252 – 253. Untuk beban 20 kN disajikan Gambar 5.8 berikut:



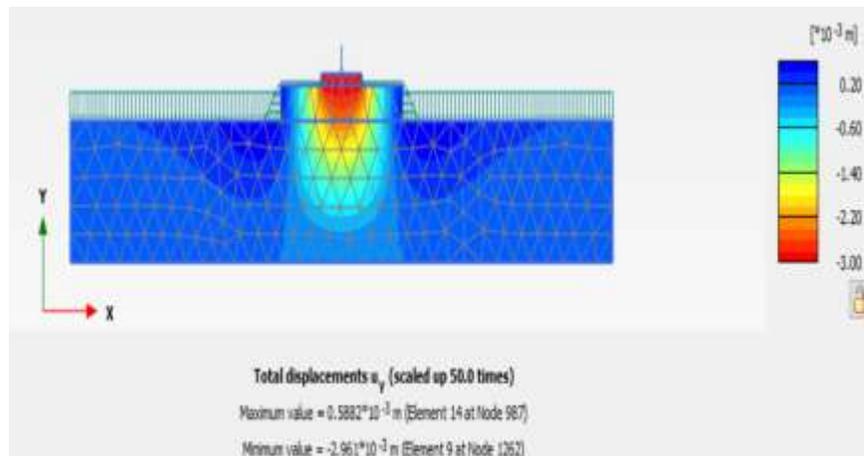
Gambar 5.8. Total *Displacements uy Subgrade* Tanah Lunak dengan Geofom Tebal 20 cm Kondisi Muka Air di Atas Geofom (Pelat Beton)

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $6,042 \times 10^{-3}$ m atau sebesar 6,042 mm.

b. Geofom tebal 30 cm

Gambar hasil total *displacements uy subgrade* dengan Geofom tebal 30 cm kondisimuka air di atas Geofom (pelat beton) beban 0 kN – 20 kN disajikan pada Lampiran 6 halaman 254 – 254. Untuk beban 20 kN disajikan Gambar berikut :



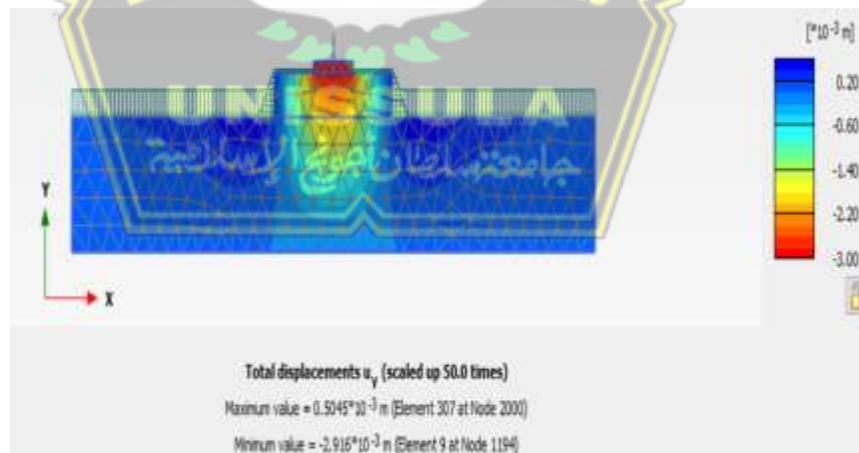
Gambar 5.9. Total Displacements u_y Subgrade Tanah Lunak dengan Geofoam Tebal 30 cm Kondisi Muka Air di Atas Geofoam (Pelat Beton)

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $2,961 \times 10^{-3}$ m atau sebesar 2,961 mm.

c. Geofoam tebal 40 cm

Gambar hasil total displacements u_y subgrade dengan Geofoam tebal 40 cm kondisi muka air di atas Geofoam (pelat beton) beban 0 kN – 20 kN disajikan pada Lampiran 6 halaman 255 – 256. Untuk beban 20 kN disajikan Gambar berikut :



Gambar 5.10. Total Displacements u_y Subgrade Tanah Lunak dengan Geofoam Tebal 40 cm Kondisi Muka Air di Atas Geofoam (Pelat Beton)

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $2,916 \times 10^{-3}$ m atau sebesar 2,916 mm.

Rekapan hasil analisis numerik menggunakan aplikasi plaxis 2D dimana nilai penurunan terbesar yaitu pada beban 20 kN, dengan hasil pada Tabel berikut :

Tabel 5.1. Rekapan Numerik Plaxis 2D Hasil Penurunan Akibat Pembebanan 20 kN

No	Uraian	Kondisi	Settlement (mm)
1	Percobaan 1	Percobaan 1 (<i>subgrade</i> tanah lunak 60 cm tanpa Geofom)	26,687
2	Percobaan 2	Percobaan 2 (<i>subgrade</i> tanah lunak 80 cm tanpa Geofom)	46,440
3	Percobaan 3	Percobaan 3 (<i>subgrade</i> tanah lunak 90 cm tanpa Geofom)	52,656
4	Percobaan 4	Percobaan 4 (<i>subgrade</i> tanah lunak 100 cm tanpa Geofom)	53,176
5	Percobaan 5	Percobaan 5 (model percobaan 2 kondisi 1, Geofom tebal 20 cm kondisi kering)	5,989
6	Percobaan 6	Percobaan 6 (model percobaan 2 kondisi 2, Geofom tebal 20 cm kondisi muka air di bawah Geofom (pada <i>subgrade</i>))	6,068
7	Percobaan 7	Percobaan 7 (model percobaan 2 kondisi 3, Geofom tebal 20 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton))	6,042
8	Percobaan 8	Percobaan 8 (model percobaan 3 kondisi 1, Geofom tebal 30 cm kondisi kering)	2,994
9	Percobaan 9	Percobaan 9 (model percobaan 3 kondisi 2, Geofom tebal 30 cm kondisi muka air di bawah Geofom (pada <i>subgrade</i>))	2,971
10	Percobaan 10	Percobaan 10 (model percobaan 3 kondisi 3, Geofom tebal 30 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton))	2,961
11	Percobaan 11	Percobaan 11 (model percobaan 4 kondisi 1, Geofom tebal 40 cm kondisi kering)	2,905
12	Percobaan 12	Percobaan 12 (model percobaan 4 kondisi 2, Geofom tebal 40 cm kondisi muka air di bawah Geofom (pada <i>subgrade</i>))	2,930
13	Percobaan 13	Percobaan 13 (model percobaan 3 kondisi 3, Geofom tebal 30 cm kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton))	2,916

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar grafik hasil penurunan berdasarkan analisis numerik plaxis 2D disajikan pada Lampiran 7 halaman 258 – 263.

5.2 Interpretasi Hasil Analisis Numerik Plaxis 2D dan Eksperimen di Laboratorium

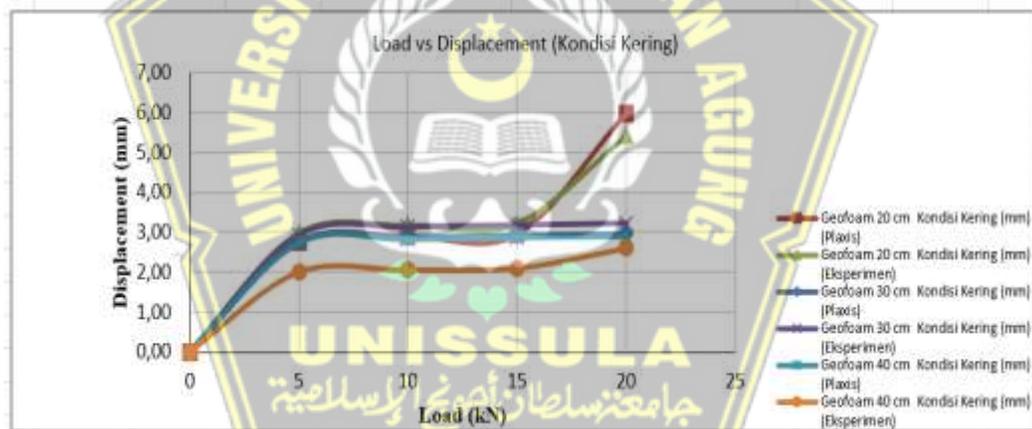
Berdasarkan eksperimen di laboratorium, penurunan terbesar terjadi pada beban maksimum 20 kN. Hasil numerik plaxis 2D mendapatkan nilai penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN juga. Rekapan hasil analisis eksperimen di laboratorium dengan numerik plaxis 2D untuk *subgrade* dengan Geofom kondisi kering disajikan Tabel berikut :

Tabel 5.2. Hasil Analisis Eksperimen Dengan Plaxis 2D *Subgrade* Dengan Geofilm Kondisi Kering

Beban (kN)	Displacements (mm)					
	Geofilm tebal 20 cm (Eksperimen)	Geofilm tebal 20 cm (Plaxis2D)	Geofilm tebal 30 cm (Eksperimen)	Geofilm tebal 30 cm (Plaxis2D)	Geofilm tebal 40 cm (Eksperimen)	Geofilm tebal 40 cm (Plaxis2D)
0	0	0	0	0	0	0
5	2,981	2,755	2,933	2,747	2,004	2,740
10	3,177	2,891	3,128	2,860	2,053	2,830
15	3,226	2,952	3,177	2,915	2,102	2,879
20	5,429	5,989	3,226	2,944	2,603	2,905
Perbandingan (%)						
	9,4		8,7		10	

Sumber : Hasil Penelitian

Penurunan terbesar terjadi pada beban maksimum 20 kN. Gambar 5.11 berikut menampilkan hasil penurunan analisis eksperimen dengan plaxis 2D dengan Geofilm kondisi kering.



Gambar 5.11. Grafik *Subgrade* Dengan Geofilm Kondisi Kering

Sumber : Hasil Penelitian

Pada Gambar penurunan terkecil terjadi pada *subgrade* dengan Geofilm tebal 40 cm. Gambar menampilkan nilai penurunan tanah akibat variasi beban yang diberikan pada timbunan dengan Geofilm tebal 20 cm, 30 cm, dan 40 cm. Grafik menyajikan ketebalan Geofilm dapat mengurangi terjadinya penurunan tanah. Perbandingan hasil eksperimen di laboratorium dengan hasil numerik Plaxis 2D versi 2023 pada timbunan Geofilm tebal 20 cm kondisi kering pada beban maksimum 20 kN sebesar

9,4%. Timbunan dengan Geofom tebal 30 cm sebesar 8,7%, dan timbunan dengan Geofom tebal 40 cm sebesar 10%.

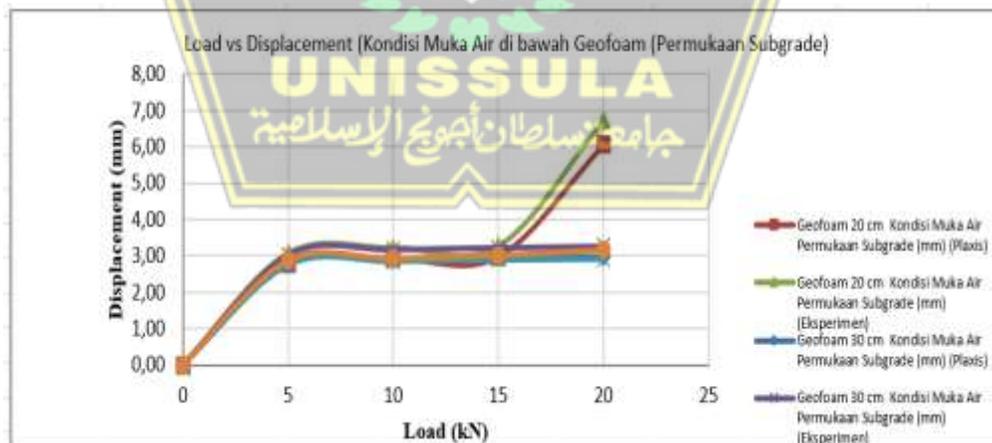
Rekapan hasil analisis eksperimen di laboratorium dengan numerik plaxis 2D untuk *subgrade* Tanah Lunak dengan Geofom kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) disajikan Tabel berikut :

Tabel 5.3. Hasil Analisis Eksperimen Dengan Plaxis 2D *Subgrade* Dengan Geofom Kondisi Muka Air di Atas Geofom (Permukaan *Subgrade*)

Beban (kN)	Displacements (mm)					
	Geofom tebal 20 cm (Eksperimen)	Geofom tebal 20 cm (Plaxis2D)	Geofom tebal 30 cm (Eksperimen)	Geofom tebal 30 cm (Plaxis2D)	Geofom tebal 40 cm (Eksperimen)	Geofom tebal 40 cm (Plaxis2D)
0	0	0	0	0	0	0
5	3,073	2,794	3,030	2,779	2,884	2,765
10	3,226	2,933	3,170	2,894	2,933	2,863
15	3,274	2,984	3,226	2,944	3,030	2,906
20	6,723	6,068	3,265	2,971	3,177	2,930
Perbandingan (%)						
	9,7		9		7,8	

Sumber : Hasil Penelitian

Penurunan terbesar terjadi pada beban maksimum 20 kN. Gambar 5.12 berikut menampilkan hasil penurunan analisis eksperimen dengan plaxis 2D dengan Geofom MAT di Permukaan *Subgrade*.



Gambar 5.12. Grafik *Subgrade* Tanah Lunak Dengan Geofom Kondisi Muka Air di Atas Geofom (Permukaan *Subgrade*)

Sumber : Hasil Penelitian

Pada Gambar penurunan terkecil pada *subgrade* dengan Geofom tebal 40 cm. Gambar menampilkan nilai penurunan tanah akibat variasi beban yang diberikan pada timbunan dengan Geofom tebal 20 cm, 30 cm, dan 40 cm dengan kondisi muka air di atas Geofom (permukaan *subgrade*). Grafik menyajikan ketebalan Geofom dapat mengurangi terjadinya penurunan tanah. Perbandingan hasil eksperimen di laboratorium dengan hasil numerik Plaxis 2D versi 2023 pada timbunan Geofom tebal 20 cm MAT pada *subgrade* akibat beban maksimum 20 kN sebesar 9,7%. Timbunan dengan Geofom tebal 30 cm sebesar 9%, dan timbunan dengan Geofom tebal 40 cm sebesar 7,8%.

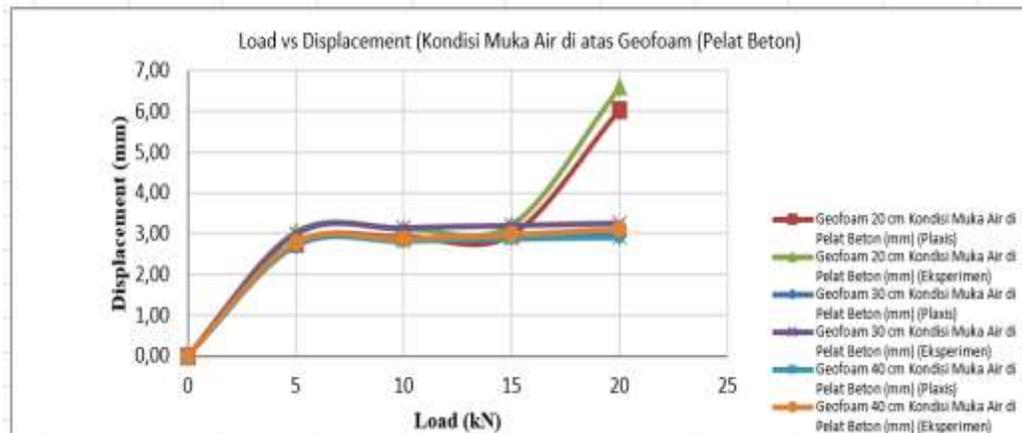
Rekapan hasil analisis eksperimen di laboratorium dengan numerik plaxis 2D untuk *subgrade* dengan Geofom kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton) disajikan Tabel berikut :

Tabel 5.4. Hasil Analisis Eksperimen Dengan Plaxis 2D *Subgrade* Tanah Lunak Dengan Geofom Kondisi Muka Air di Atas Geofom (Pelat Beton)

Beban (kN)	Displacements (mm)					
	Geofom tebal 20 cm (Eksperimen)	Geofom tebal 20 cm (Plaxis2D)	Geofom tebal 30 cm (Eksperimen)	Geofom tebal 30 cm (Plaxis2D)	Geofom tebal 40 cm (Eksperimen)	Geofom tebal 40 cm (Plaxis2D)
0	0	0	0	0	0	0
5	3,029	2,752	2,981	2,730	2,788	2,712
10	3,120	2,912	3,128	2,871	2,874	2,826
15	3,212	2,972	3,187	2,931	2,984	2,886
20	6,598	6,042	3,244	2,961	3,121	2,916
Perbandingan (%)						
	8,4		8,7		6,6	

Sumber : Hasil Penelitian

Penurunan terbesar terjadi pada beban maksimum 20 kN. Gambar berikut menampilkan hasil penurunan analisis eksperimen dengan plaxis 2D dengan Geofom kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton).



Gambar 5.13. Grafik *Subgrade* Tanah Lunak Dengan Geofom Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton)

Sumber : Hasil Penelitian

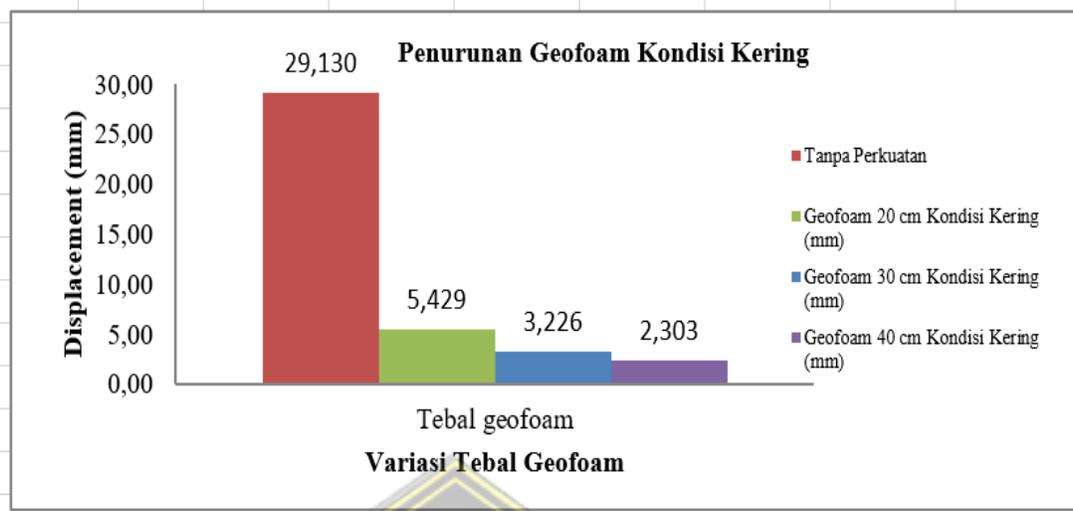
Pada Gambar penurunan terkecil pada *subgrade* dengan Geofom tebal 40 cm. Gambar menampilkan nilai penurunan tanah akibat variasi beban yang diberikan pada timbunan dengan Geofom tebal 20 cm, 30 cm, dan 40 cm dengan kondisi muka air di atas Geofom (pelat beton). Grafik menyajikan ketebalan Geofom dapat mengurangi terjadinya penurunan tanah. Perbandingan hasil eksperimen di laboratorium dengan hasil numerik Plaxis 2D versi 2023 pada timbunan Geofom tebal 20 cm MAT pada pelat beton akibat beban maksimum 20 kN sebesar 8,4%. Timbunan dengan Geofom tebal 30 cm sebesar 8,7%, dan timbunan dengan Geofom tebal 40 cm sebesar 6,6%.

5.3 Interpretasi Hasil Analisis Uji Eksperimen

Analisis numerik Plaxis 2D versi 2023 berdasarkan dimensi Geofom (hge), beban (P), dan Muka Air Tanah (w) disajikan pada Gambar berikut :

1. Kondisi Variasi Tebal Geofom Tanpa Muka Air Tanah

Kondisi ini menampilkan penurunan *subgrade* yang terjadi akibat timbunan Geofom dengan variasi tebal terhadap beban yang diberikan. Disajikan pada Gambar 5.14 berikut :



Gambar 5.14. Grafik Penurunan Dengan Variasi Tebal Geofoam Kondisi Kering Pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil Eksperimen Laboratorium)

Sumber: Hasil Penelitian

Timbunan dengan timbunan Geofoam tebal 20 cm kondisi kering dapat mengurangi terjadinya penurunan pada tanah sebesar 81,37%, tebal 30 cm sebesar 88,93%, tebal 40 cm tanpa MAT sebesar 91,06% jika dibandingkan tanpa Geofoam. Tebal Geofoam berpengaruh terhadap nilai penurunan tanah, berdasarkan eksperimen dan validasi dengan numerik plaxis 2D hasilnya semakin tebal Geofoam yang digunakan penurunan tanah yang terjadi akan semakin kecil.

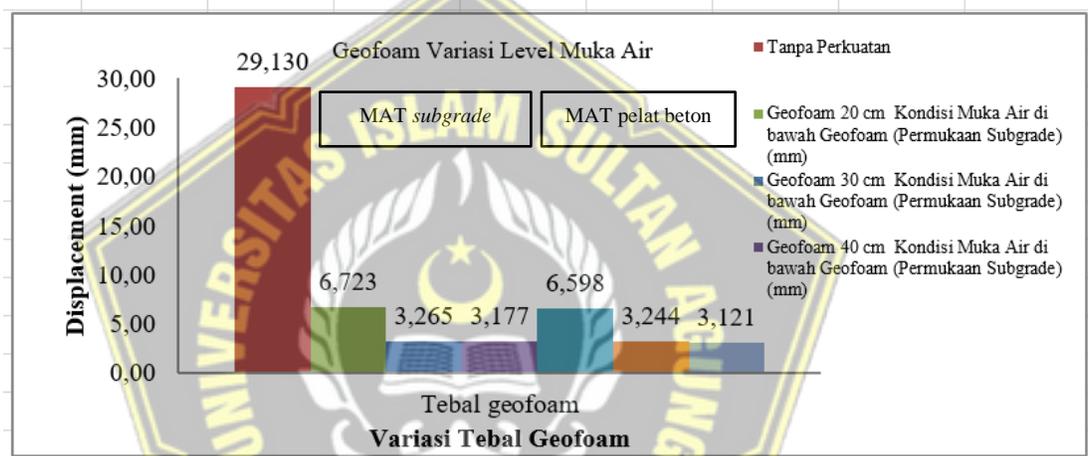
Timbunan tanpa menggunakan Geofoam mengakibatkan penurunan yang besar pada beban maksimum 20 kN sebesar 29,130 mm. Nilai penurunan yang terjadi berdasarkan penurunan timbunan untuk jalan kelas I tidak memenuhi persyaratan, syarat penurunan tanah yaitu < 20 mm (Pusat Litbang Prasarana Transportasi, 2001).

Kinerja timbunan tanah dengan Geofoam pada tanah lunak berdasarkan tebal Geofoam pada penurunan tanah yaitu terjadi penurunan tanah paling kecil pada Geofoam dengan tebal 40 cm. Geofoam dapat diperoleh sebagai pengganti timbunan, karena berdasarkan hasil eksperimen di laboratorium dapat memperkecil nilai penurunan tanah. Mengganti timbunan tanah dengan geofoam

secara signifikan mengurangi tekanan vertikal pada lapisan tanah sehingga mengurangi terjadinya timbunan (Anwar et al., 2019). Geofom merupakan material yang ringan sehingga dapat mengurangi berat yang dipikul tanah dasar, sebagai material timbunan yang ringan, Geofom dapat mereduksi beban yang dipikul oleh struktur timbunan (Sahrul R., 2024).

2. Kondisi Variasi Tebal Geofom Kondisi Terendam Air

Kondisi ini menampilkan penurunan *subgrade* yang terjadi akibat timbunan Geofom dengan variasi tebal terhadap beban yang diberikan dan variasi level Muka Air. Disajikan pada Gambar 5.15 berikut :



Gambar 5.15. Grafik Penurunan Dengan Variasi Tebal Geofom Dengan Variasi Level Muka Air Pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil Eksperimen di Laboratorium)

Sumber: Hasil Penelitian

Timbunan dengan timbunan Geofom tebal 20 cm dengan kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) dapat mengurangi terjadinya penurunan pada tanah sebesar 23,08%, tebal 20 cm sebesar 11,21%, tebal 30 cm, dan sebesar 10,91% tebal 40 cm jika dibandingkan tanpa Geofom. Elevasi Muka Air berpengaruh terhadap penurunan tanah. Semakin tinggi level Muka Air atau kondisi Geofom terendam air mengakibatkan penurunan tanah menjadi kecil.

Pengaruh Muka Air meningkatkan daya dukung *subgrade* dengan Geofom. Berdasarkan Gambar di atas, semakin tebal Geofom dan semakin tinggi level Muka Air Tanah penurunan tanah akan semakin kecil. Gaya gravitasi menyebabkan berat

partikel air menekan partikel yang ada di bawahnya, sehingga akan saling memberikan tekanan hingga dasar air. Kondisi ini membuat tekanan di bawah lebih besar dari tekanan yang ada di atas yang mengakibatkan Geofom mengalami tekanan hidrostatis. Geofom tebal 40 cm memiliki volume yang besar dibandingkan dengan Geofom tebal 30 cm dan 20 cm, sehingga penjumlahan gaya ke bawah lebih besar dibandingkan dengan gaya ke atas akibat beban hidrostatis (Efendi, 2023).

5.3.1 Hubungan Tebal Geofom Dengan Gaya Angkat (*Hydrostatic Uplift*)

Perhitungan gaya angkat (*uplift*) berdasarkan eksperimen di laboratorium berat pelat beton adalah sebagai berikut :

Tebal beton : 10 cm = 0,1 m

Panjang beton : 60 cm = 0,6 m

Lebar beton : 40 cm = 0,4 m

Berat jenis beton (γ) : 2400 kg/m³

Berdasarkan data di atas diperoleh berat pelat beton sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Berat beton} &= \text{Volume} \times \gamma_{\text{beton}} \\ &= (0,6 \times 0,4 \times 0,1) \text{ m}^3 \times 2400 \text{ kg/m}^3 \\ &= 57,6 \text{ kg} \end{aligned}$$

Gaya yang dihasilkan oleh pelat beton berdasarkan Hukum Newton II yaitu (Rumus 2.20):

$$\begin{aligned} F &= m \cdot g \\ &= 57,6 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2 \\ &= 565,48 \text{ N} = 0,565 \text{ kN} \end{aligned}$$

Perbandingan tebal Geofom dengan gaya angkat (*Hydrostatic Uplift*) sebagai berikut :

A. Kondisi Muka Air di bawah Geofom (Pada *Subgrade*)

1. Geofom tebal 20 cm tinggi level muka air 60 cm (muka air pada *subgrade*) Beban 5 kN

Tebal Geofom : 20 cm = 0,2 m

Panjang Geofom : 180 cm = 1,8 m

Massa jenis air : 9,81 kN/m³

Ketinggian air : 60 cm = 0,6 m

Untuk kasus tinggi air di kedua sisi timbunan memiliki tinggi yang sama, persamaan faktor keamanan menjadi (rumus 2.8) :

$$Fk = \frac{SN}{SU}$$

$$FK = \frac{W_{EPS} + W_{air} + W'_{air} + O_{REQ}}{\gamma_w \times (h + S_{total}) \times B_w}$$

$$\begin{aligned} W_{EPS} : \text{Berat Geof foam} &= p \times l \times h \times \gamma_{\text{Geof foam}} \\ &= 1,80 \text{ m} \times 0,5 \times 0,2 \text{ m} \times 0,216 \text{ kN/m}^3 \\ &= 0,0389 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$S_{\text{total}} : \text{Penurunan total} = 3,073 \times 10^{-3}$$

$\frac{sh}{sv}$ = Perbandingan sisi horizontal dengan vertikal kemiringan timbunan (karena model eksperimen berbentuk persegi panjang sehingga perbandingannya menjadi 1 : 1) (Rumus 2.15)

$$\begin{aligned} W_{\text{air}} : \text{Berat air} &= \frac{1}{2} (h + S_{\text{total}}) \left(\frac{sh}{sv} \right) (h + S_{\text{total}}) \times \gamma_{\text{air}} \\ &= \frac{1}{2} (0,6 + 3,073 \times 10^{-3}) (1/1) (0,6 + 3,073 \times 10^{-3}) \times 9,81 \\ &= 0,302 \times 1 \times 0,603 \times 9,81 \\ &= 1,787 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Beban = 5 kN

O_{REQ} : Beban tambahan yang diperlukan struktur timbunan EPS blok *geof foam* agar memenuhi faktor aman. Berdasarkan Rumus 2.12 maka:

$$\begin{aligned} O_{REQ} &= [1,2 (\gamma_w \times (h + S_{\text{total}}) \times B_w)] - [(W_{EPS} + W_{\text{air}} + W'_{\text{air}})] \\ &= [1,2 (9,81 \text{ kN/m}^3 \times (0,6 \text{ m} + 3,073 \times 10^{-3} \text{ m}) \times 2 \text{ m})] - [(0,0389 \text{ kN/m} + \\ &1,787 \text{ kN/m} + 1,787 \text{ kN/m})] = 14,199 \text{ kN/m} - 3,613 \text{ kN/m} = 10,586 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Tekanan air menimbulkan gaya angkat pada dasar timbunan sebesar (Rumus 2.17):

$$\begin{aligned} Su &= \gamma_w \times B_w \times (h' + S_{\text{total}}) \\ &= 9,81 \text{ kN/m}^3 \times 2 \text{ m} \times (0,6 \text{ m} + 3,073 \times 10^{-3} \text{ m}) \\ &= 11,832 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

S_n = Total gaya normal yang bekerja

$$\begin{aligned}
&= W_{EPS} + W_{air} + W'_{air} + O_{REQ} \\
&= 0,0389 \text{ kN/m} + 1,787 \text{ kN/m} + 1,787 \text{ kN/m} + 10,586 \text{ kN/m} \\
&= 14,199 \text{ kN/m}
\end{aligned}$$

Faktor Keamanan terhadap pergerakan vertikal struktur timbunan akibat kenaikan permukaan air tanah adalah :

$$\begin{aligned}
Fk &= \frac{SN}{SU} \\
&= \frac{14,199}{11,832} = 1,2
\end{aligned}$$

Faktor keamanan terhadap pergerakan vertikal struktur timbunan akibat beban yang diberikan dan akibat kenaikan permukaan air tanah disajikan Tabel berikut :

Tabel 5.5. FK Timbunan Geofom Tebal 20 cm akibat Kondisi Muka Air di Bawah Geofom (Permukaan *Subgrade*)

No	Beban (kN/m)	SN (Gaya Total Yang Bekerja) (kN/m)	SU (Gaya Angkat) (kN/m)	FK (Sn/Su)	FK yang disyaratkan
1.	0	14,074	11,772	1,19	1,2
2.	5	14,199	11,832	1,2	
3.	10	14,295	11,896	1,2	
4.	15	14,416	11,959	1,2	
5.	20	14,652	12,092	1,2	

Sumber: Hasil Penelitian

Faktor keamanan 1,2 merupakan nilai FK yang diinginkan dalam perhitungan gaya angkat air. Ini karena gaya angkat air merupakan pembebanan yang terjadi sementara dan tidak memerlukan nilai FK yang terlalu besar. Dari hasil eksperimen untuk geofom tebal 20 cm faktor keamanan yang diperoleh adalah 1,2 (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Kondisi beban 0 kN diasumsikan kondisi tanpa ada beban, nilai faktor keamanan yang diperoleh sebesar 1,19 belum memenuhi persyaratan yaitu 1,2.

2. Geofom tebal 30 cm tinggi level muka air 60 cm (muka air *subgrade*) beban 5 kN

- Tebal Geofom : 30 cm = 0,3 m
- Panjang Geofom : 180 cm = 1,8 m
- Massa jenis air : 9,81 kN/m³

Ketinggian air : 60 cm = 0,6 m

Untuk kasus tinggi air di kedua sisi timbunan memiliki tinggi yang sama, persamaan faktor keamanan menjadi (Rumus 2.8):

$$Fk = \frac{SN}{SU}$$

$$FK = \frac{W_{EPS} + W_{air} + W'_{air} + O_{REQ}}{\gamma_w \times (h + S_{total}) \times B_w}$$

$$\begin{aligned} W_{EPS} : \text{Berat Geofoam} &= p \times l \times h \times \gamma_{Geofoam} \\ &= 1,80 \text{ m} \times 0,5 \times 0,3 \text{ m} \times 0,216 \text{ kN/m}^3 \\ &= 0,058 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$S_{total} : \text{Penurunan total} = 3,030 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$\frac{sh}{sv}$ = Perbandingan sisi horizontal dengan vertikal kemiringan timbunan (karena model eksperimen berbentuk persegi panjang sehingga perbandingannya menjadi 1 : 1) (Rumus 2.15)

$$\begin{aligned} W_{air} : \text{Berat air} &= \frac{1}{2} (h + S_{total}) \left(\frac{sh}{sv} \right) (h + S_{total}) \times \gamma_{air} \\ &= \frac{1}{2} (0,6 + 3,030 \times 10^{-3}) (1/1) (0,6 + 3,030 \times 10^{-3}) \times 9,81 \\ &= 0,302 \times 1 \times 0,603 \times 9,81 \\ &= 1,787 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\text{Beban} = 5 \text{ kN}$$

O_{REQ} : Beban tambahan yang diperlukan struktur timbunan EPS blok *geofoam* agar memenuhi faktor aman. Berdasarkan Rumus 2.12

$$\begin{aligned} O_{REQ} &= [1,2 (\gamma_w \times (h + S_{total}) \times B_w)] - [(W_{EPS} + W_{air} + W'_{air})] \\ &= [1,2 (9,81 \text{ kN/m}^3 \times (0,6 \text{ m} + 3,030 \times 10^{-3} \text{ m}) \times 2 \text{ m})] - [(0,058 \text{ kN/m} \\ &+ 1,787 \text{ kN/m} + 1,787 \text{ kN/m})] = 14,198 \text{ kN/m} - 3,623 \text{ kN/m} \\ &= 10,575 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Tekanan air menimbulkan gaya angkat pada dasar timbunan sebesar (Rumus 2.17) :

$$\begin{aligned} Su &= \gamma_w \times B_w \times (h' + S_{total}) \\ &= 9,81 \text{ kN/m}^3 \times 2 \text{ m} \times (0,6 \text{ m} + 3,030 \times 10^{-3} \text{ m}) \\ &= 11,831 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Sn = Total gaya normal yang bekerja

$$\begin{aligned}
&= W_{\text{EPS}} + W_{\text{air}} + W'_{\text{air}} + O_{\text{REQ}} \\
&= 0,058 \text{ kN/m} + 1,787 \text{ kN/m} + 1,787 \text{ kN/m} + 10,575 \text{ kN/m} \\
&= 14,207 \text{ kN/m}
\end{aligned}$$

Faktor Keamanan terhadap pergerakan vertikal struktur timbunan akibat kenaikan permukaan air tanah adalah :

$$\begin{aligned}
Fk &= \frac{SN}{SU} \\
&= \frac{14,207}{11,831} = 1,2
\end{aligned}$$

Faktor keamanan terhadap pergerakan vertikal struktur timbunan akibat beban yang diberikan dan akibat kenaikan permukaan air tanah disajikan Tabel berikut :

Tabel 5.6. FK Timbunan Geofom Tebal 30 cm Akibat Kondisi Muka Air di bawah Geofom (Permukaan *Subgrade*)

No	Beban (kN/m)	Sn (Gaya Total Yang Bekerja) (kN/m)	Su (Gaya Angkat) (kN/m)	FK (Sn/Su)	FK yang disyaratkan
1.	0	14,084	11,772	1,19	1,2
2.	5	14,207	11,831	1,2	
3.	10	14,302	11,894	1,2	
4.	15	14,420	11,957	1,2	
5.	20	14,519	12,021	1,2	

Sumber: Hasil Penelitian

Faktor keamanan 1,2 merupakan nilai FK yang diinginkan dalam perhitungan gaya angkat air. Ini karena gaya angkat air merupakan pembebanan yang terjadi sementara dan tidak memerlukan nilai FK yang terlalu besar. Dari hasil eksperimen untuk geofom tebal 30 cm faktor keamanan yang diperoleh sebesar 1,2 (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Kondisi beban 0 kN diasumsikan kondisi tanpa ada beban, nilai faktor keamanan yang diperoleh sebesar 1,19 belum memenuhi persyaratan yaitu 1,2.

3. Geofom tebal 40 cm tinggi level muka air 60 cm (muka air di *subgrade*) beban 5 kN

Tebal Geofom : 40 cm = 0,4 m
 Panjang Geofom : 180 cm = 1,8 m
 Massa jenis air : 9,81 kN/m³

Ketinggian air : 60 cm = 0,6 m

Untuk kasus tinggi air di kedua sisi timbunan memiliki tinggi yang sama, persamaan faktor keamanan menjadi (Rumus 2.8) :

$$Fk = \frac{SN}{SU}$$

$$FK = \frac{W_{EPS} + W_{air} + W'_{air} + O_{REQ}}{\gamma_w \times (h + S_{total}) \times B_w}$$

$$\begin{aligned} W_{EPS} : \text{Berat Geof foam} &= p \times l \times h \times \gamma_{\text{geof foam}} \\ &= 1,80 \text{ m} \times 0,5 \times 0,4 \text{ m} \times 0,216 \text{ kN/m}^3 \\ &= 0,077 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$S_{total} : \text{Penurunan total} = 2,884 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$\frac{sh}{sv}$ = Perbandingan sisi horizontal dengan vertikal kemiringan timbunan (karena model eksperimen berbentuk persegi panjang sehingga perbandingannya menjadi 1 : 1) (Rumus 2.15).

$$\begin{aligned} W_{air} : \text{Berat air} &= \frac{1}{2} (h + S_{total}) \left(\frac{sh}{sv} \right) (h + S_{total}) \times \gamma_{air} \\ &= \frac{1}{2} (0,6 + 2,884 \times 10^{-3}) (1/1) (0,6 + 2,884 \times 10^{-3}) \times 9,81 \\ &= 0,301 \cdot 1 \cdot 0,603 \cdot 9,81 \\ &= 1,780 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Beban = 5 kN

O_{REQ} : Beban tambahan yang diperlukan struktur timbunan EPS blok *geof foam* agar memenuhi faktor aman. Berdasarkan Rumus 2.12 maka :

$$\begin{aligned} O_{REQ} &= [1,2 (\gamma_w \times (h + S_{total}) \times B_w)] - [(W_{EPS} + W_{air} + W'_{air})] \\ &= [1,2 (9,81 \text{ kN/m}^3 \times (0,6 \text{ m} + 2,884 \times 10^{-3} \text{ m}) \times 2 \text{ m})] - [(0,077 \text{ kN/m} + \\ &1,780 \text{ kN/m} + 1,780 \text{ kN})] = 14,194 \text{ kN/m} - 3,637 \text{ kN/m} = 10,557 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Tekanan air menimbulkan gaya angkat pada dasar timbunan sebesar (Rumus 2.17) :

$$\begin{aligned} S_u &= \gamma_w \times B_w \times (h' + S_{total}) \\ &= 9,81 \text{ kN/m}^3 \times 2 \text{ m} \times (0,6 \text{ m} + 2,884 \times 10^{-3} \text{ m}) \\ &= 11,828 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

S_n = Total gaya normal yang bekerja

$$= W_{EPS} + W_{air} + W'_{air} + O_{REQ}$$

$$= 0,077 \text{ kN/m} + 1,780 \text{ kN/m} + 1,780 \text{ kN/m} + 10,557 \text{ kN/m}$$

$$= 14,194 \text{ kN/m}$$

Faktor Keamanan terhadap pergerakan vertikal struktur timbunan akibat kenaikan permukaan air tanah adalah :

$$Fk = \frac{SN}{SU}$$

$$= \frac{14,194}{11,828} = 1,2$$

Faktor keamanan terhadap pergerakan vertikal struktur timbunan akibat beban yang diberikan dan akibat kenaikan permukaan air tanah disajikan Tabel berikut :

Tabel 5.7. FK Timbunan Geofom Tebal 40 cm Akibat Kondisi Muka Air di Bawah Geofom (Permukaan *Subgrade*)

No	Beban (kN/m)	Sn (Gaya Total Yang Bekerja) (kN/m)	Su (Gaya Angkat) (kN/m)	FK (Sn/Su)	FK yang disyaratkan
1.	0	14,126	11,772	1,19	1,2
2.	5	14,194	11,828	1,2	
3.	10	14,264	11,886	1,2	
4.	15	14,336	11,946	1,2	
5.	20	14,409	12,007	1,2	

Sumber: Hasil Penelitian

Faktor keamanan 1,2 merupakan nilai FK yang diinginkan dalam perhitungan gaya angkat air. Ini karena gaya angkat air merupakan pembebanan yang terjadi sementara dan tidak memerlukan nilai FK yang terlalu besar. Dari hasil eksperimen untuk geofom tebal 40 cm faktor keamanan yang diperoleh sebesar 1,2 (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Kondisi beban 0 kN diasumsikan kondisi tanpa ada beban, nilai faktor keamanan yang diperoleh sebesar 1,19 belum memenuhi persyaratan yaitu 1,2.

Hasil *safety factor* (FK) akibat gaya angkat (*Hidrostatic Uplift*) dengan muka air tanah pada *subgrade* disajikan pada Tabel berikut :

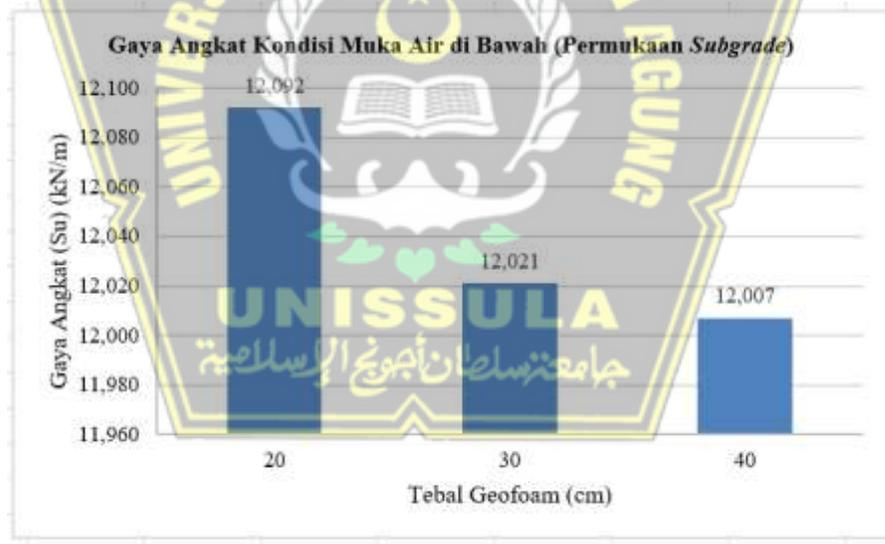
Tabel 5.8. Hasil Nilai Faktor Aman Timbunan Geofom Akibat Gaya Angkat Dengan Muka Air Pada *Subgrade* Beban 20 kN

No	Tebal Geofom (cm)	Sn (Gaya Total Yang Bekerja) (kN/m)	Su (Gaya Angkat) (kN/m)	FK (Sn/Su)
1	20	14,652	12,092	1,2
2	30	14,519	12,021	1,2
3	40	14,408	12,007	1,2

Sumber: Hasil Penelitian

Berdasarkan Tabel di atas untuk *safety factor* (FK) akibat gaya angkat dengan muka air tanah pada *subgrade*, untuk semua variasi tebal Geofom yang digunakan memenuhi *safety factor* (FK) yaitu 1,2. Nilai ini yang diinginkan untuk faktor keamanan dalam perhitungan gaya angkat, karena gaya angkat air merupakan pembebanan yang terjadi sementara dan tidak memerlukan nilai FK yang terlalu besar (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Hubungan gaya angkat dengan tebal Geofom pada kondisi Muka Air Tanah pada *subgrade* disajikan pada Gambar 5.16 berikut :



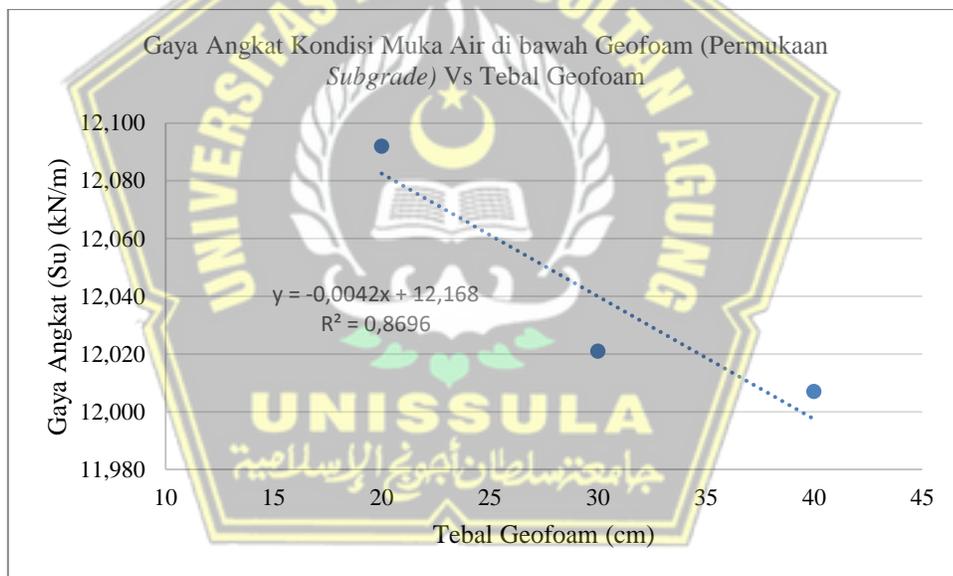
Gambar 5.16. Nilai Gaya Angkat Akibat Tebal Geofom Kondisi Muka Air di Bawah Geofom (Permukaan *Subgrade*) Akibat Beban 20 kN

Sumber: Hasil Penelitian

Pada Gambar di atas terjadi penurunan nilai gaya angkat, semakin tebal Geofom yang digunakan maka nilai gaya angkat akan semakin kecil. Tebal Geofom mempengaruhi nilai gaya angkat. Pengaruh Muka Air meningkatkan daya

dukung *subgrade* dengan Geofom. Berdasarkan Gambar di atas, semakin tebal Geofom dan semakin tinggi level Muka Air maka penurunan tanah akan semakin kecil. Gaya gravitasi menyebabkan berat partikel air menekan partikel yang ada di bawahnya, sehingga akan saling memberikan tekanan hingga dasar air. Kondisi ini membuat tekanan di bawah lebih besar dari tekanan yang ada di atas yang mengakibatkan Geofom mengalami tekanan hidrostatis. Geofom tebal 40 cm memiliki volume yang besar dibandingkan dengan Geofom tebal 30 cm dan 20 cm, sehingga penjumlahan gaya ke bawah lebih besar dibandingkan dengan gaya ke atas akibat beban hidrostatis (Efendi, 2023).

Berdasarkan hasil gaya angkat yang diperoleh selanjutnya dapat dibuat grafik pengaruh tebal Geofom terhadap gaya angkat akibat Muka Air pada *subgrade* akibat beban 20 kN disajikan Gambar berikut :



Gambar 5.17. Grafik Pengaruh Tebal Geofom Terhadap Gaya Angkat Kondisi Muka Air di Bawah Geofom (Permukaan *Subgrade*) Akibat Beban 20 kN

Sumber: Hasil Penelitian

Kurva pada Gambar di atas merupakan regresi linier dengan tiga data utama hasil analisis rumus tekanan hidrostatis menggunakan Geofom. Berdasarkan trend grafik tersebut dapat dirumuskan bahwa pengaruh tebal Geofom terhadap gaya angkat dapat ditulis dengan Persamaan berikut :

$$y = -0,0042x + 12,168$$

$$Su = -0,0042 \cdot h_{gf} + 12,168 \dots \dots \dots (5.1)$$

Dimana :

Su : Gaya angkat (kN/m)

h_{gf} : Tebal Geofoam (cm)

Tingkat akurasi regresi linear berdasarkan koefisien determinasi $R^2 = 0,8696$, berdasarkan Tabel 2.19 nilainya $> 0,75$ maka akurasi model regresi kategori sangat baik.

B. Kondisi Muka Air di atas Geofoam (Pada Pelat Beton)

1. Geofoam tebal 20 cm tinggi level muka air 85 cm (muka air pada pelat beton)

beban 5 kN

Tebal Geofoam : 20 cm = 0,2 m

Panjang Geofoam : 180 cm = 1,8 m

Massa jenis air : 9,81 kN/m³

Ketinggian air : 85 cm = 0,85 m (60 cm + 20 cm + 0,5 cm)

Untuk kasus tinggi air di kedua sisi timbunan memiliki tinggi yang sama, persamaan faktor keamanan menjadi (Rumus 2.8) :

$$Fk = \frac{SN}{SU}$$

$$FK = \frac{W_{EPS} + W_{air} + W'_{air} + O_{REQ}}{\gamma_w \times (h + S_{total}) \times B_w}$$

$$W_{EPS} : \text{Berat Geofoam} = p \times l \times h \times \gamma_{Geofoam}$$

$$= 1,80 \text{ m} \times 0,5 \times 0,2 \text{ m} \times 0,216 \text{ kN/m}^3$$

$$= 0,0389 \text{ kN/m}$$

$$\text{Beban} = 5 \text{ kN}$$

$$S_{total} : \text{Penurunan total} = 3,029 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$\frac{sh}{sv}$ = Perbandingan sisi horizontal dengan vertikal kemiringan timbunan (karena

model eksperimen berbentuk persegi panjang sehingga perbandingannya menjadi

1 : 1) (Rumus 2.15).

$$\begin{aligned}
 W_{\text{air}} : \text{Berat air} &= \frac{1}{2} (h + S_{\text{total}}) \left(\frac{sh}{sv} \right) (h + S_{\text{total}}) \times \gamma_{\text{air}} \\
 &= \frac{1}{2} (0,85 + 3,029 \times 10^{-3}) (1/1)(0,85 + 3,029 \times 10^{-3}) \times 9,81 \\
 &= 0,427 \times 1 \times 0,853 \times 9,81 \\
 &= 3,573 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

O_{REQ} : Beban tambahan yang diperlukan struktur timbunan EPS blok *geofoam* agar memenuhi faktor aman. Berdasarkan Rumus 2.12 maka :

$$\begin{aligned}
 O_{\text{REQ}} &= [1,2 (\gamma_w \times (h + S_{\text{total}}) \times Bw)] - [(W_{\text{EPS}} + W_{\text{air}} + W'_{\text{air}})] \\
 &= [1,2 (9,81 \text{ kN/m}^3 \times (0,85 \text{ m} + 3,029 \times 10^{-3} \text{ m}) \times 2 \text{ m})] - [(0,0389 \text{ kN/m} + \\
 &3,573 \text{ kN/m} + 3,573 \text{ kN/m})] = 20,084 \text{ kN/m} - 7,185 \text{ kN/m} = 12,8991 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Tekanan air menimbulkan gaya angkat pada dasar timbunan sebesar (Rumus 2.17):

$$\begin{aligned}
 S_u &= \gamma_w \times Bw \times (h' + S_{\text{total}}) \\
 &= 9,81 \text{ kN/m}^3 \times 2 \text{ m} \times (0,85 \text{ m} + 3,029 \times 10^{-3} \text{ m}) \\
 &= 16,736 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_n &= \text{Total gaya normal yang bekerja} \\
 &= W_{\text{EPS}} + W_{\text{air}} + W'_{\text{air}} + O_{\text{REQ}} \\
 &= 0,0389 \text{ kN/m} + 3,573 \text{ kN/m} + 3,573 \text{ kN/m} + 12,8991 \text{ kN/m} \\
 &= 20,084 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Faktor Keamanan terhadap pergerakan vertikal struktur timbunan akibat kenaikan permukaan air tanah adalah :

$$\begin{aligned}
 F_k &= \frac{S_n}{S_u} \\
 &= \frac{20,084}{16,736} = 1,2
 \end{aligned}$$

Faktor keamanan terhadap pergerakan vertikal struktur timbunan akibat beban yang diberikan dan akibat kenaikan permukaan air tanah disajikan Tabel berikut :

Tabel 5.9. FK Timbunan Geofom Tebal 20 cm akibat Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton)

No	Beban (kN/m)	Sn (Gaya Total Yang Bekerja) (kN/m)	Su (Gaya Angkat) (kN/m)	FK (Sn/Su)	FK yang disyaratkan
1.	0	20,011	16,677	1,19	1,2
2.	5	20,084	16,736	1,2	
3.	10	20,156	16,792	1,2	
4.	15	20,232	16,860	1,2	
5.	20	20,388	16,990	1,2	

Sumber: Hasil Penelitian

Faktor keamanan 1,2 merupakan nilai FK yang diinginkan dalam perhitungan gaya angkat air. Ini karena gaya angkat air merupakan pembebanan yang terjadi sementara dan tidak memerlukan nilai FK yang terlalu besar. Dari hasil eksperimen untuk geofom tebal 20 cm faktor kermanan yang diperoleh adalah 1,2 (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Kondisi beban 0 kN diasumsikan kondisi tanpa ada beban, nilai faktor keamanan yang diperoleh sebesar 1,19 belum memenuhi persyaratan yaitu 1,2.

2. Geofom tebal 30 cm tinggi level muka air 95 cm (muka air Pelat beton) beban 5 kN

Tebal Geofom : 30 cm = 0,3 m

Panjang Geofom : 180 cm = 1,8 m

Massa jenis air : 9,81 kN/m³

Ketinggian air : 95 cm = 0,95 m (60 cm + 30 cm + 0,5 cm)

Untuk kasus tinggi air di kedua sisi timbunan memiliki tinggi yang sama, persamaan faktor keamanan menjadi (Rumus 2.8) :

$$FK = \frac{SN}{SU}$$

$$FK = \frac{W_{EPS} + W_{air} + W'_{air} + O_{REQ}}{\gamma_w \times (h + S_{total}) \times B_w}$$

$$W_{EPS} : \text{Berat Geofom} = p \times l \times h \times \gamma_{\text{Geofom}}$$

$$= 1,80 \text{ m} \times 0,5 \times 0,3 \text{ m} \times 0,216 \text{ kN/m}^3$$

$$= 0,058 \text{ kN/m}$$

Beban = 5 kN

S_{total} : Penurunan total = $2,981 \times 10^{-3}$ m

$\frac{sh}{sv}$ = Perbandingan sisi horizontal dengan vertikal kemiringan timbunan (karena model eksperimen berbentuk persegi panjang sehingga perbandingannya menjadi 1 : 1) (Rumus 2.15).

$$\begin{aligned} W_{air} : \text{Berat air} &= \frac{1}{2} (h + S_{total}) \left(\frac{sh}{sv} \right) (h + S_{total}) \times \gamma_{air} \\ &= \frac{1}{2} (0,95 + 2,981 \times 10^{-3}) (1/1)(0,95 + 2,981 \times 10^{-3}) \times 9,81 \\ &= 0,476 \times 1 \times 0,952 \times 9,81 \\ &= 4,450 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

O_{REQ} : Beban tambahan yang diperlukan struktur timbunan EPS blok *geofom* agar memenuhi faktor aman. Berdasarkan Rumus 2.12 maka :

$$\begin{aligned} O_{REQ} &= [1,2 (\gamma_w \times (h + S_{total}) \times B_w)] - [(W_{EPS} + W_{air} + W'_{air})] \\ &= [1,2 (9,81 \text{ kN/m}^3 \times (0,95 \text{ m} + 2,981 \times 10^{-3} \text{ m}) \times 2 \text{ m})] - [(0,058 \text{ kN/m} + 4,450 \text{ kN/m} + 4,450 \text{ kN/m})] \\ &= 22,437 \text{ kN/m} - 8,958 \text{ kN/m} = 13,479 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Tekanan air menimbulkan gaya angkat pada dasar timbunan sebesar (Rumus 2.17):

$$\begin{aligned} S_u &= \gamma_w \times B_w \times (h' + S_{total}) \\ &= 9,81 \text{ kN/m}^3 \times 2 \text{ m} \times (0,95 \text{ m} + 2,981 \times 10^{-3} \text{ m}) \\ &= 18,697 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

S_n = Total gaya normal yang bekerja

$$\begin{aligned} &= W_{EPS} + W_{air} + W'_{air} + O_{REQ} \\ &= 0,058 \text{ kN/m} + 4,450 \text{ kN/m} + 4,450 \text{ kN/m} + 13,479 \text{ kN/m} = 22,437 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Faktor Keamanan terhadap pergerakan vertikal struktur timbunan akibat kenaikan permukaan air tanah adalah :

$$\begin{aligned} F_k &= \frac{S_n}{S_u} \\ &= \frac{22,437}{18,697} = 1,2 \end{aligned}$$

Faktor keamanan terhadap pergerakan vertikal struktur timbunan akibat beban yang diberikan dan akibat kenaikan permukaan air tanah disajikan Tabel berikut :

Tabel 5.10. FK Timbunan Geofom Tebal 30 cm akibat Muka Air di atas Geofom (Pada Pelat Beton)

No	Beban (kN/m)	Sn (Gaya Total Yang Bekerja) (kN/m)	Su (Gaya Angkat) (kN/m)	FK (Sn/Su)	FK yang disyaratkan
1.	0	22,366	18,639	1,19	1,2
2.	5	22,437	18,697	1,2	
3.	10	22,440	18,700	1,2	
4.	15	22,442	18,701	1,2	
5.	20	22,443	18,702	1,2	

Sumber: Hasil Penelitian

Faktor keamanan 1,2 merupakan nilai FK yang diinginkan dalam perhitungan gaya angkat air. Ini karena gaya angkat air merupakan pembebanan yang terjadi sementara dan tidak memerlukan nilai FK yang terlalu besar. Dari hasil eksperimen untuk geofom tebal 30 cm faktor keamanan yang diperoleh sebesar 1,2 (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Kondisi beban 0 kN diasumsikan kondisi tanpa ada beban, nilai faktor keamanan yang diperoleh sebesar 1,19 belum memenuhi persyaratan yaitu 1,2.

3. Geofom tebal 40 cm tinggi level muka air 105 cm (muka air di pelat beton)

Tebal Geofom : 40 cm = 0,4 m

Panjang Geofom : 180 cm = 1,8 m

Massa jenis air : 9,81 kN/m³

Ketinggian air : 105 cm = 1,05 m (60 cm + 40 cm + 0,5 cm)

Untuk kasus tinggi air di kedua sisi timbunan memiliki tinggi yang sama, persamaan faktor keamanan menjadi (Rumus 2.8):

$$Fk = \frac{SN}{SU}$$

$$FK = \frac{W_{EPS} + W_{air} + W'_{air} + O_{REQ}}{\gamma_w \times (h + S_{total}) \times B_w}$$

$$W_{EPS} : \text{Berat Geofom} = p \times l \times h \times \gamma_{\text{Geofom}}$$

$$= 1,80 \text{ m} \times 0,5 \times 0,4 \text{ m} \times 0,216 \text{ kN/m}^3$$

$$= 0,077 \text{ kN/m}$$

$$S_{\text{total}} : \text{Penurunan total} = 2,788 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$\frac{sh}{sv}$ = Perbandingan sisi horizontal dengan vertikal kemiringan timbunan (karena model eksperimen berbentuk persegi panjang sehingga perbandingannya menjadi 1 : 1) (Rumus 2.15).

$$\begin{aligned} W_{\text{air}} : \text{Berat air} &= \frac{1}{2} (h + S_{\text{total}}) \left(\frac{sh}{sv}\right) (h + S_{\text{total}}) \times \gamma_{\text{air}} \\ &= \frac{1}{2} (1,05 + 2,788 \times 10^{-3}) (1/1)(1,05 + 2,788 \times 10^{-3}) \times 9,81 \\ &= 0,526 \times 1 \times 1,052 \times 9,81 \\ &= 5,432 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

O_{REQ} : Beban tambahan yang diperlukan struktur timbunan EPS blok Geofom agar memenuhi faktor aman. Berdasarkan Rumus 2.12 maka :

$$\begin{aligned} O_{\text{REQ}} &= [1,2 (\gamma_w \times (h + S_{\text{total}}) \times Bw)] - [(W_{\text{EPS}} + W_{\text{air}} + W'_{\text{air}})] \\ &= [1,2 (9,81 \text{ kN/m}^3 \times (1,05 \text{ m} + 2,788 \times 10^{-3} \text{ m}) \times 2 \text{ m})] - [(0,077 \text{ kN/m} + 5,432 \text{ kN/m} + 5,432 \text{ kN/m})] \\ &= 24,787 \text{ kN/m} - 10,941 \text{ kN/m} = 13,846 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Tekanan air menimbulkan gaya angkat pada dasar timbunan sebesar (Rumus 2.17):

$$\begin{aligned} Su &= \gamma_w \times Bw \times (h' + S_{\text{total}}) \\ &= 9,81 \text{ kN/m}^3 \times 2 \text{ m} \times (1,05 \text{ m} + 2,788 \times 10^{-3} \text{ m}) \\ &= 20,655 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Sn &= \text{Total gaya normal yang bekerja} \\ &= W_{\text{EPS}} + W_{\text{air}} + W'_{\text{air}} + O_{\text{REQ}} \\ &= 0,077 \text{ kN/m} + 5,432 \text{ kN/m} + 5,432 \text{ kN/m} + 13,846 \text{ kN/m} \\ &= 24,787 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Faktor Keamanan terhadap pergerakan vertikal struktur timbunan akibat kenaikan permukaan air tanah adalah :

$$\begin{aligned} Fk &= \frac{SN}{SU} \\ &= \frac{24,787}{20,655} = 1,19 \end{aligned}$$

Faktor keamanan terhadap pergerakan vertikal struktur timbunan akibat beban yang diberikan dan akibat kenaikan permukaan air tanah disajikan Tabel berikut :

Tabel 5.11. FK Timbunan Geofom Tebal 40 cm akibat Muka Air di atas Geofom (Pelat Beton)

No	Beban (kN/m)	Sn (Gaya Total Yang Bekerja) (kN/m)	Su (Gaya Angkat) (kN/m)	FK (Sn/Su)	FK yang disyaratkan
1.	0	24,721	20,601	1,19	1,2
2.	5	24,787	20,655	1,2	
3.	10	24,808	20,657	1,2	
4.	15	24,791	20,659	1,2	
5.	20	24,795	20,662	1,2	

Sumber: Hasil Penelitian

Faktor keamanan 1,2 merupakan nilai FK yang diinginkan dalam perhitungan gaya angkat air. Ini karena gaya angkat air merupakan pembebanan yang terjadi sementara dan tidak memerlukan nilai FK yang terlalu besar. Dari hasil eksperimen untuk geofom tebal 40 cm faktor keamanan seluruh beban diperoleh sebesar 1,2 (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Kondisi beban 0 kN diasumsikan kondisi tanpa ada beban, nilai faktor keamanan yang diperoleh sebesar 1,19 belum memenuhi persyaratan yaitu 1,2. Hasil *safety factor* (FK) akibat gaya angkat (*Hidrostatic Uplift*) dengan muka air tanah pada pelat beton disajikan pada Tabel berikut :

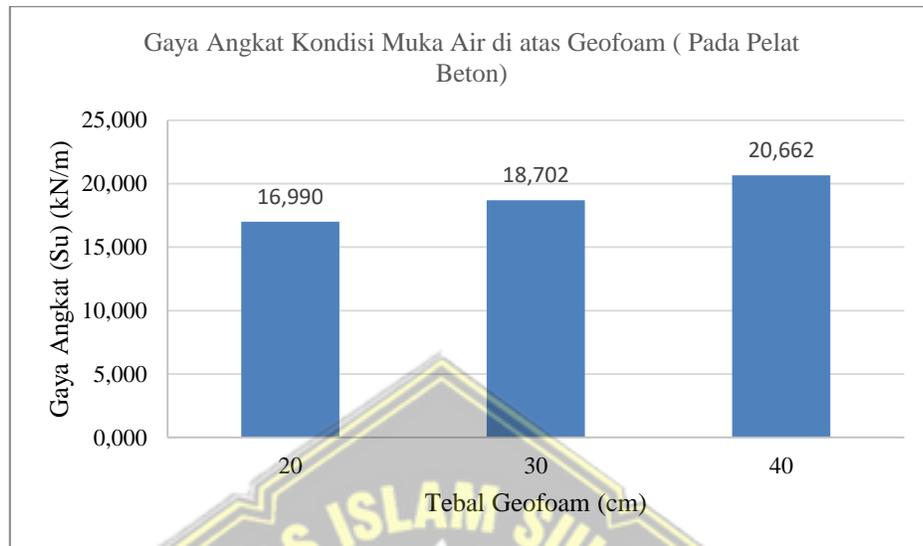
Tabel 5.12. Hasil Nilai Faktor Aman Timbunan Geofom Akibat Gaya Angkat Dengan Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pada Pelat Beton) Beban 20 kN

No	Tebal Geofom (cm)	Sn (Gaya Total Yang Bekerja) (kN/m)	Su (Gaya Angkat) (kN/m)	FK (Sn/Su)
1	20	20,388	16,990	1,2
2	30	22,443	18,702	1,2
3	40	24,795	20,662	1,2

Sumber: Hasil Penelitian

Berdasarkan Tabel di atas untuk *safety factor* (FK) akibat gaya angkat dengan muka air pada pelat beton, untuk semua variasi tebal Geofom yang digunakan memenuhi *safety factor* (FK) yaitu 1,2. Nilai ini yang diinginkan untuk faktor keamanan dalam perhitungan gaya angkat, karena gaya angkat air merupakan pembebanan yang terjadi sementara dan tidak memerlukan nilai FK yang terlalu besar (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004).

Hubungan gaya angkat dengan tebal Geofom pada kondisi Muka Air di atas Geofom (pada pelat beton) beban 20 kN disajikan pada Gambar 5.18 berikut :

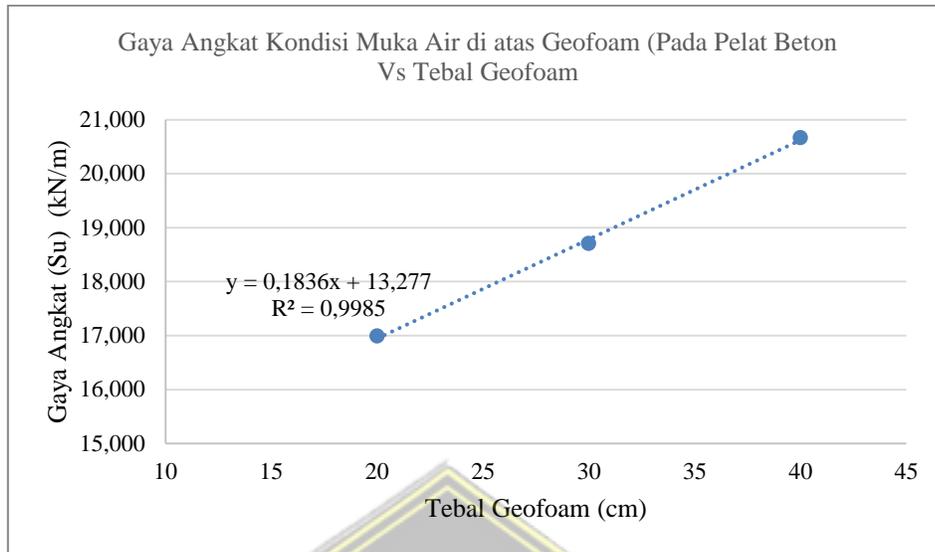


Gambar 5.18. Nilai Gaya Angkat Akibat Tebal Geofom Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pada Pelat Beton) Beban 20 kN

Sumber: Hasil Penelitian

Pada Gambar di atas terjadi kenaikan nilai gaya angkat, semakin tebal Geofom yang digunakan maka nilai gaya angkat akan semakin besar. Tebal Geofom mempengaruhi nilai gaya angkat karena dipengaruhi oleh tinggi level Muka Air. Pengaruh Muka Air meningkatkan daya dukung *subgrade* dengan Geofom. Berdasarkan Gambar di atas, semakin tebal Geofom dan semakin tinggi level Muka Air maka penurunan tanah akan semakin kecil. Gaya gravitasi menyebabkan berat partikel air menekan partikel yang ada di bawahnya, sehingga akan saling memberikan tekanan hingga dasar air. Kondisi ini membuat tekanan di bawah lebih besar dari tekanan yang ada di atas yang mengakibatkan Geofom mengalami tekanan hidrostatis. Geofom tebal 40 cm memiliki volume yang besar dibandingkan dengan Geofom tebal 30 cm dan 20 cm, sehingga penjumlahan gaya ke bawah lebih besar dibandingkan dengan gaya ke atas akibat beban hidrostatis (Efendi, 2023).

Berdasarkan data gaya angkat yang diperoleh selanjutnya dapat dibuat grafik pengaruh tebal Geofom terhadap gaya angkat akibat Kondisi Muka Air di atas Geofom (pada pelat beton) disajikan Gambar 5.19 berikut :



Gambar 5.19. Grafik Pengaruh Tebal Geof foam Terhadap Gaya Angkat Kondisi Muka Air di atas Geof foam (Pada Pelat Beton)

Sumber: Hasil Penelitian

Kurva pada Gambar di atas merupakan regresi linier dengan tiga data utama hasil analisis rumus tekanan hidrostatis menggunakan variasi tebal Geof foam dengan kondisi muka air di atas Geof foam (pada pelat beton). Berdasarkan trend grafik tersebut dapat dirumuskan bahwa pengaruh tebal Geof foam terhadap gaya angkat dapat ditulis dengan Persamaan berikut :

$$y = 0,1836x + 13,277$$

$$Su = 0,1836.h_{gf} + 13,277 \dots \dots \dots (5.2)$$

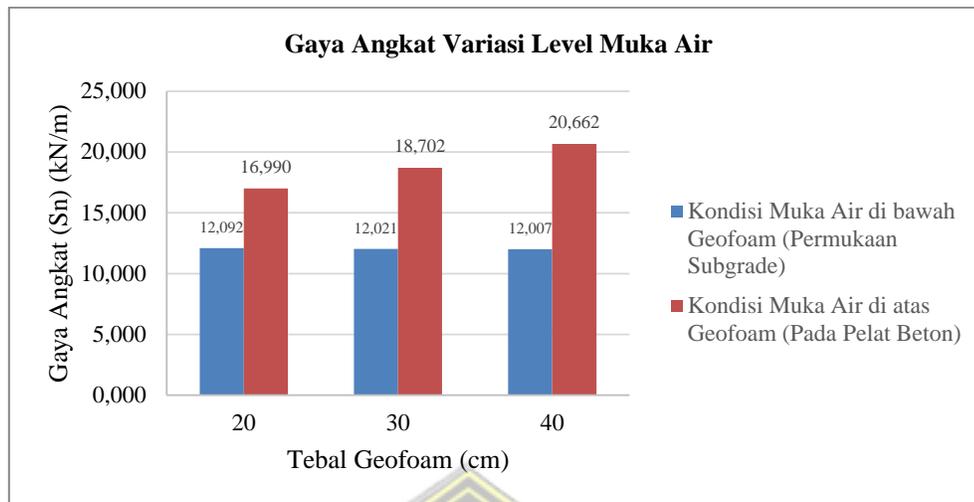
Dimana :

Su : Gaya angkat (kN/m)

h_{gf} : Tebal Geof foam (cm)

Tingkat akurasi regresi linear berdasarkan koefisien determinasi $R^2 = 0,9985$, berdasarkan Tabel 2.19 nilainya $> 0,75$ maka akurasi model regresi kategori sangat baik.

Nilai gaya angkat akibat variasi level Muka Air dan variasi tebal Geof foam disajikan pada Gambar berikut :



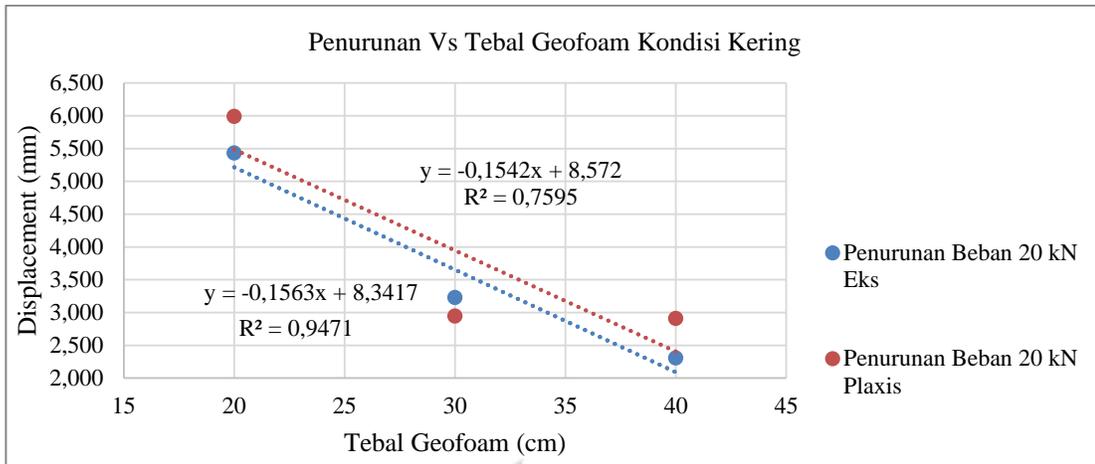
Gambar 5.20. Nilai Gaya Angkat Akibat Variasi Level Muka Air dan Tebal Geofoam

Sumber: Hasil Penelitian

Level Muka Air mempengaruhi nilai gaya angkat yang dihasilkan. Semakin tinggi level Muka Air maka nilai gaya angkat yang dihasilkan juga semakin besar. Penggunaan Geofoam sebagai timbunan di atas tanah lunak dengan kondisi terendam air menghasilkan tekanan hidrostatis. Berat jenis Geofoam yang sangat ringan (berkisar antara 11,2 – 45,7 kg/m³). Tekanan hidrostatis yang dilawan oleh material Geofoam yang dipasang pada kondisi terendam air terhadap berat sendiri struktur dan beban yang diberikan menghasilkan struktur apung yang stabil. Tebal geofoam yang ditambahkan sebagai timbunan di atas tanah lunak mampu untuk meningkatkan daya dukung dari konstruksi *floating* yang berada di permukaan air terhadap tekanan air vertikal dan tekanan air horizontal (Hendriksen, 2011).

5.4 Perbandingan Penurunan Tanah Dengan Timbunan Geofoam Pengujian Eksperimen di Laboratorium dan Numerik Plaxis 2D

Kondisi ini menampilkan semakin tebal Geofoam yang digunakan sebagai timbunan pada tanah lunak, penurunan yang terjadi akan semakin kecil. Penurunan maksimum terjadi pada semua variasi tebal Geofoam yaitu pada beban 20 kN. Kondisi ini disajikan pada Gambar 5.21 berikut :



Gambar 5.21. Grafik Pengaruh Variasi Tebal Geofoam Kondisi Kering Terhadap Penurunan Timbunan Akibat Beban 20 kN (Hasil Eksperimen di Laboratorium dan Numerik Plaxis 2D)

Sumber: Hasil Penelitian

Berdasarkan pengujian eksperimen dan validasi dengan numerik aplikasi Plaxis 2D timbunan dengan Geofoam kondisi kering, pada beban maksimum 20 kN. Berdasarkan trend grafik di atas sehingga dapat dirumuskan pengaruh tebal Geofoam terhadap penurunan tanah akibat beban maksimum 20 kN kondisi kering hasil eksperimen di laboratorium, dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$y = -0,1563x + 8,3417$$

$$S = -0,1563 \cdot h_{gf} + 8,3417 \dots \dots \dots (5.3)$$

Dimana : $y = S =$ penurunan tanah
 $x = h_{gf} =$ tebal Geofoam

Tingkat akurasi regresi linear berdasarkan nilai determinasi $R^2 = 0,9471$, berdasarkan Tabel 2.19 nilainya $> 0,75$ sehingga akurasi model regresi kategori sangat baik.

Trend grafik di atas dapat dirumuskan pengaruh tebal Geofoam terhadap penurunan tanah akibat beban maksimum 20 kN kondisi muka air di bawah Geofoam (permukaan *subgrade*) hasil analisis numerik Plaxis 2D, dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$y = -0,1542x + 8,572$$

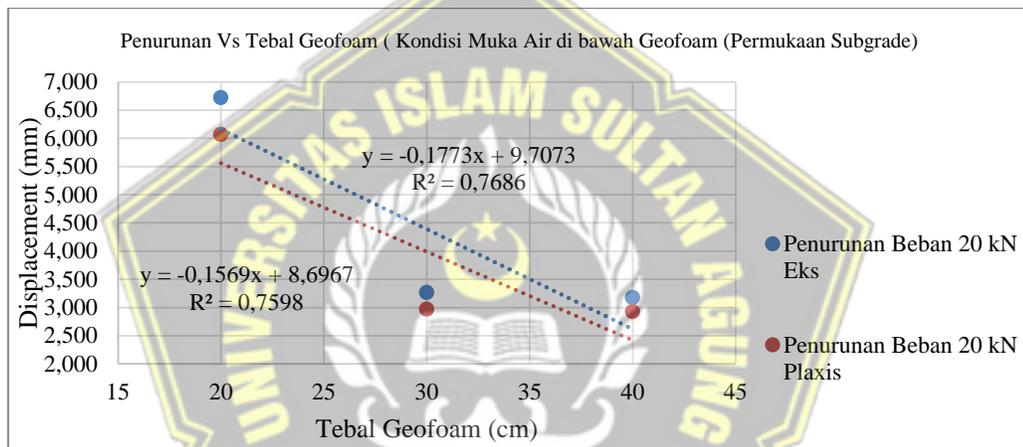
$$S = -0,1542 \cdot h_{gf} + 8,572 \dots \dots \dots (5.4)$$

Dimana : $y = S$ = penurunan tanah

$x = h_{gf}$ = tebal Geofom

Tingkat akurasi regresi linear berdasarkan nilai determinasi $R^2 = 0,7595$, berdasarkan Tabel 2.19 nilainya $> 0,75$ sehingga akurasi model regresi kategori sangat baik.

Kondisi ini manampilkan semakin tebal Geofom kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) yang digunakan sebagai timbunan pada tanah lunak, penurunan yang terjadi akan semakin kecil. Penurunan maksimum terjadi pada semua variasi tebal Geofom yaitu pada beban 20 kN. Kondisi ini disajikan pada Gambar 5.22 berikut :



Gambar 5.22. Grafik Pengaruh Variasi Tebal Geofom Kondisi Muka Air di bawah Geofom (Permukaan *Subgrade*) Terhadap Penurunan Timbunan Akibat Beban 20 kN (Hasil Eksperimen di Laboratorium dan Numerik Plaxis 2D)

Sumber: Hasil Penelitian

Berdasarkan trend grafik di atas sehingga dapat dirumuskan pengaruh tebal Geofom terhadap penurunan tanah akibat beban maksimum 20 kN kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) hasil eksperimen, dapat ditulis dengan persamaan berikut :

$$y = -0,1773x + 9,7073$$

$$S = -0,1773 \cdot h_{gf} + 9,7073 \dots \dots \dots (5.5)$$

Dimana : $y = S$ = penurunan tanah

$x = h_{gf}$ = tebal Geofom

Tingkat akurasi regresi linear berdasarkan nilai determinasi $R^2 = 0,7686$, berdasarkan Tabel 2.19 nilainya $>0,75$ akurasi model regresi kategori sangat baik.

Trend grafik di atas dapat dirumuskan pengaruh tebal Geofom terhadap penurunan tanah akibat beban maksimum 20 kN kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) hasil analisis numerik Plaxis 2D, dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$y = -0,1569x + 8,6967$$

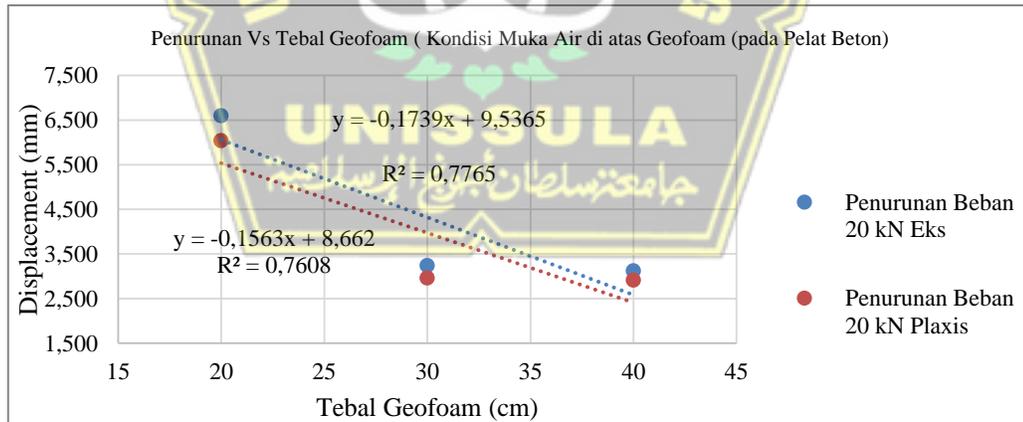
$$S = -0,1569 \cdot h_{gf} + 8,6967 \dots \dots \dots (5.6)$$

Dimana : $y = S =$ penurunan tanah

$$x = h_{gf} = \text{tebal Geofom}$$

Tingkat akurasi regresi linear berdasarkan nilai determinasi $R^2 = 0,7598$, berdasarkan Tabel 2.19 nilainya $> 0,75$ sehingga akurasi model regresi kategori sangat baik.

Kondisi ini menampilkan semakin tebal Geofom dengan kondisi muka air di atas Geofom (pada pelat beton) yang digunakan sebagai timbunan pada tanah lunak, penurunan yang terjadi akan semakin kecil. Penurunan maksimum terjadi pada semua variasi tebal Geofom yaitu pada beban 20 kN. Kondisi ini disajikan pada Gambar 5.23 berikut :



Gambar 5.23. Grafik Pengaruh Variasi Tebal Geofom Kondisi Muka Air di atas Geofom (Pada Pelat Beton) Terhadap Penurunan Timbunan Akibat Beban 20 kN (Hasil Eksperimen di Laboratorium dan Numerik Plaxis 2D)

Sumber: Hasil Penelitian

Berdasarkan trend grafik di atas sehingga dapat dirumuskan pengaruh tebal Geofom terhadap penurunan tanah akibat beban maksimum 20 kN kondisi muka air di atas Geofom (pada pelat beton), dapat ditulis dengan persamaan berikut :

$$y = -0,1739x + 9,5365$$

$$S = -0,1739 \cdot h_{gf} + 9,5365 \dots \dots \dots (5.7)$$

Dimana : $y = S$ = penurunan tanah

$$x = h_{gf} = \text{tebal Geofom}$$

Tingkat akurasi regresi linear berdasarkan nilai determinasi $R^2 = 0,7765$, berdasarkan Tabel 2.19 nilainya $> 0,75$ akurasi model regresi kategori sangat baik.

Trend grafik di atas dapat dirumuskan pengaruh tebal Geofom terhadap penurunan tanah akibat beban maksimum 20 kN kondisi muka air di atas Geofom (pada pelat beton) hasil analisis numerik Plaxis 2D, dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$y = -0,1563x + 8,662$$

$$S = -0,1563 \cdot h_{gf} + 8,662 \dots \dots \dots (5.8)$$

Dimana : $y = S$ = penurunan tanah

$$x = h_{gf} = \text{tebal Geofom}$$

Tingkat akurasi regresi linear berdasarkan nilai determinasi $R^2 = 0,7608$, berdasarkan Tabel 2.19 nilainya $> 0,75$ akurasi model regresi kategori sangat baik.

Berdasarkan analisis penurunan hasil eksperimen di laboratorium dan numerik plaxis 2D, dimana pada kondisi ering semakin tebal Geofom yang digunakan maka penurunan tanah yang terjadi akan semakin kecil. Kondisi akibat adanya lebel muka air, analisis penurunan yang terjadi semakin tinggi level muka air maka penurunan yang terjadi akan semakin kecil juga. Hasil penurunan yang diperoleh dari semua kondisi percobaan masih memenuhi toleransi penurunan timbunan tanah berdasarkan kriteria penurunan timbunan berdasarkan Pusat Litbang Transportasi (2001) pada Tabel 2.15 untuk kelas I yaitu < 20 mm.

5.5 Daya Dukung Tanah Dasar Dengan Timbunan Geofom

Keruntuhan daya dukung terjadi akibat beban yang bekerja di atas tanah dasar melebihi daya dukung tanah dasar yang berkaitan dengan kuat geser tanah dasar

tersebut. Untuk menghitung daya dukung tanah berdasarkan teori daya dukung Terzhagi sebagai berikut (Rumus 2.4) :

$$q_u = S_u \cdot N_c + \gamma_b \cdot D_f$$

Pada penelitian ini perhitungan daya dukung tanah dasar dengan timbunan Geofom berdasarkan variasi tebal Geofom :

1. Tanah tanpa timbunan Geofom

$$S_u : 20,98 \text{ kN/m}^2$$

N_c : Diperoleh dari interpolasi data pada Tabel 2.17

$$\phi (X1) : 4, N_c (Y1) : 6,19$$

$$\phi (X2) : 5, N_c (Y2) : 6,49$$

$$\phi (X) : 4,551 \quad N_c : Y$$

Rumus interpolasi :

$$Y = Y1 + \left[\frac{(X-X1)}{(X2-X1)} \right] (Y2 - Y1)$$

$$Y = 6,19 + \left[\frac{(4,551-4)}{(5-4)} \right] (6,49 - 6,19)$$

$$Y = 6,36$$

Sehingga nilai N_c diperoleh sebesar 6,35.

$$\gamma_b : 20,47 \text{ kN/m}^3$$

$$D_f : \text{Kedalaman timbunan} = 0,6 \text{ m}$$

$$q_u = S_u \cdot N_c + \gamma_b \cdot D_f$$

$$q_u = 20,98 \times 6,35 + 20,47 \times 0,6$$

$$= 145,51 \text{ kN/m}^2$$

Untuk mendapatkan nilai *safety factor* (FK) maka (Rumus 2.5) :

$$FK = \frac{q_u}{q_a}$$

$q_a = S_n =$ tegangan normal yang diberikan timbunan pada permukaan tanah pada kedalaman 0 yang mampu dipikul oleh tanah. Tanah dasar pada eksperimen ini memikul Geofom dan pelat beton, sehingga (Rumus 2.6) :

$$S_n \text{ pelat beton} = \gamma_{\text{pelat beton}} \times T_{\text{pelat beton}}$$

$$= 24 \text{ kN/m}^3 \times 0,1 \text{ m}$$

$$= 2,4 \text{ kN/m}^2$$

Analisis tegangan yang terjadi dalam massa tanah (S_n) akibat beban titik (P) di permukaan berdasarkan teori Boussinesq (1885) maka dapat ditentukan (Rumus 2.7):

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_B$$

Q = Beban yang diberikan (0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN, 20 kN)

Z = kedalaman yang ditinjau (permukaan tanah dasar) : 0,1 m

I_B = Faktor pengaruh untuk beban titik (berdasarkan Gambar 2.19 diperoleh = 0,48)

Tegangan pada tanah yang terjadi akibat beban 5 kN adalah :

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_z &= \frac{Q}{z^2} I_B \\ &= \frac{5 \text{ kN}}{(0,1 \text{ m})^2} 0,48 \\ &= 240 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

tegangan total yang terjadi diatas tanah dasar akibat timbunan Geofom tebal 20 cm pada beban 5 kN adalah :

$$\begin{aligned} q_a = S_n &= S_n \text{ pelat beton} + S_n \text{ beban titik} \\ &= 2,4 \text{ kN/m}^2 + 240 \text{ kN/m}^2 \\ &= 242,4 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Sehingga *safety factor* (FK) timbunan Geofom tebal 20 cm tanpa MAT pada beban 5 kN adalah :

$$FK = \frac{q_u}{q_a} > 1,4$$

$$FK = \frac{145,51 \text{ kN/m}^2}{240 \text{ kN/m}^2} = 0,6 < 1,4$$

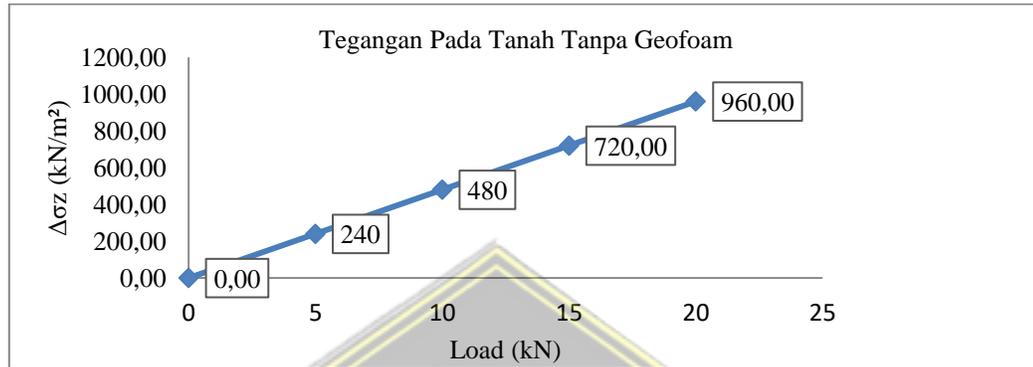
Untuk hasil perhitungan beban selanjutnya dapat dilihat pada Tabel berikut:

Tabel 5.13. Tegangan Akibat Beban Titik (z = 0,1 m)

Beban (kN)	r	r/z	I_B	$\Delta\sigma_z$ (kN/m ²)	q_a (kN/m ²)	FK
0	0	0	0,44	0	0	0
5	0	0	0,44	240	242,4	0,6
10	0	0	0,44	480	55,77	0,3
15	0	0	0,44	720	82,44	0,2
20	0	0	0,44	960	109,11	0,15

Sumber: Hasil Penelitian

Faktor aman yang terjadi pada beban maksimum 20 kN sebesar 0,15, nilai yang diperoleh kecil dari Faktor Keamanan (FK) yang disyaratkan yaitu 1,4. Gambar 5.24 berikut menampilkan hubungan antara beban yang diberikan dan tegangan akibat beban titik pada tanah dasar tanpa timbunan Geofom :

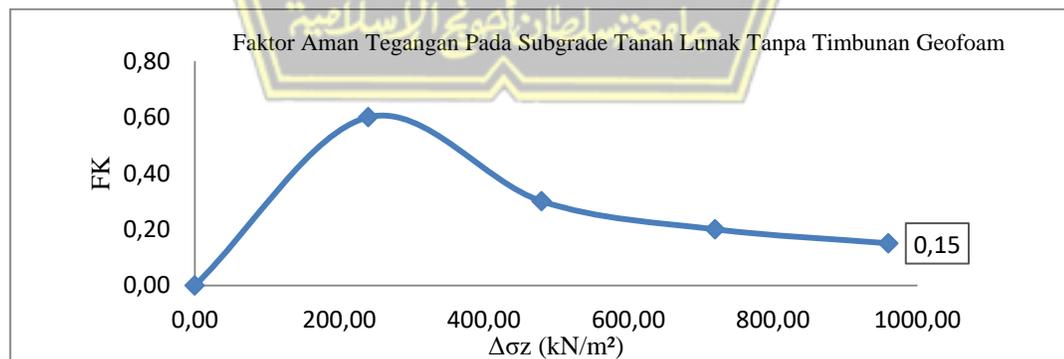


Gambar 5.24. Tegangan Akibat Beban Titik Pada *Subgrade* Tanah Dasar Tebal 60 cm Tanpa Geofom

Sumber: Hasil Penelitian

Tegangan maksimum akibat beban maksimum yang diberikan sebesar 20 kN yaitu 960 kN/m². Pada grafik terlihat semakin besar beban yang diberikan mengakibatkan tegangan yang diterima tanah dasar akan semakin besar.

Daya dukung tanah dasar berkaitan dengan faktor aman yaitu kemampuan tanah dasar memikul beban di atasnya. Hubungan tegangan pada tanah dasar dengan faktor aman (FK) tanpa timbunan Geofom disajikan Gambar 5.25 berikut :



Gambar 5.25 Hubungan Tegangan Pada *Subgrade* Tanah Dasar Tebal 60 cm Dengan Faktor Aman (FK) Tanpa Geofom

Sumber: Hasil Penelitian

Pada Gambar terlihat bahwa semakin besar tegangan yang diterima oleh tanah dasar maka nilai faktor aman (FK) akan semakin kecil. Tanpa timbunan Geofom tanah mengalami tegangan yang besar sehingga menghasilkan nilai Faktor Keamanan yang kecil yaitu 0,15. Nilai yang diperoleh kecil dari Faktor Keamanan (FK) yang disyaratkan yaitu 1,4 berdasarkan perancangan NCHRP Report 529 tahun 2004. Sehingga faktor aman yang dihasilkan tidak memenuhi syarat, untuk itu diperlukan perkuatan tanah dengan menggunakan timbunan ringan Geofom.

2. Geofom tebal 20 cm (kondisi kering)

$$S_u : 20,98 \text{ kN/m}^2$$

N_c : Diperoleh dari interpolasi data pada Tabel 2.17

$$\phi (X_1) : 4, N_c (Y_1) : 6,19$$

$$\phi (X_2) : 5, N_c (Y_2) : 6,49$$

$$\phi (X) : 4,551 \quad N_c : Y$$

Rumus interpolasi :

$$Y = Y_1 + \left[\frac{(X-X_1)}{(X_2-X_1)} \right] (Y_2 - Y_1)$$

$$Y = 6,19 + \left[\frac{(4,551-4)}{(5-4)} \right] (6,49 - 6,19)$$

$$Y = 6,36$$

Sehingga nilai N_c diperoleh sebesar 6,35.

$$\gamma_b : 20,47 \text{ kN/m}^3$$

D_f : Kedalaman timbunan = 0,6 m

$$q_u = S_u \cdot N_c + \gamma_b \cdot D_f$$

$$q_u = 20,98 \times 6,35 + 20,47 \times 0,6$$

$$= 145,51 \text{ kN/m}^2$$

Untuk mendapatkan nilai *safety factor* (FK) maka (Rumus 2.5) :

$$FK = \frac{q_u}{q_a}$$

$q_a = S_n =$ tegangan normal yang diberikan timbunan pada permukaan tanah pada kedalaman 0 yang mampu dipikul oleh tanah. Tanah dasar pada eksperimen ini memikul Geofom dan pelat beton, sehingga (Rumus 2.6) :

$$\begin{aligned}
 S_n \text{ Geofoam} &= \gamma_{\text{geofoam}} \times T_{\text{geofoam}} \\
 &= 0,216 \text{ kN/m}^3 \times 0,2 \text{ m} \\
 &= 0,043 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_n \text{ pelat beton} &= \gamma_{\text{pelat beton}} \times T_{\text{pelat beton}} \\
 &= 24 \text{ kN/m}^3 \times 0,1 \text{ m} \\
 &= 2,4 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Analisis tegangan yang terjadi dalam massa tanah (S_n) akibat beban titik (P) di permukaan berdasarkan teori Boussinesq (1885) maka dapat ditentukan (Rumus 2.7):

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_B$$

Q = Beban yang diberikan (0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN, 20 kN)

Z = kedalaman yang ditinjau (permukaan tanah dasar) : 0,3 m

I_B = Faktor pengaruh untuk beban titik (berdasarkan Gambar 2.19 diperoleh = 0,48

Tegangan pada tanah yang terjadi akibat beban 5 kN adalah :

$$\begin{aligned}
 \Delta\sigma_z &= \frac{Q}{z^2} I_B \\
 &= \frac{5 \text{ kN}}{(0,3 \text{ m})^2} 0,48 \\
 &= 26,67 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

tegangan total yang terjadi diatas tanah dasar akibat timbunan Geofoam tebal 20 cm pada beban 5 kN adalah :

$$\begin{aligned}
 q_a = S_n &= S_n \text{ Geofoam} + S_n \text{ pelat beton} + S_n \text{ beban titik} \\
 &= 0,043 \text{ kN/m}^2 + 2,4 \text{ kN/m}^2 + 26,67 \text{ kN/m}^2 \\
 &= 29,11 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Sehingga *safety factor* (FK) timbunan Geofoam tebal 20 cm kondisi kering pada beban 5 kN adalah :

$$FK = \frac{q_u}{q_a} > 1,4$$

$$FK = \frac{145,51 \text{ kN/m}^2}{29,11 \text{ kN/m}^2} = 5 > 1,4$$

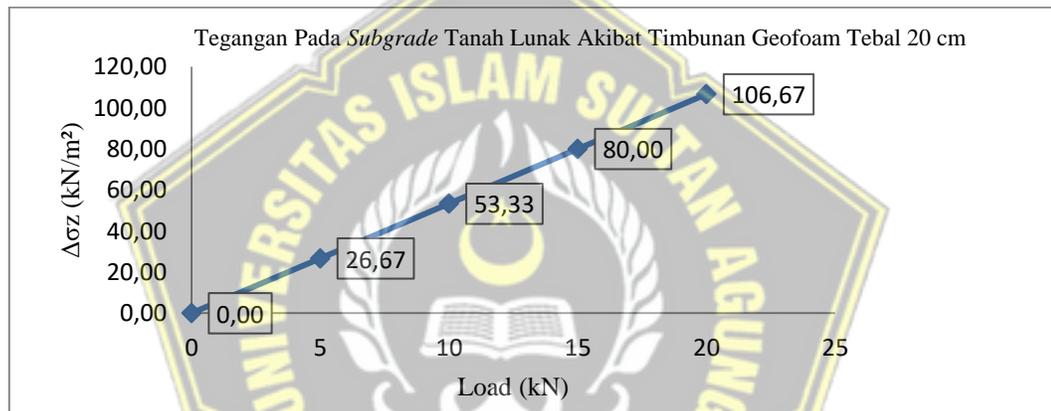
Untuk hasil perhitungan beban selanjutnya dapat dilihat pada Tabel berikut:

Tabel 5.14. Tegangan Akibat Beban Titik ($z = 0,3 \text{ m}$)

Beban (kN)	r	r/z	I_B	$\Delta\sigma_z$ (kN/m ²)	qa (kN/m ²)	FK
0	0	0	0,44	0	0	0
5	0	0	0,44	26,67	29,11	5
10	0	0	0,44	53,33	55,77	2,6
15	0	0	0,44	80,00	82,44	1,8
20	0	0	0,44	106,67	109,11	1,3

Sumber: Hasil Penelitian

Faktor aman yang terjadi pada beban maksimum 20 kN sebesar 1,3, nilai yang diperoleh besar dari Faktor Keamanan (FK) yang disyaratkan yaitu 1,4. Gambar berikut menampilkan hubungan antara beban yang diberikan dan tegangan akibat beban titik pada tanah dasar akibat timbunan dengan Geofom 5.26 tebal 20 cm :

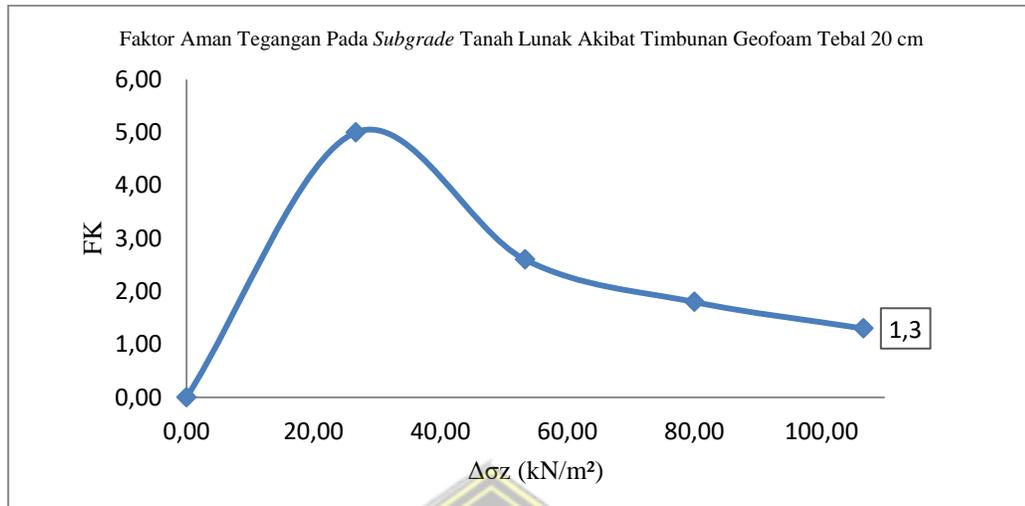


Gambar 5.26. Tegangan Akibat Beban Titik Pada *Subgrade* Tanah Dasar Tebal 60 cm Akibat Timbunan Dengan Geofom Tebal 20 cm

Sumber: Hasil Penelitian

Tegangan maksimum akibat beban maksimum yang diberikan sebesar 20 kN pada timbunan dengan Geofom tebal 20 cm yaitu 106,67 kN/m². Pada grafik terlihat semakin besar beban yang diberikan mengakibatkan tegangan yang diterima tanah dasar akan semakin besar.

Daya dukung tanah dasar berkaitan dengan faktor aman yaitu kemampuan tanah dasar memikul beban di atasnya. Hubungan tegangan pada tanah dasar dengan faktor aman (FK) akibat timbunan dengan Geofom tebal 20 cm disajikan Gambar 5.27 berikut :



Gambar 5.27. Hubungan Tegangan Pada *Subgrade* Tanah Dasar Tebal 60 cm Dengan Faktor Aman (FK) Akibat Timbunan Dengan Geofilm Tebal 20 cm

Sumber: Hasil Penelitian

Pada Gambar terlihat bahwa semakin besar tegangan yang diterima oleh tanah dasar maka nilai faktor aman (FK) akan semakin kecil. Tegangan terbesar akibat timbunan dengan Geofilm tebal 20 cm yaitu 106,67 kN/m² dengan faktor aman 1,3. Nilai yang diperoleh besar dari Faktor Keamanan (FK) yang disyaratkan yaitu 1,4 berdasarkan perancangan NCHRP Report 529 tahun 2004. Sehingga faktor aman yang dihasilkan tidak memenuhi syarat, untuk Geofilm tebal 20 cm tidak direkomendasikan sebagai timbunan di atas tanah dasar lunak.

3. Geofilm tebal 30 cm (kondisi kering)

$$S_u : 20,98 \text{ kN/m}^2$$

N_c : Diperoleh dari interpolasi data pada Tabel 2.17

$$\phi (X_1) : 4, N_c (Y_1) : 6,19$$

$$\phi (X_2) : 5, N_c (Y_2) : 6,49$$

$$\phi (X) : 4,551 \quad N_c : Y$$

Rumus interpolasi :

$$Y = Y_1 + \left[\frac{(X-X_1)}{(X_2-X_1)} \right] (Y_2 - Y_1)$$

$$Y = 6,19 + \left[\frac{(4,551-4)}{(5-4)} \right] (6,49 - 6,19)$$

$$Y = 6,36$$

Sehingga nilai N_c diperoleh sebesar 6,35.

$$\gamma_b : 20,47 \text{ kN/m}^3$$

$$D_f : \text{Kedalaman timbunan} = 0,6 \text{ m}$$

$$q_u = S_u \cdot N_c + \gamma_b \cdot D_f$$

$$\begin{aligned} q_u &= 20,98 \times 6,35 + 20,47 \times 0,6 \\ &= 145,51 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Untuk mendapatkan nilai *safety factor* (FK) maka (Rumus 2.5) :

$$FK = \frac{q_u}{q_a}$$

$q_a = S_n =$ tegangan normal yang diberikan timbunan pada permukaan tanah pada kedalaman 0 yang mampu dipikul oleh tanah. Tanah dasar pada eksperimen ini memikul Geofom dan pelat beton, sehingga (Rumus 2.6) :

$$\begin{aligned} S_n \text{ Geofom} &= \gamma_{\text{geofom}} \times T_{\text{geofom}} \\ &= 0,216 \text{ kN/m}^3 \times 0,3 \text{ m} \\ &= 0,065 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_n \text{ pelat beton} &= \gamma_{\text{pelat beton}} \times T_{\text{pelat beton}} \\ &= 24 \text{ kN/m}^3 \times 0,1 \text{ m} \\ &= 2,4 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Analisis tegangan yang terjadi dalam massa tanah (S_n) akibat beban titik (P) di permukaan berdasarkan teori Boussinesq (1885) maka dapat ditentukan (Rumus 2.7):

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_B$$

Q = Beban yang diberikan (0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN, 20 kN)

Z = kedalaman yang ditinjau (permukaan tanah dasar) : 0,4 m

I_B = Faktor pengaruh untuk beban titik (berdasarkan Gambar 2.19) = 0,48

Tegangan pada tanah yang terjadi akibat beban 5 kN adalah :

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_z &= \frac{Q}{z^2} I_B \\ &= \frac{5 \text{ kN}}{(0,4 \text{ m})^2} 0,48 \end{aligned}$$

$$= 15 \text{ kN/m}^2$$

Tegangan total yang terjadi diatas tanah dasar akibat timbunan Geofom tebal 30 cm beban 5 kN adalah :

$$\begin{aligned} q_a &= S_n = S_n \text{ Geofom} + S_n \text{ pelat beton} + S_n \text{ beban titik} \\ &= 0,065 \text{ kN/m}^2 + 2,4 \text{ kN/m}^2 + 15 \text{ kN/m}^2 \\ &= 17,47 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Sehingga *safety factor* (FK) timbunan Geofom tebal 30 cm beban 5 kN kondisi kering adalah :

$$FK = \frac{q_u}{q_a} > 1,4$$

$$FK = \frac{145,51 \text{ kN/m}^2}{17,47 \text{ kN/m}^2} = 8,3 > 1,4$$

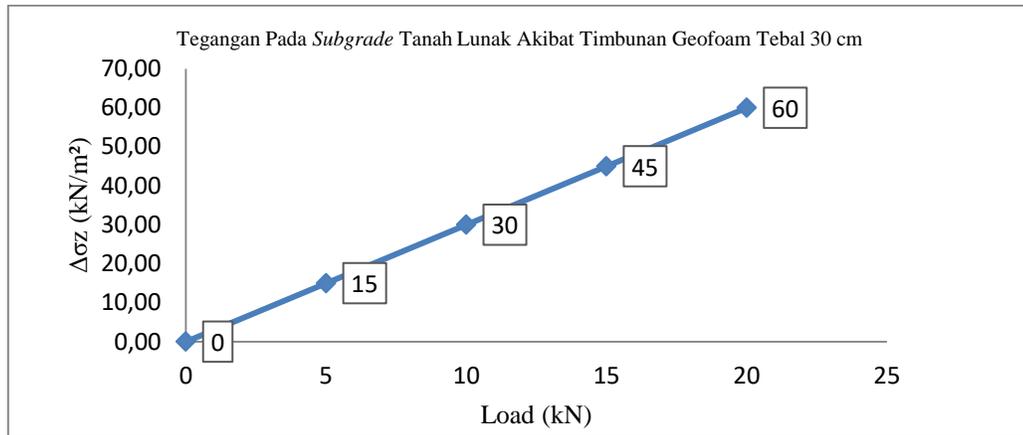
Untuk hasil perhitungan beban selanjutnya dapat dilihat pada Tabel berikut:

Tabel 5.15. Tegangan Akibat Beban Titik (z = 0,4 m)

Beban (kN)	r	r/z	I _B	Δσ _z (kN/m ²)	q _a (kN/m ²)	FK
0	0	0	0,44	0	0	0
5	0	0	0,44	15	17,47	8,3
10	0	0	0,44	30	32,47	4,5
15	0	0	0,44	45	47,47	3,1
20	0	0	0,44	60	62,47	2,3

Sumber: Hasil Penelitian

Faktor aman yang terjadi pada beban maksimum 20 kN sebesar 2,3, nilai yang diperoleh besar dari Faktor Keamanan (FK) yang disyaratkan yaitu 1,4. Gambar 5.28 berikut menampilkan hubungan antara beban yang diberikan dan tegangan akibat beban titik pada tanah dasar akibat timbunan dengan Geofom tebal 30 cm :

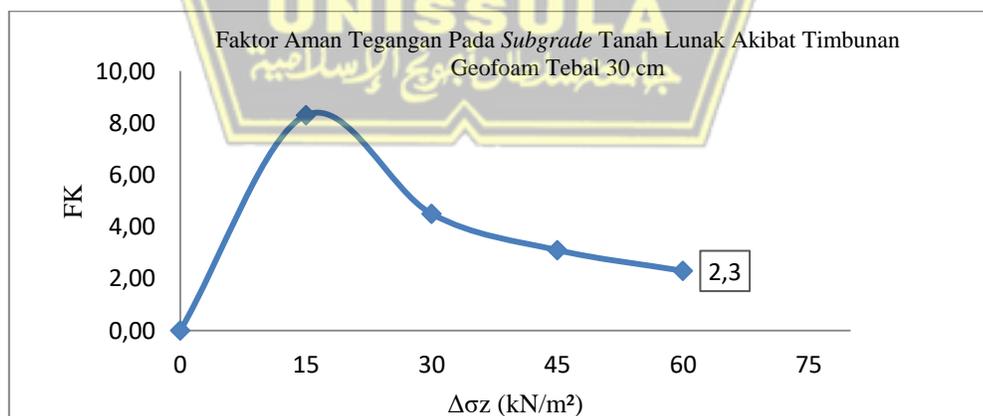


Gambar 5.28. Tegangan Akibat Beban Titik Pada *Subgrade* Tanah Lunak Tebal 60 cm Akibat Timbunan Dengan Geofilm Tebal 30 cm

Sumber: Hasil Penelitian

Tegangan maksimum akibat beban maksimum yang diberikan sebesar 20 kN pada timbunan dengan Geofilm tebal 30 cm yaitu 60 kN/m². Pada grafik terlihat semakin besar beban yang diberikan mengakibatkan tegangan yang diterima tanah dasar akan semakin besar.

Daya dukung tanah dasar berkaitan dengan faktor aman yaitu kemampuan tanah dasar memikul beban di atasnya. Hubungan tegangan pada tanah dasar dengan faktor aman (FK) akibat timbunan dengan Geofilm tebal 30 cm disajikan Gambar 5.29 berikut :



Gambar 5.29. Hubungan Tegangan Pada *Subgrade* Tanah Lunak Tebal 60 cm Dengan Faktor Aman (FK) Akibat Timbunan Dengan Geofilm Tebal 30 cm

Sumber: Hasil Penelitian

Pada Gambar terlihat bahwa semakin besar tegangan yang diterima oleh tanah dasar maka nilai faktor aman (FK) akan semakin kecil. Tegangan terbesar akibat timbunan dengan Geofom tebal 30 cm yaitu 60 kN/m² dengan faktor aman 2,3. Nilai yang diperoleh besar dari Faktor Keamanan (FK) yang disyaratkan yaitu 1,4 berdasarkan perancangan NCHRP Report 529 tahun 2004. Sehingga faktor aman yang dihasilkan masih memenuhi persyaratan faktor aman yang diberikan.

4. Geofom tebal 40 cm (kondisi kering)

$$S_u : 20,98 \text{ kN/m}^2$$

N_c : Diperoleh dari interpolasi data pada Tabel 2.17

$$\phi (X1) : 4, N_c (Y1) : 6,19$$

$$\phi (X2) : 5, N_c (Y2) : 6,49$$

$$\phi (X) : 4,551 N_c : Y$$

Rumus interpolasi :

$$Y = Y1 + \left[\frac{(X-X1)}{(X2-X1)} \right] (Y2 - Y1)$$

$$Y = 6,19 + \left[\frac{(4,551-4)}{(5-4)} \right] (6,49 - 6,19)$$

$$Y = 6,36$$

Sehingga nilai N_c diperoleh sebesar 6,35.

$$\gamma_b : 20,47 \text{ kN/m}^3$$

$$D_f : \text{Kedalaman timbunan} = 0,6 \text{ m}$$

$$q_u = S_u \cdot N_c + \gamma_b \cdot D_f \text{ (Rumus 2.4)}$$

$$\begin{aligned} q_u &= 20,98 \times 6,35 + 20,47 \times 0,6 \\ &= 145,51 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Untuk mendapatkan nilai *safety factor* (FK) maka (Rumus 2.5) :

$$FK = \frac{q_u}{q_a}$$

$q_a = S_n$ = tegangan normal yang diberikan timbunan pada permukaan tanah pada kedalaman 0 yang mampu dipikul oleh tanah.

Tanah dasar pada eksperimen ini memikul Geofom dan pelat beton, sehingga (Rumus 2.6) :

$$\begin{aligned}
 S_n \text{ Geofoam} &= \gamma_{\text{geofoam}} \times T_{\text{geofoam}} \\
 &= 0,216 \text{ kN/m}^3 \times 0,4 \text{ m} \\
 &= 0,086 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_n \text{ pelat beton} &= \gamma_{\text{pelat beton}} \times T_{\text{pelat beton}} \\
 &= 24 \text{ kN/m}^3 \times 0,1 \text{ m} \\
 &= 2,4 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Analisis tegangan yang terjadi dalam massa tanah (S_n) akibat beban titik (P) di permukaan berdasarkan teori Boussinesq (1885) maka dapat ditentukan (Rumus 2.7):

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_B$$

Q = Beban yang diberikan (0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN, 20 kN)

Z = kedalaman yang ditinjau (permukaan tanah dasar) : 0,5 m

I_B = Faktor pengaruh untuk beban titik (berdasarkan Gambar 2.19) = 0,48

Tegangan pada tanah yang terjadi akibat beban 5 kN adalah :

$$\begin{aligned}
 \Delta\sigma_z &= \frac{Q}{z^2} I_B \\
 &= \frac{5 \text{ kN}}{(0,5 \text{ m})^2} \cdot 0,48 \\
 &= 9,6 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Tegangan yang terjadi diatas tanah dasar akibat timbunan Geofoam tebal 20 cm beban 5 kN adalah :

$$\begin{aligned}
 q_a = S_n &= S_n \text{ Geofoam} + S_n \text{ pelat beton} + S_n \text{ beban titik} \\
 &= 0,086 \text{ kN/m}^2 + 2,4 \text{ kN/m}^2 + 9,6 \text{ kN/m}^2 \\
 &= 12,09 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Sehingga *safety factor* (FK) timbunan Geofoam tebal 20 cm beban 5 kN adalah :

$$FK = \frac{q_u}{q_a} > 1,4$$

$$FK = \frac{145,51 \text{ kN/m}^2}{12,09 \text{ kN/m}^2} = 12 > 1,4$$

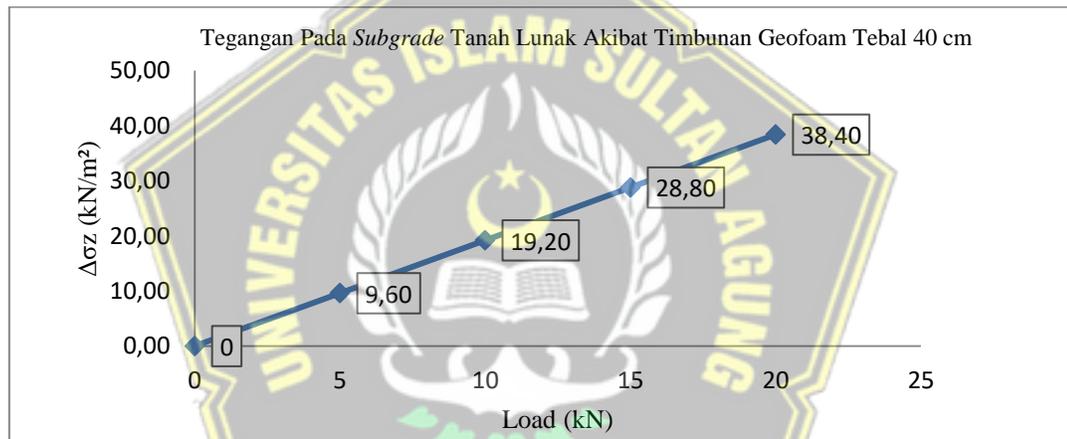
Untuk hasil perhitungan beban selanjutnya dapat dilihat pada Tabel berikut:

Tabel 5.16. Tegangan Akibat Beban Titik ($z = 0,5 \text{ m}$)

Beban (kN)	r	r/z	I_B	$\Delta\sigma_z$ (kN/m ²)	qa (kN/m ²)	FK
0	0	0	0,44	0	0	0
5	0	0	0,44	9,6	12,09	12
10	0	0	0,44	19,2	21,69	6,7
15	0	0	0,44	28,8	31,29	4,7
20	0	0	0,44	38,4	40,89	3,5

Sumber: Hasil Penelitian

Faktor aman yang terjadi pada beban maksimum 20 kN sebesar 3,5, nilai yang diperoleh besar dari Faktor Keamanan (FK) yang disyaratkan yaitu 1,4. Gambar 5.30 berikut menampilkan hubungan antara beban yang diberikan dan tegangan akibat beban titik pada tanah dasar akibat timbunan dengan Geofom tebal 40 cm :

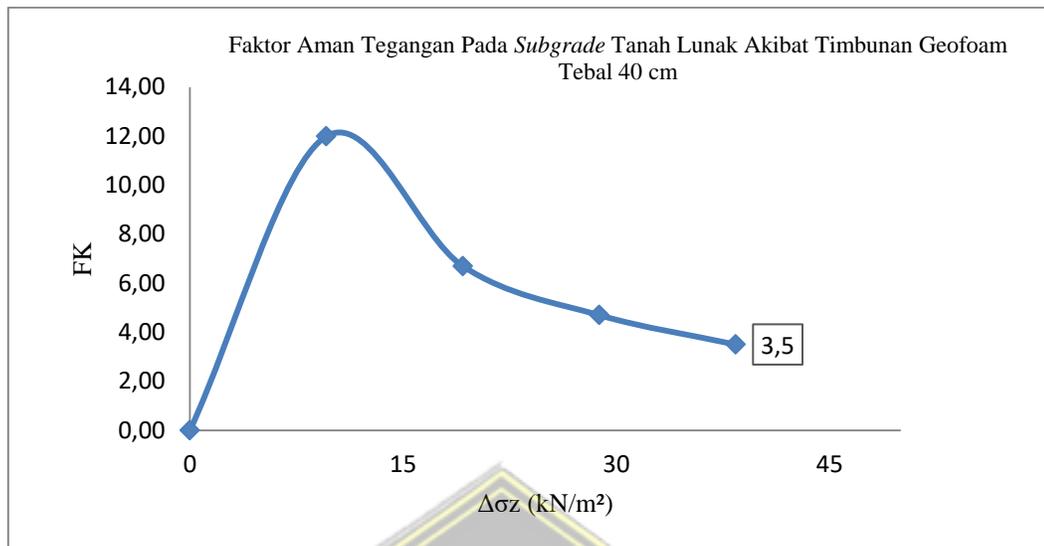


Gambar 5.30. Tegangan Akibat Beban Titik Pada *Subgrade* Tanah Lunak Tebal 60 cm Akibat Timbunan Dengan Geofom Tebal 40 cm

Sumber: Hasil Penelitian

Tegangan maksimum akibat beban maksimum yang diberikan sebesar 20 kN pada timbunan dengan Geofom tebal 40 cm yaitu 38,40 kN/m². Pada grafik terlihat semakin besar beban yang diberikan mengakibatkan tegangan yang diterima tanah dasar akan semakin besar.

Daya dukung tanah dasar berkaitan dengan faktor aman yaitu kemampuan tanah dasar memikul beban di atasnya. Hubungan tegangan pada tanah dasar dengan faktor aman (FK) akibat timbunan dengan Geofom tebal 40 cm disajikan Gambar 5.31 berikut :



Gambar 5.31. Hubungan Tegangan Pada *Subgrade* Tanah Lunak Tebal 60 cm Dengan Faktor Aman (FK) Akibat Timbunan Dengan Geofom Tebal 40 cm
Sumber: Hasil Penelitian

Pada Gambar terlihat bahwa semakin besar tegangan yang diterima oleh tanah dasar maka nilai faktor aman (FK) akan semakin kecil. Tegangan terbesar akibat timbunan dengan Geofom tebal 40 cm yaitu 38,4 kN/m² dengan faktor aman 3,5. Nilai yang diperoleh besar dari Faktor Keamanan (FK) yang disyaratkan yaitu 1,4 berdasarkan perancangan NCHRP Report 529 tahun 2004. Sehingga faktor aman yang dihasilkan masih memenuhi persyaratan faktor aman yang diberikan.

Kondisi tanah dasar dengan timbunan dengan Geofom akibat variasi tebal Geofom dan variasi beban yang diberikan menghasilkan tegangan pada tanah sebagai berikut :

Tabel 5.17. Tegangan Pada Tanah Akibat Penambahan Beban dan Variasi Tebal Geofom

Tebal Geofom (cm)	Tegangan pada tanah ($\Delta\sigma_z$) akibat Beban (kN/m ²)					FK Beban maksimum (20 kN)
	0 kN	5 kN	10 kN	15 kN	20 kN	
20	0	26,67	53,33	80	106,67	1,3
30	0	15	30	45	60	2,3
40	0	9,6	19,2	28,8	38,4	3,5

Sumber: Hasil Penelitian

Tebal Geofom mempengaruhi tegangan pada tanah dasar. Tegangan terkecil pada timbunan dengan Geofom tebal 40 cm pada beban maksimum 20 kN.

Gambar 5.32 di bawah menampilkan perbandingan tegangan pada tanah akibat beban titik yang diberikan dan variasi tebal Geofom.

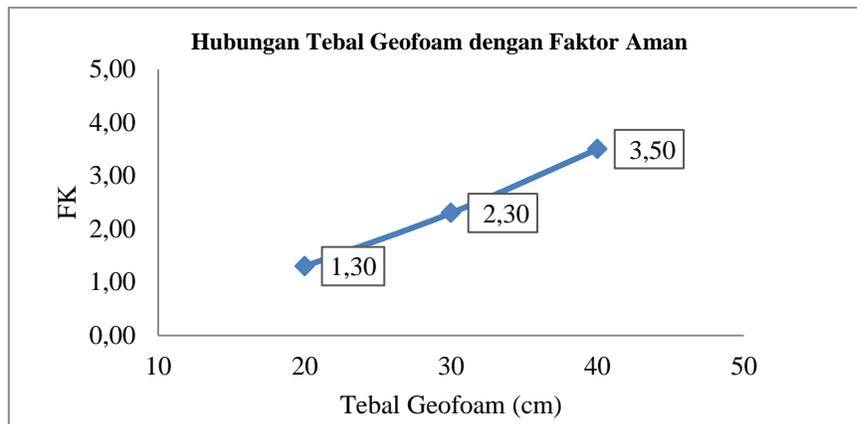


Gambar 5.32. Grafik Perbandingan Variasi Tebal Geofom dan Tegangan Pada *Subgrade* Tanah Lunak Tebal 60 cm

Sumber: Hasil Penelitian

Gambar di atas menampilkan bahwa semakin besar beban yang diterima tanah dasar maka tegangan yang terjadi pada tanah dasar akan semakin besar. Kondisi ini mengakibatkan kerusakan pada *subgrade* jalan apabila beban yang diterima tidak mampu dipikul oleh *subgrade*. Pada penelitian ini semakin tebal Geofom yang digunakan untuk timbunan tanah lunak mengakibatkan tegangan yang diterima oleh tanah dasar pada permukaannya akan semakin kecil.

Hubungan antara faktor aman (FK) terhadap variasi tebal Geofom akibat beban maksimum sebesar 20 kN disajikan Gambar 5.33 berikut :



Gambar 5.33. Grafik Perbandingan Variasi Tebal Geofom dan Faktor Aman (FK)

Akibat Beban Maksimum 20 kN

Sumber: Hasil Penelitian

Gambar di atas menampilkan bahwa tebal Geofom berpengaruh terhadap nilai faktor aman (FK) pada tanah dasar akibat beban yang diberikan. Hubungan antara tebal Geofom dan faktor aman (FK) berbanding lurus seiring bertambahnya tebal geofom (EL-Kady & Badrawi, 2014). Tebal Geofom meningkatkan nilai faktor aman (FK), nilai faktor aman (FK) yang dihasilkan hanya pada variasi tebal Geofom 30 cm dan 40 cm yang memenuhi persyaratan faktor aman (FK) berdasarkan perancangan NCHRP Report 529 tahun 2004 yaitu $> 1,4$. Geofom tebal 20 cm tidak memenuhi faktor aman yang disyaratkan perancangan NCHRP Report 529 tahun 2004 yaitu $> 1,4$, karena nilai yang diperoleh sebesar 1,3.

5.6 Pembahasan Hasil Penelitian

5.6.1 Pembahasan Hasil Eksperimen di Laboratorium

Berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukan di laboratorium dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Berdasarkan hasil eksperimen di laboratorium, Geofom sebagai pengganti timbunan pada tanah lunak dapat memperkecil terjadinya penurunan tanah apabila dibandingkan dengan tanah dasar tanpa menggunakan Geofom. Pada kondisi ini beban maksimum sebesar 20 kN yang diberikan pada eksperimen masih mampu dipikul oleh tanah pada timbunan dengan Geofom. Geofom

tebal 40 cm paling kecil menghasilkan nilai penurunan tanah saat diberikan beban maksimum sebesar 20 kN. Pengaruh Muka Air Tanah juga berpengaruh terhadap nilai penurunan tanah. Geofom dapat diperoleh sebagai pengganti timbunan, karena berdasarkan hasil eksperimen di laboratorium dapat memperkecil nilai penurunan tanah. Mengganti timbunan tanah dengan geofom secara signifikan mengurangi tekanan vertikal pada lapisan tanah sehingga mengurangi terjadinya timbunan (Anwar et al., 2019). Geofom merupakan material yang ringan sehingga dapat mengurangi berat yang dipikul tanah dasar, sebagai material timbunan yang ringan, Geofom dapat mereduksi beban yang dipikul oleh struktur timbunan (Sahrul R., 2024). Kondisi akibat perubahan Muka Air Tanah tinggi timbunan tanah lunak dengan Geofom sebagai pengganti timbunan adalah pada tebal Geofom 40 cm kondisi Muka Air Tanah pada pelat beton dengan beban maksimum sebesar 20 kN. Kelebihan Geofom yang memiliki densitas yang rendah yaitu 11,2 – 45,7 kg/m³ dan pengerjaan yang mudah karena berbentuk balok. Kelemahan dari Geofom yaitu karena tergolong material ringan sehingga mengakibatkan gaya angkat apabila terendam air maka solusinya dengan memberikan *subdrain* pada timbunan tanah lunak dengan Geofom.

2. Ketebalan Geofom dan tinggi muka air berpengaruh terhadap penurunan yang terjadi. Semakin tebal Geofom yang digunakan dengan muka air yang semakin tinggi, maka penurunan yang terjadi akan semakin kecil. Hal ini terjadi karena massa Geofom lebih kecil daripada air, sehingga pada saat Geofom ditekan maka air akan memberikan perlawanan dalam bentuk gaya ke atas (*uplift*). Persamaan yang diperoleh pada kondisi timbunan dengan Geofom tanpa MAT akibat beban maksimum 20 kN adalah $S = -0,1563 \cdot h_{gf} + 8,3417$, dimana S = penurunan tanah dan h_{gf} = tebal Geofom. Kondisi timbunan dengan Geofom pada kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) dengan beban maksimum 20 kN menghasilkan persamaan $S = -0,1773 \cdot h_{gf} + 9,7073$, dimana S = penurunan tanah dan h_{gf} = tebal Geofom. Kondisi timbunan dengan Geofom pada kondisi muka air di atas Geofom (pada pelat beton) dengan

beban maksimum 20 kN menghasilkan persamaan $S = 0,1836 \cdot h_{gf} + 13,277$ dimana S = penurunan tanah dan h_{gf} = tebal Geofom. Tekanan hidrostatik yang dilawan oleh material Geofom yang dipasang pada kondisi terendam air terhadap berat sendiri struktur dan beban yang diberikan menghasilkan struktur apung yang stabil. Tebal geofom yang ditambahkan sebagai timbunan di atas tanah lunak mampu untuk meningkatkan daya dukung dari konstruksi floating yang berada di permukaan air terhadap tekanan air vertikal dan tekanan air horizontal (Hendriksen, 2011).

3. Pengujian timbunan dengan Geofom kondisi kering menghasilkan penurunan yang lebih kecil dibandingkan dengan timbunan dengan Geofom dengan kondisi terendam air. Timbunan dengan Geofom kondisi kering menghasilkan nilai penurunan terkecil pada tebal Geofom 40 cm, tebal Geofom dapat meminimalisir terjadinya penurunan pada tanah. Timbunan Geofom dengan variasi level muka air menghasilkan penurunan terkecil pada kondisi muka air di atas Geofom (pada pelat beton) dengan tebal Geofom tebal 40 cm. Hal ini terjadi karena massa Geofom lebih besar daripada air, sehingga pada saat Geofom ditekan maka air akan memberikan perlawanan dalam bentuk gaya ke atas (*uplift*) (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Berat Geofom tebal 40 cm lebih besar dari tekanan ke atas sehingga memberi perlawanan akibat tekanan hidrostatik (Efendi, 2023).
4. Kondisi tinggi timbunan dengan Geofom yang berpotensi menyebabkan beban semakin besar sehingga dapat merusak *subgrade* adalah Geofom dengan tebal 20 cm menghasilkan faktor aman yang kecil, yaitu pada beban maksimum 20 kN menghasilkan penurunan sebesar 1,3. Nilai ini tidak memenuhi syarat berdasarkan perancangan NCHRP Report 529 tahun 2004 yaitu $> 1,4$. Hal ini disebabkan karena tebal Geofom yang tipis sehingga mengakibatkan tegangan yang terjadi pada tanah semakin besar.

5.6.2 Pembahasan Hasil Analisis Numerik

Berdasarkan hasil analisis berdasarkan numerik Plaxis 2023 versi 2D dan analisis menggunakan rumus dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Semakin tebal Geofom yang digunakan sebagai pengganti timbunan di atas tanah lunak maka penurunan tanah yang terjadi akan semakin kecil. Pengaruh level muka air juga mempengaruhi nilai penurunan tanah. Semakin tinggi level muka air tanah, mengakibatkan penurunan yang terjadi akan semakin kecil. Tinggi timbunan yang direkomendasikan berdasarkan hasil penelitian ini adalah tebal *subgrade* 60 cm dan tebal Geofom 40 cm. Hasil penurunan yang terjadi berdasarkan numerik nilainya hampir mendekati dengan pengujian di eksperimen. Geofom dapat diperoleh sebagai pengganti timbunan, karena berdasarkan hasil eksperimen di laboratorium dapat memperkecil nilai penurunan tanah. Mengganti timbunan tanah dengan geofom secara signifikan mengurangi tekanan vertikal pada lapisan tanah sehingga mengurangi terjadinya timbunan (Anwar et al., 2019). Geofom merupakan material yang ringan sehingga dapat mengurangi berat yang dipikul tanah dasar, sebagai material timbunan yang ringan, Geofom dapat mereduksi beban yang dipikul oleh struktur timbunan (Sahrul R., 2024).
2. Gaya angkat sangat berpengaruh terhadap tebal Geofom yang diberikan. Pada eksperimen diperoleh hasil semakin tinggi level muka air maka gaya angkat yang dihasilkan akan semakin besar. Tebal geofom yang ditambahkan sebagai timbunan di atas tanah lunak mampu untuk meningkatkan daya dukung dari konstruksi *floating* yang berada di permukaan air terhadap tekanan air vertikal dan tekanan air horizontal (Hendriksen, 2011). Persamaan gaya angkat akibat tebal Geofom kondisi muka air di bawah Geofom (permukaan *subgrade*) adalah $S_u = -0,0011 \cdot h_{gf} + 3,0415$, dimana S_u = gaya angkat dan h_{gf} = tebal Geofom. Persamaan gaya angkat akibat tebal Geofom kondisi muka air di atas Geofom (pada pelat beton) adalah $S_u = 0,1836 \cdot h_{gf} + 13,277$, dimana S_u = gaya angkat dan h_{gf} = tebal Geofom.
3. Perhitungan daya dukung tanah dasar pada penelitian ini berdasarkan Terzhagi dan analisis tegangan yang terjadi dalam massa tanah (S_n) akibat beban titik (P) di permukaan berdasarkan teori Boussinesq (1885) menghasilkan nilai tegangan yang besar pada beban maksimum yang diberikan yaitu beban 20 kN. Semakin

besar beban yang diterima tanah dasar maka tegangan yang terjadi pada tanah dasar akan semakin besar. Kondisi ini mengakibatkan kerusakan pada *subgrade* jalan apabila beban yang diterima tidak mampu dipikul oleh *subgrade*. Pada penelitian ini semakin tebal Geofom yang digunakan untuk timbunan tanah lunak mengakibatkan tegangan yang diterima oleh tanah dasar pada permukaannya akan semakin kecil.

4. Tebal Geofom berpengaruh terhadap nilai faktor aman (FK) pada tanah dasar akibat beban yang diberikan. Peningkatan tebal Geofom yang digunakan sebagai timbunan pada tanah lunak menghasilkan peningkatan faktor aman (FK). Nilai faktor aman (FK) yang dihasilkan pada semua variasi tebal Geofom memenuhi persyaratan faktor aman (FK) berdasarkan perancangan NCHRP Report 529 tahun 2004 yaitu $> 1,4$. Berdasarkan eksperimen yang dilakukan tebal Geofom yang memenuhi persyaratan faktor aman adalah Geofom tebal 30 cm dan 40 cm. Geofom tebal 20 cm memiliki tebal yang tipis, sehingga menghasilkan nilai tegangan tanah yang besar akibat beban yang diberikan. Pada kondisi ini tegangan maksimum akibat beban 20 kN adalah sebesar 106,67 kN/m². Semakin besar beban yang diberikan berpotensi dapat merusak *subgrade*. Ketebalan Geofom efektif sebagai timbunan yang dibebani karena peningkatan faktor aman (EL-Kady & Badrawi, 2014).

5.7 Perbandingan Dengan Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian yang diperoleh dibandingkan dengan hasil penelitian terdahulu, dengan perbandingan yang diperoleh sebagai berikut :

- a. Timbunan dengan Geofom memperkecil terjadinya penurunan tanah. Artinya Geofom dapat mengurangi penurunan tanah, hal ini sesuai dengan penelitian (Anwar et al., 2019) timbunan dengan Geofom dapat mengurangi penurunan tanah sebesar 40% dan 54%, dengan dua blok Geofom ukuran 1,0 x 1,0 x 0,25 untuk lapisan atas dan 1,2 x 1,0 x 0,25 untuk lapisan bawah. Pada penelitian ini timbunan dengan timbunan Geofom tebal 20 cm tanpa MAT dapat mengurangi terjadinya penurunan pada tanah sebesar 81,37%, tebal 30 cm sebesar 88,93%,

tebal 40 cm tanpa MAT sebesar 91,06% jika dibandingkan tanpa Geofom, disajikan Gambar 5.34.



Gambar 5.34. Grafik Perbandingan Penurunan Timbunan Geofom dengan Penelitian Terdahulu

Sumber: Hasil Penelitian

- b. Penelitian (Sahrul R., 2024) dengan tebal tanah lunak 6 m dan tebal Geofom EPS 22 yaitu 1 m dengan beban merata sebesar 15 kN/m^2 menghasilkan penurunan sebesar $0,333240 \text{ m}$, pada penelitian ini dengan tebal Geofom 40 cm menghasilkan penurunan akibat beban vertikal 20 kN sebesar $2,303 \times 10^{-3} \text{ m}$. Pada penelitian ini timbunan dengan timbunan Geofom tebal 20 cm tanpa MAT dapat mengurangi terjadinya penurunan pada tanah sebesar 81,37%, tebal 30 cm sebesar 88,93%, tebal 40 cm tanpa MAT sebesar 91,06% jika dibandingkan tanpa Geofom.
- c. Penelitian (Ahmed Alkaissi, 2024) melakukan penelitian timbunan tanah lunak tebal 400 cm dan tebal Geofom 12 cm dan ditutup lapisan aspal tebal 5 cm diberi beban sebesar 18 kN berdasarkan hasilnya terjadi penurunan 20 mm dan dapat mereduksi penurunan sebesar 83%. Pada penelitian ini timbunan dengan timbunan Geofom tebal 20 cm tanpa MAT dapat mengurangi terjadinya penurunan pada tanah sebesar 81,37%, tebal 30 cm sebesar 88,93%, tebal 40 cm tanpa MAT sebesar 91,06% jika dibandingkan tanpa Geofom

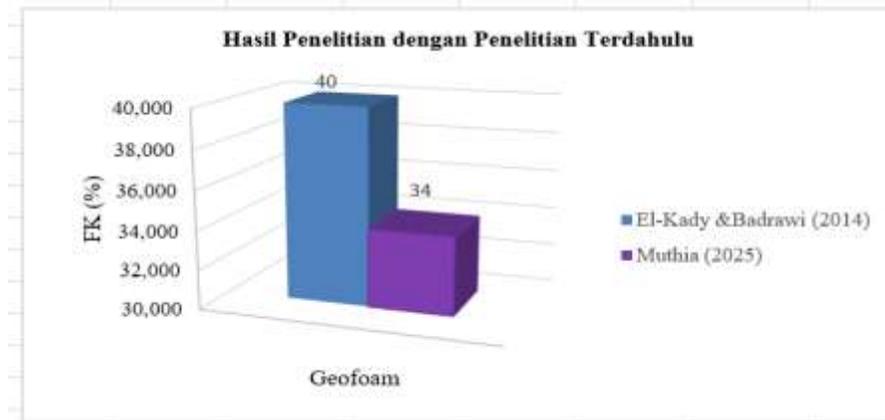
- d. Penelitian (Zianal et al., 2022) dengan model tanah lunak tebal 8 m, tebal Geofom EPS 22 4 m, dan beban merata 15 kN/m² terjadi penurunan sebesar 2,06 mm. Pada penelitian ini dengan tebal Geofom tertinggi yaitu 40 cm dan tebal tanah lunak 60 cm dengan beban maksimum beban vertikal 20 kN, terjadi penurunan sebesar 2,303 mm. Seperti Gambar 5.35 berikut :



Gambar 5.35. Grafik Perbandingan Penurunan Timbunan Geofom dengan Penelitian Terdahulu Akibat Beban Vertikal

Sumber: Hasil Penelitian

- e. Penelitian (Khalaj et al., 2019) menganalisis ketebalan Geofom tidak boleh lebih kecil dari 200 mm ketika ketebalan tanah 400 mm, karena menyebabkan penurunan besar dengan jumlah beban yang tidak signifikan dan menyebabkan kegagalan permukaan perkerasan. Berdasarkan penelitian ini dengan tebal tanah 600 mm tebal yang menghasilkan penurunan lebih kecil yaitu pada tebal Geofom 400 mm.
- f. Penelitian (EL-Kady & Badrawi, 2014) menganalisis peningkatan ketebalan Geofom dari 1 m – 4 m, hasil yang diperoleh faktor keamanan konstan sekitar 2,10. Peningkatan faktor keamanan terjadi akibat peningkatan ketebalan Geofom. Ketebalan Geofom terbukti efektif untuk lereng yang dibebani karena terjadi peningkatan faktor keamanan sekitar 40%. Pada penelitian hasil faktor keamanan akibat tebal Geofom 0,2 m – 0,4 m naik konstan sekitar 1,2. Terjadi peningkatan akibat peningkatan ketebalan terhadap faktor aman sekitar 34%. Seperti Gambar 5.36



Gambar 5.36. Grafik Perbandingan Faktor Aman Timbunan Geofoam dengan Penelitian Terdahulu

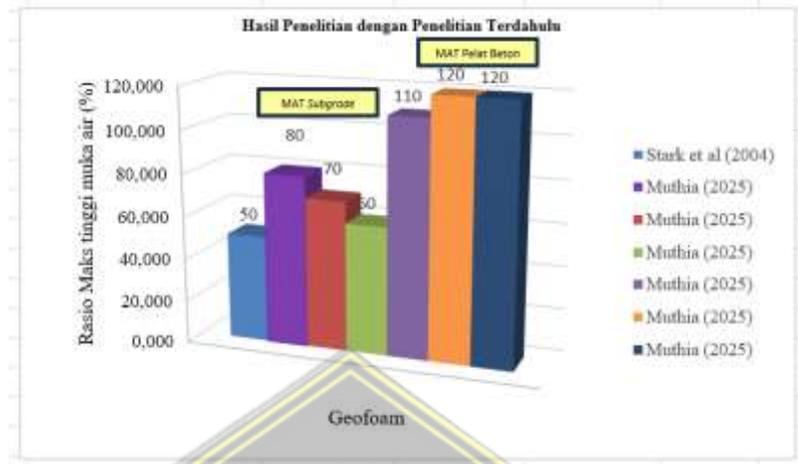
Sumber: Hasil Penelitian

- g. Penggunaan Geofoam sebagai timbunan di atas tanah lunak dengan kondisi terendam air menghasilkan tekanan hidrostatis. Berat jenis Geofoam yang sangat ringan (berkisar antara 11,2 – 45,7 kg/m³). Tekanan hidrostatis yang dilawan oleh material Geofoam yang dipasang pada kondisi terendam air terhadap berat sendiri struktur dan beban yang diberikan menghasilkan struktur apung yang stabil. Tebal geofoam yang ditambahkan sebagai timbunan di atas tanah lunak mampu untuk meningkatkan daya dukung dari konstruksi floating yang berada di permukaan air terhadap tekanan air vertikal dan tekanan air horizontal (Hendriksen, 2011). Pada penelitian ini Level Muka Air Tanah (MAT) mempengaruhi nilai gaya angkat yang dihasilkan. Semakin tinggi level Muka Air Tanah maka nilai gaya angkat yang dihasilkan juga semakin besar. Muka Air Tanah pada pelat beton menghasilkan nilai gaya angkat yang besar dibandingkan pada *subgrade*.
- h. Ketinggian air yang terakumulasi adalah total kedalaman air termasuk perkiraan total penurunan yaitu $h + S_{total}$ (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Berdasarkan penelitian rasio tinggi maksimum tinggi muka air yang terakumulasi terhadap tinggi timbunan sebesar 0,5 m, artinya total kedalaman air yang mencakup perkiraan penurunan total dibatasi hingga 50% dari tinggi timbunan, karena timbunan dengan tingkat akumulasi air yang tinggi memerlukan gaya

overburden yang tidak masuk akal di atas Geofom untuk mendapatkan faktor keamanan yang diinginkan (Stark, Arellano, Horvarth, et al., 2004). Pada penelitian ini untuk Geofom tebal 20 cm pada MAT di *subgrade* akibat beban maksimum menghasilkan $S_{total} 16,296 \times 10^{-3}$ m, dengan rasio maksimum tinggi muka air yang terakumulasi terhadap tinggi timbunan sebesar 0,8 m $((h + S_{total})/H = (0,6+0,016296)/0,8 = 0,8$ m), yaitu total kedalaman air yang mencakup perkiraan penurunan total dibatasi hingga 80% dari tinggi timbunan. Geofom tebal 30 cm menghasilkan $S_{total} 12,690 \times 10^{-3}$ m dengan rasio maksimum tinggi muka air yang terakumulasi terhadap tinggi timbunan sebesar 0,7 m, yaitu total kedalaman air yang mencakup perkiraan penurunan total dibatasi hingga 70% dari tinggi timbunan. Geofom tebal 40 cm menghasilkan $S_{total} 12,024 \times 10^{-3}$ m dengan rasio maksimum tinggi muka air yang terakumulasi terhadap tinggi timbunan sebesar 0,6 m, yaitu total kedalaman air yang mencakup perkiraan penurunan total dibatasi hingga 60% dari tinggi timbunan.

- i. Pada penelitian ini untuk Geofom tebal 20 cm pada MAT di pelat beton akibat beban maksimum menghasilkan $S_{total} 15,960 \times 10^{-3}$ m, dengan rasio maksimum tinggi muka air yang terakumulasi terhadap tinggi timbunan sebesar 1,1 m $((h + S_{total})/H = (0,85 + 0,015960)/0,8 = 1,1$ m), yaitu total kedalaman air yang mencakup perkiraan penurunan total dibatasi hingga 110% dari tinggi timbunan. Geofom tebal 30 cm menghasilkan $S_{total} 12,540 \times 10^{-3}$ m dengan rasio maksimum tinggi muka air yang terakumulasi terhadap tinggi timbunan sebesar 1,2 m, yaitu total kedalaman air yang mencakup perkiraan penurunan total dibatasi hingga 120% dari tinggi timbunan. Geofom tebal 40 cm menghasilkan $S_{total} 11,767 \times 10^{-3}$ m dengan rasio maksimum tinggi muka air yang terakumulasi terhadap tinggi timbunan sebesar 1,2 m, yaitu total kedalaman air yang mencakup perkiraan penurunan total dibatasi hingga 120%. Berdasarkan penelitian rasio tinggi maksimum tinggi muka air yang terakumulasi terhadap tinggi timbunan sebesar 0,5 m, artinya total kedalaman air yang mencakup perkiraan penurunan total dibatasi hingga 50% dari tinggi timbunan, karena timbunan dengan tingkat akumulasi air yang tinggi memerlukan gaya *overburden*

yang tidak masuk akal di atas Geofom untuk mendapatkan faktor keamanan yang diinginkan (Stark, Arellano, Horvath, et al., 2004). Seperti Gambar 5.37 berikut :



Gambar 5.37. Grafik Perbandingan Rasio Maksimum Tinggi Muka Air Timbunan Geofom dengan Penelitian Terdahulu
Sumber: Hasil Penelitian



BAB VI

KESIMPULAN, IMPLEMENTASI DAN REKOMENDASI

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan yang merupakan bagian dari prosedur penelitian, sehingga hasil penelitian dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Tebal Geofom yang digunakan sebagai pengganti timbunan pada *subgrade* tanah lunak yang menghasilkan penurunan terkecil akibat pembebanan dan perubahan level muka air adalah pada tebal tanah dasar 60 cm dan 40 cm untuk tebal Geofom dengan beban maksimum yang diberikan adalah 20 kN pada kondisi kering. Kondisi akibat perubahan level muka air tinggi timbunan tanah lunak dengan Geofom sebagai pengganti timbunan adalah pada tebal Geofom 40 cm kondisi muka air di atas Geofom (pada pelat beton) dengan beban maksimum sebesar 20 kN.
2. Persamaan matematika timbunan dengan Geofom pada *subgrade* tanah lunak pada saat kondisi kering dan kondisi terendam air adalah untuk kondisi kinerja penurunan tanah lunak dengan Geofom kondisi kering yaitu semakin tebal Geofom yang digunakan akibat beban maksimum yang diberikan sebesar 20 kN maka penurunan tanah yang terjadi semakin kecil. Penggunaan Geofom sebagai pengganti timbunan pada kondisi kering Tanah dapat meminimalisir terjadinya penurunan tanah. Persamaan matematika yang diperoleh pada kondisi timbunan dengan Geofom kondisi kering akibat beban maksimum 20 kN adalah $S = -0,1563 \cdot h_{gf} + 8,3417$, dimana S = penurunan tanah dan h_{gf} = tebal Geofom. Kondisi Muka Air Tanah sangat mempengaruhi kinerja timbunan di atas tanah lunak yaitu semakin tinggi level muka air maka penurunan tanah akan semakin kecil. Kondisi timbunan dengan Geofom pada Muka Air Tanah pada *subgrade* dengan beban maksimum 20 kN menghasilkan persamaan $S = -0,1773 \cdot h_{gf} + 9,7073$, dimana S = penurunan tanah dan h_{gf} = tebal Geofom. Kondisi

timbunan dengan Geofom pada Muka Air Tanah pada pelat beton dengan beban maksimum 20 kN menghasilkan persamaan matematika $S = -0,1739 \cdot h_{gf} + 9,5365$, dimana S = penurunan tanah dan h_{gf} = tebal Geofom.

3. Gaya angkat yang terjadi akibat variasi tebal Geofom pada *subgrade* tanah lunak dan persamaan matematika yang dihasilkan yaitu Semakin tinggi level muka air maka nilai gaya angkat yang dihasilkan juga semakin besar. Penggunaan Geofom sebagai timbunan di atas tanah lunak dengan kondisi terendam air menghasilkan tekanan hidrostatik. Persamaan matematika gaya angkat akibat tebal Geofom kondisi muka air di bawah Geofom (perukaan *subgrade*) adalah $S_u = -0,0011 \cdot h_{gf} + 3,0415$, dimana S_u = gaya angkat dan h_{gf} = tebal Geofom. Persamaan gaya angkat akibat tebal Geofom kondisi muka air di atas Geofom (pada pelat beton) adalah $S_u = 0,1836 \cdot h_{gf} + 13,277$, dimana S_u = gaya angkat dan h_{gf} = tebal Geofom.
4. Perilaku *subgrade* tanah lunak dengan menggunakan timbunan Geofom terhadap faktor aman yang diakibatkan beban yang semakin besar dapat merusak *subgrade* adalah semakin besar beban yang diterima tanah dasar maka tegangan yang terjadi pada *subgrade* tanah lunak akan semakin besar. Kondisi ini mengakibatkan kerusakan pada *subgrade* jalan apabila beban yang diterima tidak mampu dipikul oleh *subgrade*. Beban maksimum pada penelitian ini yaitu 20 kN masih menghasilkan nilai faktor aman (FK) yang memenuhi persyaratan yaitu $> 1,4$ pada variasi Geofom 30 cm, dan 40 cm. Timbunan dengan Geofom tebal 40 cm menghasilkan faktor aman (FK) yang paling besar, sehingga dengan menggunakan timbunan dengan Geofom tebal 40 cm tanah dasar masih mampu memikul beban yang ada di atasnya. Timbunan dengan Geofom tebal 20 cm menghasilkan faktor aman (FK) $< 1,4$, sehingga tebal Geofom 20 cm tidak direkomendasikan digunakan sebagai pengganti timbunan pada *subgrade* tanah lunak.

6.2 Implementasi Hasil Penelitian

Implementasi dari penelitian yang telah dilakukan ini dapat digunakan pada perencanaan jalan di atas tanah lunak dengan timbunan Geofom karena dapat mengurangi berat timbunan. Selain itu bisa diaplikasikan pada pekerjaan timbunan tanah dimana memudahkan pelaksanaan di lapangan karena Geofom berbentuk balok dan mudah disusun.

6.3 Saran dan Rekomendasi

Saran yang diberikan untuk aplikasi hasil penelitian dan untuk penelitian berikutnya yang berkaitan dengan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Pada penelitian selanjutnya yang berhubungan dengan timbunan dengan Geofom di atas tanah lunak perlu melakukan eksperimen dengan beban yang diberikan di atas 20 kN, sehingga dapat terlihat beban maksimum yang dapat dipikul tanah dasar akibat variasi tebal Geofom yang diberikan.
2. Membuat *subdrain* timbunan dengan Geofom di bawah tanah dasar agar air tidak naik ke atas dan Geofom tidak terapung.
3. Menambah variasi tebal Geofom yang digunakan sebagai pengganti timbunan pada tanah lunak dan mempertimbangkan gaya horizontal yang bekerja akibat tekanan air dari samping kiri atau kanan.
4. Melakukan eksperimen skala lapangan untuk mendapatkan kondisi aktual ketika dilaksanakan dalam kondisi sebenarnya, sehingga data kondisi sebenarnya dapat diperoleh dengan baik.

BAB VII

DAFTAR PUSTAKA

- Aab, R., Bartlett, S. F., Du, M., Frydenlund, T. E., Mandal, J. N., Negusse, D., Ö, A. T., Tsukamoto, H., & Vaslestad, J. (2019). Geofom Blocks in Construction Applications. *5th International Conference on Geofom Blocks in Construction Applications*, 3–38.
- Ahmed Alkaissi, Z. (2024). Enhancement of Roadway Embankment Using Geofom Blocks and Cement Columns: Application of Three-Dimensional Plaxis Program. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 28(6), 809–814. <https://doi.org/10.31272/jeasd.28.6.14>
- Akay, O., Özer, A. T., Fox, G. A., Bartlett, S. F., & Arellano, D. (2013). Behavior of Sandy Slopes Remediated by EPS-Block Geofom Under Seepage flow. *Geotextiles and Geomembranes*, 37, 81–98. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.02.005>
- Allowenda, A., Priadi, E., & Aprianto. (2018). Analisa Modulus Elastisitas Dalam Memprediksi Besarnya Keruntuhan Lateral Dinding Penahan Tanah Pada Tanah Lunak. *Universitas Tanjungpura*, 5. <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/JMHMS/article/view/26616>
- Amran, Y., & Surandono, A. (2017). Analisa Daya Dukung Tanah (DDT) Pada Subgrade / Tanah Dasar (Studi Kasus Ruas Jalan Ki Hajar Dewantara, 38 B Banjar Rejo Lampung Timur-Batas Kota Metro). *TAPAK (Teknologi Aplikasi Konstruksi) ...*, 7(1), 1–6. <https://ojs.ummetro.ac.id/index.php/tapak/article/view/569>
- Anggraini, M., & Saleh, A. (2022). Kuat Geser Tanah Lempung Dengan Abu Tandan Sawit dan Semen. *Jurnal SAINSTEK*, 10(1), 24–31.
- Anjani, A. A., Lukman, H., & Budiono, B. (2021). Analisis Perbaikan Daya Dukung Tanah Lunak Dengan Metode Stone Column. *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Teknik Sipil*, 1–15. <https://jom.unpak.ac.id/index.php/tekniksipil/article/view/1812>
- Anwar, M. B., Abdelsalam, S. S., & Eskander, S. S. (2019). Use of Eps for Roadway Embankments on Soft Soils. *Deep Foundations Institute*, October.
- ASTM, A. (n.d.). ASTM D6817 - 07 2009. In *Standard Specification for Rigid Cellular Polystyrene Geofom* ASTM International.
- Ayeh, A. I., & Alam, S. (2021). Effect of EPS Geofom on Retaining Wall Subjected

to Seismic Forces. *PACE-2021 International Congress on the Phenomenological Aspects of Ciivl Engineering, June, 1–7.*

- Azmy, Y. M., Surendro, B., & Amin, M. (2018). Studi Kepadatan Tanah Untuk Tanah Lempung Berpasir. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur Sipil, 3*(1).
- Bowles, J. E. (1984). *Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah) (Kedua)*. Erlangga.
- Carvajal, E., & Romana, M. (2013). Analysis of the influence of soft soil depth on the subgrade capacity for flexible. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1249–1253.*
- Cui, K. (2018). Virtual Reality Research of the Dynamic Characteristics of Soft Soil Under Metro Vibration Loads Based on BP Neural Networks. *Neural Computing and Applications, 29*(5), 1233–1242.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2016). Sni 1725-2016. In *Badan Standarisasi Nasional* (pp. 1–67). BNS.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2020). Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2). In *Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat* (Issue Oktober, p. 1036).
- Efendi, A. W. (2023). The Settlement Behavior Using Replacement Embankment with Mortar Foam and Geofoam using LISA FEA. *Nusantara Civil Engineering Journal, 2*(02), 75–89. <https://doi.org/10.32487/nuce.v2i02.484>
- Ekawati, A., Muhardi, & Fatnanta, F. (2011). Perbaikan tanah lunak dengan metoda kolom dari campuran fly ash dan bottom ash. *Fakultas Teknik Universitas Pasir Pengaraian, 1*, 1–9.
- EL-Kady, M., & Badrawi, E. (2014). Effect of Geofoam on Slope Stabilizing. *The International Conference on Civil and Architecture Engineering, 10*(10), 1–11. <https://doi.org/10.21608/iccae.2014.44094>
- Gultom, J. (2022). Konstruksi Jalan Raya Perancangan dan Pembangunan Jalan di Atas Tanah Lunak. In *Ruas Media*. Ruas Media. <https://www.amazon.com/Spotify/product-reviews/B07FK56GVY>
- Gultom, J., Pratikso, & Rochim, A. (2022). Floating Road Construction on Soft Soil. *ICCDA 4, 955*(1).
- Gultom, J., Royani, E., & W, A. P. (2023). *The Law Policy Management For Road Construction and Settlement in the Soft Land of the Capital City of the Republic of Indonesia* (Issue 1). LAP LAMBERT Academic Publishing.
- Gunawan, A. (2020). Geofoam: A potential for Indonesia’s soil problem. *IOP*

- Conference Series: Earth and Environmental Science*, 426(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/426/1/012004>
- Gunawan, A. (2020). Geofoam: A potential for Indonesia's soil problem. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 426(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/426/1/012004>
- Gunawan, A. (2021). Geofoam: A potential for Indonesia's soil problem II. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 794(1).
- Gunawan, A. (2022). Geofoam: A potential for Indonesia's soil problem III - Stabilizing retaining wall. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 998(1), 1–8.
- Gunawan, A. (2024). Geofoam: A potential for Indonesia's soil problem IV - Update on Geofoam Application. *The 7th International Conference on Eco Engineering Development 2023 (ICEED 2023)*, 1324(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1324/1/012028>
- Hamdhan, I. N., & Iskandar, F. F. (2019). Analisis Perkuatan Timbunan Di Atas Tanah Lunak Menggunakan Dinding Turap dengan Pendekatan Model Numerik. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 25(1), 48.
<https://doi.org/10.14710/mkts.v25i1.18006>
- Hardiyatmo, C. H. (2019). *Mekanika Tanah 1*. Gadjah Mada University Press.
- Hasanpouri Notash, N., & Dabiri, R. (2018). Effects of Geofoam Panels on Static Behavior of Cantilever Retaining Wall. *Advances in Civil Engineering*, 2018.
<https://doi.org/10.1155/2018/2942689>
- Hendriksen, R. (2011). The Floating Construction Method. In *A New Method of Constructing Submerged and Floating Structure* (p. 269). Delft University of Technology.
- Hidayat, D., Purwana, Y. M., & Pramesti, F. P. (2016). Analisis Material Ringan Dengan Mortar Busa Pada Konstruksi Timbunan Jalan. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi 2016, November*, 1–10.
- Hidayat, I., & Suhendra, A. (2011). Aplikasi Geofoam Sebagai Material Timbunan di Atas Tanah Lunak. *Comtech*, 2(9), 106–116.
- Ikizler, S. B., Aytakin, M., Vekli, M., & Kocabaş, F. (2010). Prediction of Swelling Pressures of Expansive Soils using Artificial Neural Networks. *Advances in Engineering Software*, 41(4), 647–655.
<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.12.005>
- Janbu, N., Bjerrum, L., & Kjaernsli, B. (1956). *Veiledning Ved Loasning av Fundamentering Soppgaver*. Norwegian Geotechnical Institute.

- Jayanthi, V., Soundara, B., Sanjaikumar, S. M., Siddharth, M. A., Shree, S. D., & Ragavi, S. P. (2022). Influencing Parameters on experimental and theoretical analysis of geocell reinforced soil. *International Conference on Thermal Analysis and Energy Systems 2021*, 66, 1148–1155.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.951>
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga. (2017). Manual Desain Perkerasan Jalan No.02/M/BM/2017. In *Manual Desain Perkerasan Jalan No.02/M/BM/2017* (kedua, Issue 02, p. 239). kementerian Pekerjaan Umum & Perumahan Rakyat - Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Khalaj, O., Siabli, S. M. A. G., Tafreshi, S. N. M., & Jirkova, H. (2019). Performance Evaluation of Pavements Constructed on EPS Geofom Backfill Using Repeated Plate Load. *WMESS 2018*, 221(1).
- Khan, M. I., & Meguid, M. A. (2021). Evaluating the Role of Geofom Properties in Reducing Lateral Loads on Retaining Walls : A Numerical Study. *Journal of Sustainability*, 13, 1–17.
- Kozłowski, M., & Kadela, M. (2018). Mechanical Characterization of Lightweight Foamed Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.
<https://doi.org/10.1155/2018/6801258>
- Laksono, M. Y. (2023). *Mengenal Geofom EPS , Teknologi Khusus yang Digunakan di Tol Cisumdawu*.
<https://www.kompas.com/properti/read/2023/05/28/133000321/mengenal-geofom-eps-teknologi-khusus-yang-digunakan-di-tol-cisumdawu>.
- Lin, L.-K., Chen, L.-H., & Chen, R. H. L. (2010). Evaluation of Geofom as a Geotechnical Construction Material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(2), 160–170.
- M.Das, B. (2010). Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis). In *Penerbit Erlangga* (Jilid 1). Erlangga.
- Maleska, T., Nowacka, J., & Beben, D. (2019). Application of EPS Geofom to a Soil–Steel Bridge to Reduce Seismic Excitations. *Geosciences (Switzerland)*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/geosciences9100448>
- Mamat, R. C., Kasa, A., & Razali, S. F. M. (2019). A review of Road Embankment Stability on Soft Ground: Problems and Future Perspective. *IJUM Engineering Journal*, 20(2), 32–56. <https://doi.org/10.31436/ijumej.v20i2.996>
- Maulana, A., Mochtar, N. E., & Kumalasari, P. T. (2020). Alternatif Perencanaan Timbunan dan Perbaikan Tanah Dasar pada Jalan Tol Krian-Legundi-Bunder-Manyar (STA 12+434 s/d STA 12+684). *Jurnal Teknik ITS*, 8(2), 2–9.

- Meguid, M. A., & Khan, M. I. (2019). On the Role of Geofoam Density on the Interface Shear Behavior of Composite Geosystems. *International Journal of Geo-Engineering*, 10(1), 12–22. <https://doi.org/10.1186/s40703-019-0103-9>
- Mirsayapov, I. T., & Sharaf, H. M. A. (2020). Experimental Studies of Bearing Capacity and Settlement of Foundations on Clays Under Regime Block Cyclic Loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 890(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012134>
- Neto, J. O. A. (2021). Instrumented Load Tests and Layered Elastic Theory Analysis of a Large-Scale EPS Block Embankment. *Transportation Geotechnics*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100442>
- Özer, A. T., Akay, O., & Ates, Y. (2016). Shear strength properties of interlocked EPS-block geofoam – Ottawa sand interface. *4 Th International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1972(June), 1–8.
- Özer, A. T., & Akmay, E. (2019). Firts Geofoam Roadway Embankment Application in Turkey. *5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications, April 2017*, 71–80.
- Panjaitan, N. (2017). Pengaruh Kapur Terhadap Kuat Geser Tanah Lempung. *Jurnal Education Building*, 3, 1–7.
- Puppala, A. J., Chittoori, B., Yenigalla, R., & Archeewa, E. (2013). Settlement Mitigation Using Light Weight Fill Embankment Systems. *Geo-Congress 2013*, 581–591. <https://doi.org/10.1061/9780784412770.039>
- Puppala, A. J., Ruttanaporamakul, P., & Congress, S. S. C. (2019). Design and Construction of Lightweight EPS Geofoam Embedded Geomaterial Embankment System For Control of Settlement. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(3), 295–305.
- Pusat Litbang Prasarana Transportasi. (2001). Timbunan Jalan pada Tanah Lunak. In *Panduan Geoteknik 4 Desain dan Konstruksi* (pp. 15–27).
- Rahardjo, P. P., Anggoro, B. W., Wijaya, M., & Seourin, D. P. (2023). *Eps-block Geofoam Material Timbunan Ringan Untuk Mengatasi Kondisi Tanah Bermasalah Studi Kasus STA 40 Jalan Tol Cisumdawu*.
- Rahardjo, P. P., Anggoro, B. W., Wijaya, M., & Seourin, D. P. (2023). EPS-Geofoam as Lightweight Material for Replacement of Embankment Fill to Overcome Landslide Problems at STA 40+200 of Cisumdawu Toll Road, West Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1249(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1249/1/012001>
- Sahrul R., M. (2024). Numerical Modeling of Soil Embankment on Soft Soil Using

- Variation of Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam Material Type. *Sustainable Civil Building Management and Engineering Journal*, 1(4), 8.
<https://doi.org/10.47134/scbmej.v1i4.2871>
- Setiawan, L. C., Sentosa, G. S., & Iskandar, A. (2018). Analisis Stabilitas Lereng Batuan Dengan Metode Perkuatan Ground Anchor & Soil Nailing Di Labuan Bajo, NTT. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 1(1), 102.
<https://doi.org/10.24912/jmts.v1i1.2247>
- Shafikhani, A., Bheemasetti, T. V., & Puppala, A. J. (2017). Effect of Seasonal Changes on a Hybrid Soil Geofoam Embankment System. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 3(4).
- Sihotang, A. J., & Iskandar, I. R. (2014). Analisis Hubungan Berat Isi Kering Maksimum Dan Kadar Air Optimum Berdasarkan Batas Plastis Dan Batas Cair. *Hasil Riset*, 1–10.
- Siska, H. N., & Yakin, Y. A. (2016). Karakterisasi Sifat Fisis dan Mekanis Tanah Lunak di Gedebage. *Online Institut Teknologi Itenas*, 2(4), 44–55.
- Srivastava, D. K., Srivastava, A., Misra, A. K., & Sahu, V. (2018). Sustainability Assessment of EPS Geofoam in Road Construction: a Case Study. *International Journal of Sustainable Engineering*, 12(5).
- Stark, T. D., Arellano, D., Horvarth, J. S., & Leshcinsky, D. (2004). Guideline and Recommended Standard for Geofoam Applications in Highway Embankments. In *National Cooperative Highway Research Program Reporty 529*.
<https://doi.org/10.17226/13759>
- Stark, T. D., Arellano, D., Horvath, J. S., & Leshcinsky, D. (2004). National Cooperative Highway Research Program. In *Geofoam Applications in the Design and Construction of Highway Embankment* (Issue July, p. 792). Transportation Research Board of The National Academies.
- Sugiyono. (2013). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Alfabeta.
- Sugiyono, P. D. (2007). *Statistika Untuk Penelitian*. Alfabeta.
- Suryanita, R., Maizir, H., & Jingga, H. (2017). Prediction of Structural Response Based on Ground Acceleration Using Artificial Neural Networks. *International Journal of Technology and Engineering Studies*, 3(2).
<https://doi.org/10.20469/ijtes.3.40005-2>
- Susetyo, B., & Fitriani, E. N. (2018). Analisis Produktivitas Pekerjaan Prefabricated Vertical Drain Menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan. *Rekayasa Sipil*, 7(2), 71–80. <https://media.neliti.com/media/publications/270371-implementasi-jaringan-syaraf-tiruan-jst-71348446.pdf>

- Susilo, A. J., Sentosa, G. S., Sumarli, I., & Prihatiningsih, A. (2018). Karakteristik Parameter Kekuatan Tanah Yang Dipadatkan Dengan Uji Triaksial Metode UU. *Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran Dan Ilmu Kesehatan*, 2(2), 572.
- Teguh, R., Rusbandi, R., Sudiadi, S., Novita, D., & Mardiani, M. (2022). Penerapan Aplikasi Plaxis Pada Prodi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tridinanti Palembang. *Fordicate*, 1(2), 124–132.
<https://doi.org/10.35957/fordicate.v1i2.2406>
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Mekanika Tanah Dalam Praktek Rekayasa Jilid 1* (Kedua). Erlangga.
- Umashankar, B., Mouli, S. S., & Hariprasad, C. (2015). Settlement of Embankment Constructed with Geofom. *IFCEE 2015*, 161–170.
- Wang, C., Arellano, D., & Meier, R. (2019). Creep Behavior of Recycled-Content Expanded Polystyrene Geofom Under Compressive Loading. *5th International Conference on Geofom Blocks in Construction Applications*, 151–160.
- Wesley, L. D. (2012). *Mekanika Tanah Untuk Tanah Endapan & Residu* (I). Andi.
- Widodo, B., Pratikso, Rochim, A., Irsyam, M., & Widoanindyawati, V. (2019). Influence of Bamboo Pile Clusters in the Pile Mattress Bamboo Construction System as Reinforcement of Soft Subgrade that Support Embankment Load. *GEOTROPIKA*, 1.
- Wowor, F. S., Waani, J. E., & Sendow, T. K. (2019). Pengaruh Hubungan Beban Lalu Lintas & CBR Subgrade Terhadap Desain Tebal Perkerasan Lentur Jalan Baru Pada Daerah Iklim I & Daerah Iklim II. *Jurnal Sipil Statik*, 7(1), 147–160.
- Yan, C. (2018). Experimental Study of Barrier Effect on Moisture Movement and Mechanical Behaviors of Loess Soil. *Engineering Geology*, 240, 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.04.007>
- Zianal, N. F. A., Yusof, M. F., Madun, A., Pakir, F., Abu Talib, M. K., & Abu Talib, Z. (2022). Numerical Modelling of Soft Soil Improvement Using Expanded Polystyrene Geofom for Road Embankment. *Journal of Sustainable Underground Exploration*, 2(1).
- Zumrawi, M. M. E., & Mansour, N. (2016). Laboratory Evaluation of Geogrid Used for Stabilising Soft Subgrade. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 10(3), 418–421.