

Perilaku Tanah Lunak Pada Subgrade Jalan Dengan Timbunan Mortar Busa



Oleh:

Ulfa Jusi
10202200011

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.

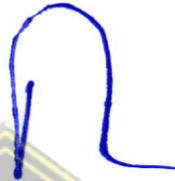
PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG, SEMARANG
2025

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 :



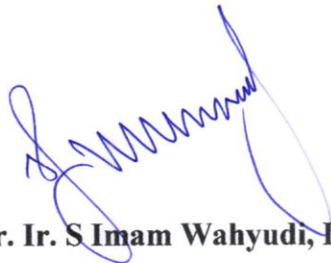
Prof. Yusep Muslih Purwana, S.T., M.T., Ph.D.

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.



**PERILAKU TANAH LUNAK PADA SUBGRADE
JALAN DENGAN TIMBUNAN MORTAR BUSA**

DISERTASI

Diajukan Sebagai Salah Satu Persyaratan Untuk Mencapai Gelar Doktor



Ulfa Jusi

NIM 10002200011

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

HALAMAN PENGESAHAN

**PERILAKU TANAH LUNAK PADA SUBGRADE
JALAN DENGAN TIMBUNAN MORTAR BUSA**



Oleh

Ulfa Jusi

NIM 10002200011

Disetujui untuk Diajukan Sidang dalam :
Sidang Terbuka pada Hari/Tanggal: Jumat, 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 : Jumat, 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, 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 لَهُمْ مِّنْهُمْ الْمُؤْمِنُونَ وَأَكْثَرُهُمُ الْفَاسِقُونَ

(Qs. Ali Imran: 110)

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

يَتَأَيَّهَا الَّذِينَ ءَامَنُوا إِذَا قِيلَ لَكُمْ تَفَسَّحُوا فِي الْمَجَالِسِ فَافْسَحُوا
يَفْسَحِ اللَّهُ لَكُمْ وَإِذَا قِيلَ أَنْشُرُوا فَأَنْشُرُوا يَرْفَعِ اللَّهُ الَّذِينَ ءَامَنُوا
مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ ﴿١١﴾

(Qs. Al-Mujadalah Ayat 11)

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

Persembahan

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

**Maha Suci Allah dengan Segala Limpahan Rahmat dan KaruniaNya
Shalawat beriring salam kepada junjungan Nabi Muhammad SAW**

**Teruntuk Ayahanda H. Usman Ma'amin (Alm), Ibunda Hj. Dahliar Latief,
Ayahanda Mertua (Alm) H. Bagindo Said Marni, Ibunda Mertua (Almh) Hj. Syamsiar
Imamku Ir. Zulfadli serta kedua buah hatiku terkasih Khalisyah Syifa Nalia
dan Ailsa Faiqa Dwi Nalia**



ABSTRAK

Pembangunan jalan di atas tanah lunak subgrade menghadapi tantangan karena daya dukungnya rendah, yang menyebabkan penurunan tanah. Oleh karena itu, timbunan yang akan diletakkan harus diidentifikasi dan dievaluasi terlebih dahulu agar beratnya tidak memperparah kondisi tanah. Untuk mengatasi hal ini, berbagai metode perkuatan tanah diterapkan guna meningkatkan stabilitas dan mengendalikan penurunan timbunan akibat subgrade yang kurang stabil. Salah satu solusi adalah menggunakan material ringan seperti mortar busa, yaitu campuran pasir, air, semen, dan cairan busa yang menyerupai beton dengan densitas kering 6–8 kN/m³ dan kuat tekan minimal 800 kPa. Material ini berfungsi sebagai pengganti timbunan tanah konvensional, sehingga mengurangi beban dan risiko penurunan pada konstruksi jalan. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis perilaku timbunan tanah lunak subgrade yang diberi perkuatan mortar busa tebal 20 cm, 30 cm dan 40 cm dengan variasi beban 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN dan perubahan muka air tanah, serta gaya angkat saat terendam pada musim hujan. Metode Penelitian dilaksanakan dengan pemanfaatan material ringan mortar busa pada timbunan lapisan tanah lunak subgrade sebagai perkuatan dengan variasi muka air tanah secara eksperimental permodelan dilaboratorium dan numerikal Plaxis 2D versi 2023. Kesimpulan yang didapat adalah Penggunaan mortar busa sebagai timbunan di atas tanah lunak menunjukkan kinerja yang baik dalam mengurangi penurunan tanah akibat pembebanan. Dengan beban maksimum 20 kN, deviasi yang didapat ± 10% antara eksperimental dan numerik, pada MAT subgrade sebesar 10,08% dan MAT pelat beton 9,6%. Semakin tebal mortar busa yang digunakan, semakin kecil penurunan yang terjadi, dan kondisi tanpa Muka Air Tanah (MAT) menghasilkan persamaan penurunan $S = -0,00062 \cdot h_{\text{mortar busa}} + 1,1825$. Selain itu, peningkatan Muka Air Tanah berkontribusi pada pengurangan penurunan, pada kondisi MAT di permukaan subgrade persamaan penurunan menjadi $S = -0,0041 \cdot h_{\text{mortar busa}} + 1,0502$ dan $S = -0,0046 \cdot h_{\text{mortar busa}} + 1,1952$ untuk MAT pelat beton. Gaya angkat yang dihasilkan pada kondisi terendam air juga lebih besar dibandingkan dengan kondisi kering, dengan persamaan gaya angkat $S_u = -1E-04 \cdot h_{\text{mortar busa}} + 2,373$ untuk MAT subgrade dan $S_u = 0,2157h_{\text{mortar busa}} + 14,054$ untuk MAT pelat beton. Faktor Keamanan yang diperoleh dari variasi ketebalan mortar busa (20 cm, 30 cm, dan 40 cm) menunjukkan nilai di atas 1,4, dengan ketebalan 40 cm memberikan Faktor Keamanan tertinggi. Sehingga dianggap penggunaan mortar busa sebagai timbunan di atas tanah lunak efektif dalam meminimalkan penurunan dan meningkatkan stabilitas struktur, terutama dengan mempertimbangkan kondisi Muka Air Tanah dan beban yang diterima.

Kata Kunci : Gaya Angkat, Plaxis 2D, Penurunan, Mortar Busa, Tanah Lunak

ABSTRACT

Road construction on soft upgrade soils faces challenges due to their low bearing capacity, which leads to soil settlement. Therefore, the embankment to be placed must be identified and evaluated beforehand so that its weight does not aggravate the soil condition. To overcome this, various soil reinforcement methods are applied to improve stability and control embankment settlement due to unstable subgrades. One solution is to use lightweight materials such as foam mortar, which is a concrete-like mixture of sand, water, cement and foam liquid with a dry density of 6-8 kN/m³ and a minimum compressive strength of 800 kPa. This material serves as a substitute for conventional soil embankment, thereby reducing the load and risk of settlement in road construction. The purpose of this research is to analyse the behaviour of subgrade soft soil embankment reinforced with 20 cm thick foam mortar, 30 cm and 40 cm with load variations of 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN and 20 kN and changes in groundwater level, as well as lifting forces when submerged in the rainy season. The research method was carried out with the use of lightweight foam mortar material in the soft subgrade embankment as reinforcement with variations in groundwater level experimentally modelled in the laboratory and numerically Plaxis 2D version 2023. It is concluded that the use of foam mortar as embankment on soft soil shows good performance in reducing soil settlement due to loading. With a maximum load of 20 kN, a deviation of $\pm 10\%$ was obtained between experimental and numerical, at a subgrade MAT of 10.08% and a concrete slab MAT of 9.6%. The thicker the foam mortar used, the smaller the settlement, and the condition without groundwater table (MAT) resulted in the settlement $S = -0,00062 \cdot h_{\text{foam mortar}} + 1,1825$. In addition, an increase in the Water Table contributes to the reduction of settlement, for the MAT condition at the subgrade surface the settlement equation becomes $S = -0,0041 \cdot h_{\text{foam mortar}} + 1,0502$ and $S = -0,0046 \cdot h_{\text{foam mortar}} + 1,1952$ for the MAT of the concrete slab. The lift force generated in the submerged condition is also greater than the dry condition, with the lift force equation $S_u = -1E-04 \cdot h_{\text{foam mortar}} + 2,373$ for subgrade MAT and $S_u = 0,2157h_{\text{mortar busa}} + 14,054$ for concrete slab MAT. The Factor of Safety obtained from the variation of foam mortar thickness (20 cm, 30 cm, and 40 cm) showed values above 1.4, with 40 cm thickness giving the highest Factor of Safety. It is therefore considered that the use of foam mortar as backfill over soft soil is effective in minimising settlement and improving structural stability, especially considering the Groundwater Table conditions and the loads received.

Keywords: Lifting Force, Plaxis 2D, Settlement, Foam Mortar, Soft Soil

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum warahmatulahi wabarakatuh

Puji dan syukur atas rahmat Allah SWT, sehingga penulis dapat membuat Disertasi ini dengan judul “*Perilaku Timbunan Mortar Busa pada Tanah Lunak Subgrade Jalan*”. Disertasi ini disusun sebagai bahan ujian Kemajuan 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.
3. Prof. Dr. Ir. H. S. Imam Wahyudi, DEA, selaku Ketua Program Doktor Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung, sekaligus sebagai penguji internal atas saran dalam penyempurnaan penulisan Disertasi ini.
4. Prof. Dr. Ir. H. Pratikso, MST., 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 penulisan Disertasi 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 penulisan Disertasi ini.
6. Prof. Yusep Muslih Purwana, S. T., M.T., Ph.D., sebagai penguji eksternal atas masukan dan bimbingannya dalam penyempurnaan penelitian dan penulisan disertasi ini.

7. Prof. Dr. Ir. Henny Pratiwi Adi, S.T., M.T., sebagai penguji internal atas masukan dan bimbingannya dalam penyempurnaan penelitian dan penulisan disertasi ini.
8. Prof. Dr. Ir. Antonius, M.T., sebagai penguji internal atas masukan dan bimbingannya dalam penyempurnaan penelitian dan penulisan disertasi 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. Staf pegawai Program Doktor Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung Semarang serta semua pihak yang telah membantu terlaksananya penulisan Disertasi ini
11. Teman-teman Program Doktor Teknik Sipil Angkatan 11 Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
12. Civitas Akademika Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru atas support selama penulis menjalani study dan melaksanakan penelitian.
13. Pimpinan dan staf PT. Harista Karsa Mandiri atas kesediaan dan fasilitas yang telah dilakukan selama penelitian.

Penulis telah berusaha semaksimal mungkin dalam menyusun Disertasi ini. Namun, penulis menyadari masih terdapat berbagai kekurangan yang perlu diperbaiki. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan masukan, kritik, dan saran yang membangun guna menyempurnakan Disertasi ini agar menjadi lebih baik.

Akhir kata, penulis berharap penelitian ini dapat bermanfaat bagi para pembacanya.

Semarang, Mei 2025

Penulis

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|---|-------------|
| HALAMAN JUDUL/SAMPUL | |
| MOTTO | |
| PERSEMBAHAN | |
| ABSTRAK | i |
| ABSTRACT | ii |
| KATA PENGANTAR | iii |
| DAFTAR ISI | v |
| DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN | ix |
| DAFTAR GAMBAR | xii |
| DAFTAR TABEL | xix |
| DAFTAR LAMPIRAN | xxii |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Identifikasi Masalah | 4 |
| 1.3 Rumusan Masalah | 4 |
| 1.4 Maksud dan Tujuan Penelitian | 4 |
| 1.5 Manfaat Penelitian | 5 |
| 1.6 Batasan Masalah | 6 |
| 1.7 Originalitas dan Pembaruan | 7 |
| BAB II KAJIAN PUSTAKA | 8 |
| 2.1 Tanah Lunak | 8 |
| 2.2 <i>Subgrade</i> (Tanah Dasar) | 14 |
| 2.3 Mortar Busa. | 18 |
| 2.3.1 Kriteria Material Ringan Mortar Busa | 18 |
| 2.3.2 Material Ringan Mortar Busa | 19 |
| 2.3.3 Kuat Tekan Bebas | 23 |
| 2.4 Geotekstil | 25 |
| 2.5 <i>Settlement</i> (Penurunan) | 27 |
| 2.6 Gaya Angkat (<i>Hydrostatic Uplift</i>) | 30 |
| 2.7 Stabilitas Daya Dukung Timbunan Mortar Busa.. | 35 |

| | | |
|----------------|---|-----------|
| 2.8 | Gaya Berat. | 38 |
| 2.8.1 | Hukum Archimedes | 38 |
| 2.8.2 | Hukum Newton 2 | 39 |
| 2.9 | Metode Elemen Hingga (<i>Plaxis</i>) | 40 |
| 2.10 | Korelasi dan Regresi | 43 |
| 2.11 | Penelitian Terdahulu. | 46 |
| 2.12 | Kerangka Berpikir | 56 |
| BAB III | METODE PENELITIAN | 58 |
| 3.1 | Konsep dan Pelaksanaan | 58 |
| 3.2 | Lokasi dan Waktu Penelitian | 61 |
| 3.3 | Variabel Pengujian | 62 |
| 3.4 | Metode Pengumpulan Data Penelitian | 73 |
| 3.5 | <i>Instrument</i> Penelitian | 75 |
| 3.5.1 | Tahap Persiapan dan Pembuatan Benda Uji | 76 |
| 3.5.2 | Pelaksanaan Pengujian di Laboratorium | 79 |
| 3.5.3 | Tahap Pengumpulan Data | 81 |
| 3.5.4 | Tahap Analisis Data | 81 |
| 3.5.5 | Penyajian Hasil Penelitian dan Studi Komparasi | 81 |
| 3.6 | Metode Analisis Data | 82 |
| 3.7 | Bagan Alir Penelitian. | 85 |
| BAB IV | ANALISIS DATA DAN HASIL ANALISIS | 88 |
| 4.1 | Tahapan Penelitian | 88 |
| 4.2 | Tahapan Pelaksanaan Eksperimen di Laboratorium | 88 |
| 4.2.1 | Persiapan Bak Uji | 88 |
| 4.2.2 | Pengujian Tanah Lunak | 90 |
| 4.2.3 | Pembuatan Campuran Mortar Busa | 97 |
| 4.2.4 | Pembuatan Plat Beton K-250 | 105 |
| 4.2.5 | Pengisian Tanah Kedalam Bak Uji | 108 |
| 4.2.6 | Pemasangan <i>Instrument</i> Data <i>Logger</i> | 108 |
| 4.2.7 | Pemasangan <i>Instrument</i> Linier Variabel <i>Differential Transformer</i> (LVDT) | 109 |
| 4.2.8 | Pemasangan <i>Instrument</i> Load <i>Cell</i> | 109 |
| 4.2.9 | Pelaksanaan Pengujian Ekperimental | 110 |

| | | |
|---------------|--|------------|
| 4.3 | Analisis Uji Sampel Tanah di Laboratorium | 134 |
| 4.3.1 | Pengujian Properties Tanah Dasar | 134 |
| 4.4 | Pengujian <i>Dynamic Cone Penetrometer</i> (DCP) dan <i>Sandcone</i> | 137 |
| BAB V | PEMBAHASAN HASIL PENELITIAN | 139 |
| 5.1 | Pemodelan <i>Plaxis 2D</i> Versi 2023 | 139 |
| 5.1.1 | Hasil Pemodelan <i>Plaxis 2D</i> Tanah Lunak <i>Subgrade</i> Tanpa Perkuatan Mortar Busa | 139 |
| 5.1.2 | Hasil Pemodelan <i>Plaxis 2D</i> Tanah Lunak <i>Subgrade</i> dengan Mortar Busa Tanpa Muka Air Tanah (MAT) | 140 |
| 5.1.3 | Hasil Pemodelan <i>Plaxis 2D</i> Tanah Lunak <i>Subgrade</i> dengan Mortar Busa Muka Air Tanah (MAT) pada <i>subgrade</i> | 144 |
| 5.1.4 | Hasil Pemodelan <i>Plaxis 2D</i> Tanah Lunak <i>Subgrade</i> dengan Mortar Busa Muka Air Tanah (MAT) pada Pelat Beton | 147 |
| 5.2 | Hasil Analisis Numerik <i>Plaxis 2D</i> dan Eksperimen di Laboratorium | 151 |
| 5.3 | Hasil Analisis Uji Eksperimen | 155 |
| 5.3.1 | Hubungan Tebal Mortar Busa dengan Gaya Angkat (<i>Hydrostatic Uplift</i>). | 166 |
| 5.4 | Perbandingan Penurunan Tanah dengan Timbunan Mortar Busa Pengujian Eksperimen di Laboratorium dan Numerik <i>Plaxis 2D</i> | 184 |
| 5.5 | Daya Dukung Tanah Dasar dengan Timbunan Mortar Busa | 198 |
| 5.6 | Pembahasan Hasil | 203 |
| 5.6.1 | Pembahasan Hasil Eksperimen Laboratorium | 203 |
| 5.6.2 | Pembahasan Hasil Analisis Numerik <i>Plaxis 2D</i> | 204 |
| 5.6.3 | Pembahasan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu yang Relevan | 206 |
| BAB VI | KESIMPULAN, IMPLEMENTASI DAN REKOMENDASI | 210 |
| 6.1 | Kesimpulan | 210 |
| 6.2 | Implementasi | 211 |

| | |
|-------------------------------|-----|
| 6.3 Rekomendasi | 211 |
| BAB VII DAFTAR PUSTAKA | 212 |
| LAMPIRAN | 219 |



DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

| | |
|------------------|--|
| A | = Luar permukaan (m^2) |
| 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 (cm) |
| Bw | = Lebar dasar timbunan (m) |
| c | = Kohesi (kN/m^2) |
| CBR | = <i>California Bearing Ratio</i> |
| DCP | = <i>Dynamic Cone Penetrometer</i> |
| Df | = Kedalaman pondasi (m) |
| e | = Angka pori |
| E | = Modulus young (kN/m^2) |
| E | = Modulus Elastisitas |
| E _c | = Modulus elastisitas mortar busa (MPa) |
| E _s | = Elastisitas Tanah (kN/m^2) |
| E _g | = <i>Elastis Modulus</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) |
| F _a | = Gaya tekan keatas satuan Newton (N) |
| FEM | = <i>Finite Element Method</i> |
| FK | = Faktor Keamanan |
| f' _c | = Kuat tekan (MPa) |
| f _y | = Kekuatan karakteristik baja |
| g | = Gravitasi satuan (m/s^2) |
| G _s | = Berat jenis |
| H | = Tinggi/tebal (m) |
| h | = Permukaan air (m) |

| | |
|--------------------|---|
| $h_{Mortar\ Busa}$ | = Tebal mortar busa (cm) |
| I_B | = Faktor pengaruh, bergantung pada nilai r/z |
| JMD | = <i>Job Mix Design</i> |
| K-250 | = Mutu beton (kg/m^2) |
| l_{atas} | = Lebar timbunan mortar busa bagian atas (m) |
| l_{bawah} | = Lebar timbunan mortar busa bagian bawah (m) |
| 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_c | = Faktor ketahanan geser daya dukung |
| N_q | = Faktor daya dukung |
| N_γ | = Faktor daya dukung |
| O_{REQ} | = Beban tambahan yang diperlukan struktur timbunan mortar busa Agar memenuhi faktor aman (kN/m) |
| P | = Massa jenis zat cair (kg/m^3) |
| P | = Beban maksimum total (N) |
| PCC | = <i>Portland Composite Cement</i> |
| PL | = Plastisitas limit (%) |
| PI | = Plastisitas indeks (%) |
| Pt | = <i>Polyester</i> |
| ρ_b | = Massa jenis benda tercelup |
| ρ_f | = Massa jenis air |
| Q | = Beban terpusat (kN) |
| q_n | = Tambahan tegangan netto |
| q_u | = Kuat tekan bebas tanah (kg/cm^2) |
| R^2 | = Koefisien determinasi |
| S | = Penurunan |
| S_n | = Gaya total yang bekerja |
| Su | = Gaya angkat (kN/m) |

| | |
|-------------------------|--|
| S_i | = Penurunan segera rata-rata |
| SNI | = Standar nasional Indonesia |
| $S_{n_{mortar\ busa}}$ | = Tegangan normal yang diberikan oleh beban mortar busa pada permukaan tanah |
| $T_{Mortar\ busa}$ | = Tebal atau tinggi mortar busa (m) |
| USCS | = <i>Unified Soil Clasification System</i> |
| ULS | = <i>Ultimate Limit State</i> |
| UU | = <i>Unconsolidated Undrained</i> |
| U_y | = Total <i>displacements</i> (mm) |
| v | = <i>Passion ration</i> |
| V | = Volume benda yang tercelup (m^3) |
| w | = Kadar air (%) |
| W_c | = Densitas kering mortar busa (kg/m^3) |
| W_{air}, W'_{air} | = Komponen vertikal dari berat air, di kedua sisi timbunan |
| $W_{mortar\ busa}$ | = Berat timbunan mortar busa (kg) |
| X | = Variabel bebas |
| Y | = Variabel tak bebas |
| z | = Kedalaman lapisan yang ditinjau (m) |
| γ_d | = Berat volume kering (kN/m^3) |
| $\gamma_{Mortar\ Busa}$ | = Berat jenis mortar busa (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 (gr/cm^3) |
| ϕ | = Sudut geser dalam ($^{\circ}$) |
| τ | = Kuat geser (kN/m^2) |
| μ_1 | = Faktor koreksi kedalaman pondasi D_f |
| μ_0 | = Faktor koreksi untuk lapisan tebal terbatas (H) |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 2.1 | Lingkaran <i>Mohr</i> | 14 |
| Gambar 2.2 | Struktur Lapisan Perkerasan Jalan | 15 |
| Gambar 2.3 | Beban Akibat Truk (Beban T) | 17 |
| Gambar 2.4 | Grafik Gradasi Batasan Pasir untuk Mortar Busa | 20 |
| Gambar 2.5 | <i>Portland Composite Cement (PCC)</i> | 22 |
| Gambar 2.6 | <i>Foam Agent</i> | 23 |
| Gambar 2.7 | Uji Kuat Tekan Bebas | 24 |
| Gambar 2.8 | Geotekstil | 26 |
| Gambar 2.9 | Geotekstil Sebagai Pemisah | 27 |
| Gambar 2.10 | Grafik untuk Mendapatkan Nilai μ_1 dan nilai μ_0 | 30 |
| Gambar 2.11 | Variabel untuk Analisis Gaya Angkat Hidrostatik pada Situasi Saat Air Hanya Menekan Satu Sisi Timbunan | 32 |
| Gambar 2.12 | Gaya Angkat Timbunan Ringan Akibat Tekanan Air Dari Kedua Sisi | 32 |
| Gambar 2.13 | Ilustrasi Perhitungan Daya Dukung Tanah | 36 |
| Gambar 2.14 | Tambahan Tegangan Akibat Beban Titik (Beban Terpusat) | 37 |
| Gambar 2.15 | Faktor Pengaruh Untuk Beban Titik Didasarkan Teori Boussinesq (I_B) dan Teori Westergaard (I_w) | 37 |
| Gambar 2.16 | Kondisi Benda pada Berbagai Keadaan | 39 |
| Gambar 2.17 | Contoh Regangan Bidang <i>Plane Strain</i> dan <i>Axisymmetry</i> | 41 |
| Gambar 2.18 | Kurva <i>Mohr-Coulomb Soil Model</i> | 43 |
| Gambar 2.19 | Kerangka Berpikir | 56 |
| Gambar 3.1 | Bak Uji | 60 |
| Gambar 3.2 | <i>Frame Hydraulic Jack</i> | 60 |
| Gambar 3.3 | Model Skematik Pengujian 1 Tanpa Lapisan Mortar Busa | 64 |
| Gambar 3.4 | Model Skematik Pengujian 2 Variasi 1 | 65 |
| Gambar 3.5 | Model Skematik Pengujian 2 Variasi 2 | 66 |
| Gambar 3.6 | Model Skematik Pengujian 2 Variasi 3 | 67 |
| Gambar 3.7 | Model Skematik Pengujian 3 Variasi 1 | 68 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 3.8 | Model Skematik Pengujian 3 Variasi 2 | 69 |
| Gambar 3.9 | Model Skematik Pengujian 3 Variasi 3 | 70 |
| Gambar 3.10 | Model Skematik Pengujian 3 Variasi 1 | 71 |
| Gambar 3.11 | Model Skematik Pengujian 3 Variasi 2 | 72 |
| Gambar 3.12 | Model Skematik Pengujian 3 Variasi 3 | 73 |
| Gambar 3.13 | Model Skematik <i>Prototype</i> Pengujian 3 Dimensi | 76 |
| Gambar 3.14 | <i>Load Cell</i> Kapasitas 50 Ton | 77 |
| Gambar 3.15 | <i>Hydroulic Jack</i> | 77 |
| Gambar 3.16 | <i>Data Logger</i> | 78 |
| Gambar 3.17 | LVDT Ukuran 50 mm | 78 |
| Gambar 3.18 | Kamera Digital | 79 |
| Gambar 3.19 | Laptop | 79 |
| Gambar 3.20 | Bagan Alir Penelitian | 86 |
| Gambar 4.1 | Material Bak Uji | 89 |
| Gambar 4.2 | Kaca Tebal 12 mm | 89 |
| Gambar 4.3 | Proses Pembuatan Rangka Bak Uji | 90 |
| Gambar 4.4 | Proses <i>Finishing</i> Perakitan Bak Uji | 90 |
| Gambar 4.5 | Proses Pengambilan Sampel Tanah Terganggu (<i>Disturbed</i>) | 91 |
| Gambar 4.6 | Proses Pelaksanaan Pengambilan Tanah Tak Terganggu (<i>Undisturbed</i>) | 91 |
| Gambar 4.7 | Pelaksanaan Pengujian Analisa Saringan di Laboratorium | 92 |
| Gambar 4.8 | Pelaksanaan Pengujian Kadar Air | 93 |
| Gambar 4.9 | Pelaksanaan Pengujian Berat Isi Tanah | 93 |
| Gambar 4.10 | Alat Uji <i>Atterberg Limits</i> | 94 |
| Gambar 4.11 | Pelaksanaan Pengujian <i>Atterberg Limits</i> | 94 |
| Gambar 4.12 | Pelaksanaan Pengujian Berat Jenis Tanah | 95 |
| Gambar 4.13 | Pelaksanaan Pengujian <i>Triaxial</i> UU | 95 |
| Gambar 4.14 | Alat Uji CBR Laboratorium | 96 |
| Gambar 4.15 | Pelaksanaan Pengujian Pemadatan Laboratorium | 96 |
| Gambar 4.16 | Material Campuran Mortar Busa | 98 |
| Gambar 4.17 | <i>Mould</i> Silinder Mortar Busa | 98 |
| Gambar 4.18 | Peralatan Pembuatan Campuran Mortar Busa | 99 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Gambar 4.19 | Pembuatan <i>Foam</i> | 99 |
| Gambar 4.20 | Penimbangan Material Mortar Busa | 100 |
| Gambar 4.21 | Pengadukan dengan <i>Mixer</i> | 101 |
| Gambar 4.22 | Pengujian <i>Flow</i> | 101 |
| Gambar 4.23 | <i>Mould</i> Silinder Mortar Busa | 102 |
| Gambar 4.24 | Pengujian Berat Isi | 103 |
| Gambar 4.25 | Pengujian Kuat Tekan Bebas (<i>Unconfined Compressive Strength/UCS</i>) | 104 |
| Gambar 4.26 | Bekisting Mortar Busa | 104 |
| Gambar 4.27 | Mortar Busa Tebal 20 cm, 30 cm dan 40 cm | 105 |
| Gambar 4.28 | Agregat Kasar dan Agregat Halus | 106 |
| Gambar 4.29 | Semen | 106 |
| Gambar 4.30 | Alat Uji Kuat Tekan Beton | 107 |
| Gambar 4.31 | <i>Loading Plate</i> | 107 |
| Gambar 4.32 | Letak LVDT pada Box Uji | 109 |
| Gambar 4.33 | Letak <i>Load Cell</i> | 110 |
| Gambar 4.34 | Penyimpanan Data <i>Logger</i> di Laptop | 111 |
| Gambar 4.35 | Titik Monitoring <i>Settlement</i> | 112 |
| Gambar 4.36 | <i>Settlement</i> yang Terjadi pada Tanah Lunak Tanpa Perkuatan Mortar Busa | 113 |
| Gambar 4.37 | <i>Settlement</i> yang Terjadi pada Tanah Lunak Tebal 80 cm Tanpa Perkuatan Mortar Busa | 114 |
| Gambar 4.38 | <i>Settlement</i> yang Terjadi pada Tanah Lunak Tebal 90 cm Tanpa Perkuatan Mortar Busa | 115 |
| Gambar 4.39 | <i>Settlement</i> yang Terjadi pada Tanah Lunak Tebal 100 cm Tanpa Perkuatan Mortar Busa | 115 |
| Gambar 4.40 | <i>Settlement</i> yang Terjadi pada Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 20 cm. | 117 |
| Gambar 4.41 | <i>Settlement</i> yang Terjadi pada Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 30 cm | 118 |
| Gambar 4.42 | <i>Settlement</i> yang Terjadi pada Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 40 cm | 120 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Gambar 4.43 | <i>Settlement</i> yang Terjadi pada Tanah Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 20 cm MAT di Permukaan <i>Subgrade</i> | 121 |
| Gambar 4.44 | <i>Settlement</i> yang Terjadi pada Tanah Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 30 cm MAT di Permukaan <i>Subgrade</i> | 123 |
| Gambar 4.45 | <i>Settlement</i> yang Terjadi pada Tanah Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 40 cm MAT di Permukaan <i>Subgrade</i> | 124 |
| Gambar 4.46 | <i>Settlement</i> yang Terjadi pada Tanah Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 20 cm MAT di Tengah Plat Beton | 126 |
| Gambar 4.47 | <i>Settlement</i> yang Terjadi pada Tanah Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 30 cm MAT di Tengah Plat Beton | 127 |
| Gambar 4.48 | <i>Settlement</i> yang Terjadi pada Tanah Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 40 cm MAT di Tengah Plat Beton | 129 |
| Gambar 4.49 | <i>Settlement</i> yang Terjadi pada Tanah Tanah Lunak Variasi Ketebalan Mortar Busa Berdasarkan Numerik <i>Plaxis 2D</i> | 131 |
| Gambar 4.50 | <i>Settlement</i> pada Tanah Tanah Lunak Tanpa Perkuatan | 131 |
| Gambar 4.51 | Perbandingan <i>Settlement</i> Tanah Lunak 80 cm dengan Mortar Busa 20 cm | 133 |
| Gambar 4.52 | Perbandingan <i>Settlement</i> Tanah Lunak 90 cm dengan Mortar Busa 30 cm | 133 |
| Gambar 4.53 | Perbandingan <i>Settlement</i> Tanah Lunak 100 cm dengan Mortar Busa 40 cm | 133 |
| Gambar 4.54 | Grafik <i>Triaxial UU</i> | 136 |
| Gambar 5.1 | Total <i>Displacement</i> Uy Tanah Dasar Tanpa Mortar Busa | 140 |
| Gambar 5.2 | Total <i>Displacement</i> Uy Tanah Dasar dengan Mortar Busa Tebal 20 cm | 141 |
| Gambar 5.3 | Total <i>Displacement</i> Uy Tanah Dasar dengan Mortar Busa | |

| | | |
|-------------|---|-----|
| | Tebal 30 cm | 142 |
| Gambar 5.4 | Total <i>Displacement</i> Uy Tanah Dasar dengan Mortar Busa Tebal 40 cm | 143 |
| Gambar 5.5 | Total <i>Displacement</i> Uy Tanah Dasar dengan Mortar Busa Tebal 20 cm MAT pada <i>Subgrade</i> | 145 |
| Gambar 5.6 | Total <i>Displacement</i> Uy Tanah Dasar dengan Mortar Busa Tebal 30 cm MAT pada <i>Subgrade</i> | 146 |
| Gambar 5.7 | Total <i>Displacement</i> Uy Tanah Dasar dengan Mortar Busa Tebal 40 cm MAT pada <i>Subgrade</i> | 147 |
| Gambar 5.8 | Total <i>Displacement</i> Uy Tanah Dasar dengan Mortar Busa Tebal 20 cm MAT pada Plat Beton | 148 |
| Gambar 5.9 | Total <i>Displacement</i> Uy Tanah Dasar dengan Mortar Busa Tebal 30 cm MAT pada Plat Beton | 149 |
| Gambar 5.10 | Total <i>Displacement</i> Uy Tanah Dasar dengan Mortar Busa Tebal 40 cm MAT pada Plat Beton | 150 |
| Gambar 5.11 | Grafik <i>Subgrade</i> dengan Mortar Busa Tanpa MAT | 152 |
| Gambar 5.12 | Grafik Mortar Busa dengan MAT di <i>Subgrade</i> | 153 |
| Gambar 5.13 | Grafik Mortar Busa dengan MAT di Plat Beton | 154 |
| Gambar 5.14 | Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 20 cm (Hasil <i>Plaxis 2D</i>) | 155 |
| Gambar 5.15 | Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 20 cm pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil <i>Plaxis 2D</i>) | 156 |
| Gambar 5.16 | Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 30 cm (Hasil <i>Plaxis 2D</i>) | 156 |
| Gambar 5.17 | Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 30 cm pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil <i>Plaxis 2D</i>) | 157 |
| Gambar 5.18 | Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 40 cm (Hasil <i>Plaxis 2D</i>) | 158 |
| Gambar 5.19 | Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 40 cm pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil <i>Plaxis 2D</i>) | 158 |
| Gambar 5.20 | Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 20 cm (Hasil Eksperimen Laboratorium) | 159 |
| Gambar 5.21 | Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 20 cm pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil Eksperimen Laboratorium) | 160 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Gambar 5.22 | Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 30 cm (Hasil Eksperimen Laboratorium) | 160 |
| Gambar 5.23 | Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 30 cm pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil Eksperimen Laboratorium) | 161 |
| Gambar 5.24 | Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 40 cm (Hasil Eksperimen Laboratorium) | 162 |
| Gambar 5.25 | Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 40 cm pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil Eksperimen Laboratorium) | 163 |
| Gambar 5.26 | Penurunan dengan Variasi Tebal Mortar Busa Tanpa MAT pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil Eksperimen Laboratorium) | 164 |
| Gambar 5.27 | Penurunan dengan Variasi Tebal Mortar Busa dengan MAT pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil Eksperimen di Laboratorium) | 165 |
| Gambar 5.29 | Nilai Gaya Angkat Akibat Tebal Mortar Busa Kondisi MAT <i>Subgrade</i> | 166 |
| Gambar 5.30 | Pengaruh Tebal Mortar Busa terhadap Gaya Angkat Kondisi MAT pada <i>Subgrade</i> | 175 |
| Gambar 5.31 | Nilai Gaya Angkat Akibat Tebal Mortar Busa Kondisi MAT di Plat Beton | 182 |
| Gambar 5.32 | Pengaruh Tebal Mortar Busa terhadap Gaya Angkat Kondisi MAT pada Plat Beton | 183 |
| Gambar 5.33 | Nilai Gaya Angkat Akibat Level MAT Terhadap Tebal Mortar Busa | 184 |
| Gambar 5.34 | Pengaruh Variasi Tebal Mortar Busa Tanpa MAT terhadap Penurunan Timbunan Akibat Beban 20 kN (Hasil Eksperimen di Laboratorium dan Numerik <i>Plaxis 2D</i>) | 185 |
| Gambar 5.35 | Hasil Penurunan Timbunan dengan Mortar Busa MAT pada <i>Subgrade</i> (Hasil Eksperimen di Laboratorium dan Numerik <i>Plaxis 2D</i>) | 186 |
| Gambar 5.36 | Pengaruh Variasi Tebal Mortar Busa MAT <i>Subgrade</i> terhadap | |

| | | |
|-------------|---|-----|
| | Penurunan Timbunan Akibat Beban 20 kN (Hasil Eksperimen di Laboratorium dan Numerik <i>Plaxis 2D</i>) | 187 |
| Gambar 5.37 | Hasil Penurunan Timbunan dengan Mortar Busa MAT pada Plat Beton (Hasil Eksperimen di Laboratorium dan Numerik <i>Plaxis 2D</i>) | 188 |
| Gambar 5.38 | Pengaruh Variasi Tebal Mortar Busa MAT Plat Beton terhadap Penurunan Timbunan Akibat Beban 20 kN (Hasil Eksperimen di Laboratorium dan Numerik <i>Plaxis 2D</i>) | 189 |
| Gambar 5.39 | Tegangan Akibat Beban Titik pada Tanah Dasar Akibat dengan Mortar Busa Tebal 20 cm | 193 |
| Gambar 5.40 | Hubungan Tegangan pada Tanah Dasar dengan Faktor Keamanan (FK) Akibat Timbunan dengan Mortar Busa Tebal 20 cm | 193 |
| Gambar 5.41 | Tegangan Akibat Beban Titik pada Tanah Dasar Akibat Timbunan Mortar Busa Tebal 30 cm | 196 |
| Gambar 5.42 | Hubungan Tegangan pada Tanah Dasar dengan Faktor Keamanan (FK) Akibat Timbunan Mortar Busa Tebal 30 cm | 197 |
| Gambar 5.43 | Tegangan Akibat Beban Titik pada Tanah Dasar Akibat Timbunan Mortar Busa Tebal 40 cm | 200 |
| Gambar 5.44 | Hubungan Tegangan pada Tanah Dasar dengan Faktor Keamanan (FK) Akibat Timbunan Mortar Busa Tebal 40 cm | 200 |
| Gambar 5.45 | Perbandingan Variasi Tebal Mortar Busa dan Tegangan pada Tanah Dasar | 202 |
| Gambar 5.46 | Perbandingan Variasi Tebal Mortar Busa dan Faktor Keamanan (FK) Akibat Beban Maksimum 20 kN | 202 |
| Gambar 5.47 | Perbandingan Faktor Aman Mortar Busa dengan Penelitian Terdahulu | 207 |
| Gambar 5.48 | Perbandingan Faktor Aman Mortar Busa dengan Penelitian Terdahulu | 208 |
| Gambar 5.49 | Perbandingan Rasio Tinggi Muka Air Timbunan Mortar Busa dengan Penelitian Terdahulu. | 209 |

DAFTAR TABEL

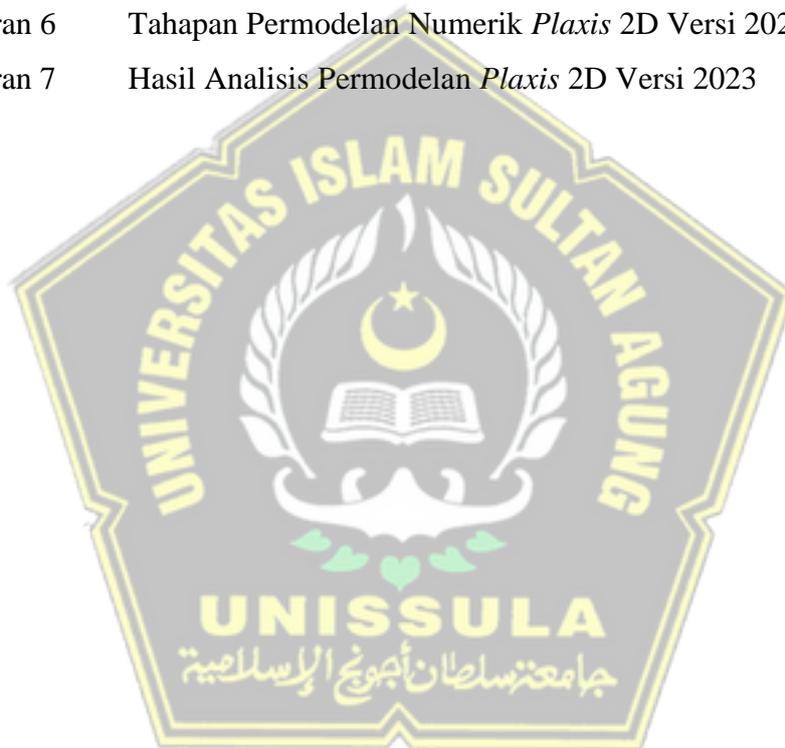
| | | |
|------------|---|-----|
| Tabel 2.1 | Porositas, Angka Pori, dan Berat Satuan Tanah-Tanah Tipikal Alami | 9 |
| Tabel 2.2 | Klasifikasi Tanah Lempung Berdasarkan Kadar Air | 10 |
| Tabel 2.3 | Nilai Indeks Plastisitas dan Macam Tanah | 10 |
| Tabel 2.4 | Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah Lempung | 11 |
| Tabel 2.5 | Hubungan Antara Jenis Tanah dan <i>Poisson Ratio</i> (ν) | 11 |
| Tabel 2.6 | Hubungan Antara Sudut Geser Dalam dengan Jenis Tanah | 12 |
| Tabel 2.7 | Korelasi N_{60} Untuk Tanah Kohesif | 12 |
| Tabel 2.8 | Berat Jenis Tanah (<i>Specific Gravity</i>) | 13 |
| Tabel 2.9 | Modulus Elastisitas Tanah | 13 |
| Tabel 2.10 | <i>Poisson Ratio</i> | 13 |
| Tabel 2.11 | Nilai Kuat Geser | 13 |
| Tabel 2.12 | Tinggi Minimum Tanah Dasar di Atas Muka Air Tanah dan Muka Air Banjir | 16 |
| Tabel 2.13 | Perkiraan Waktu Pra-Pembebanan untuk Timbunan Rendah di Atas Tanah Lunak | 17 |
| Tabel 2.14 | Persyaratan Pasir | 20 |
| Tabel 2.15 | Kriteria Desain Mortar Busa | 24 |
| Tabel 2.16 | Kriteria Penurunan Timbunan | 28 |
| Tabel 2.17 | Faktor Keamanan untuk Analisa Stabilitas | 29 |
| Tabel 2.18 | Faktor Daya Dukung Analisis Terzaghi | 35 |
| Tabel 2.19 | Interpretasi Koefisien Korelasi | 44 |
| Tabel 2.20 | Akurasi Regresi Linier Berdasarkan Koefisien Determinasi (R^2) | 44 |
| Tabel 2.21 | Penelitian-Penelitian yang Relevan | 46 |
| Tabel 3.1 | Spesifikasi Geotekstil | 59 |
| Tabel 3.2 | Rancangan Campuran (<i>Mix Design</i>) Mortar Busa 800 kPa untuk 1 m ³ | 59 |
| Tabel 4.1 | Rekapitulasi Data Pengujian Tanah Dasar | 97 |
| Tabel 4.2 | Hasil Pengujian Densitas Mortar Busa | 105 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Tabel 4.3 | Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton | 108 |
| Tabel 4.4 | Perletakan dan Kode Sensor LVDT | 108 |
| Tabel 4.5 | Berat Material Benda Uji | 112 |
| Tabel 4.6 | <i>Settlement</i> Tanah Lunak Tebal 60 cm Tanpa Perkuatan Mortar Busa | 113 |
| Tabel 4.7 | <i>Settlement</i> Tanah Lunak Tebal 80 cm Tanpa Perkuatan Mortar Busa | 113 |
| Tabel 4.8 | <i>Settlement</i> Tanah Lunak Tebal 90 cm Tanpa Perkuatan Mortar Busa. | 114 |
| Tabel 4.9 | <i>Settlement</i> Tanah Lunak Tebal 100 cm Tanpa Perkuatan Mortar Busa | 115 |
| Tabel 4.10 | <i>Settlement</i> Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 20 cm Tanpa MAT | 115 |
| Tabel 4.11 | <i>Settlement</i> Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa 30 cm Tanpa MAT | 118 |
| Tabel 4.12 | <i>Settlement</i> Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa 40 cm Tanpa MAT | 119 |
| Tabel 4.13 | <i>Settlement</i> Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 20 cm MAT <i>Subgrade</i> | 121 |
| Tabel 4.14 | <i>Settlement</i> Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 30 cm MAT <i>Subgrade</i> | 122 |
| Tabel 4.15 | <i>Settlement</i> Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 40 cm MAT <i>Subgrade</i> | 124 |
| Tabel 4.16 | <i>Settlement</i> Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 20 cm MAT di Tengah Plat Beton | 125 |
| Tabel 4.17 | <i>Settlement</i> Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 30 cm MAT di Tengah Plat Beton | 127 |
| Tabel 4.18 | <i>Settlement</i> Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 40 cm MAT di Tengah Plat Beton | 128 |
| Tabel 4.19 | Rekapan Hasil Penurunan Akibat Pembebanan 20 kN | 129 |
| Tabel 4.20 | Tabel Perbandingan Eksperimen Tanah Lunak Tanpa dan Dengan Mortar Busa pada Beban 20 kN | 132 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Tabel 4.21 | Hasil Pengujian <i>Dynamic Cone Penetrometer</i> (DCP) | 137 |
| Tabel 4.22 | Hasil Pengujian <i>Sandcone</i> | 138 |
| Tabel 5.1 | Rekapitulasi Numerik <i>Plaxis</i> 2D Hasil Penurunan Akibat Pembebanan 20 kN | 150 |
| Tabel 5.2 | Hasil Analisis Eksperimen dengan <i>Plaxis</i> 2D <i>Subgrade</i> dengan Mortar Busa Tanpa MAT | 150 |
| Tabel 5.3 | Hasil Analisis Eksperimen dengan <i>Plaxis</i> 2D <i>Subgrade</i> dengan Mortar Busa MAT di Permukaan <i>Subgrade</i> | 153 |
| Tabel 5.4 | Hasil Analisis Eksperimen <i>Plaxis</i> 2D Mortar Busa dengan MAT di Plat Beton | 154 |
| Tabel 5.5 | Faktor Keamanan Mortar Busa 20 cm Akibat MAT <i>Subgrade</i> | 169 |
| Tabel 5.6 | Faktor Keamanan Mortar Busa 30 cm Akibat MAT <i>Subgrade</i> | 171 |
| Tabel 5.7 | Faktor Keamanan Mortar Busa 30 cm Akibat MAT <i>Subgrade</i> | 173 |
| Tabel 5.8 | Hasil Nilai Faktor Aman Timbunan Mortar Busa Akibat Gaya Angkat dengan Muka Air Tanah pada <i>Subgrade</i> | 173 |
| Tabel 5.9 | Faktor Keamanan Mortar Busa 20 cm Akibat MAT Plat Beton | 177 |
| Tabel 5.10 | Faktor Keamanan Mortar Busa 30 cm Akibat MAT Plat Beton | 179 |
| Tabel 5.11 | Faktor Keamanan Mortar Busa 40 cm Akibat MAT Plat Beton | 181 |
| Tabel 5.12 | Hasil Nilai Faktor Aman Timbunan Mortar Busa Akibat Gaya Angkat dengan Muka Air Tanah pada Plat Beton | 181 |
| Tabel 5.13 | Tegangan Akibat Beban Titik ($z = 0,3$ m) | 192 |
| Tabel 5.14 | Tegangan Akibat Beban Titik ($z = 0,4$ m) | 196 |
| Tabel 5.15 | Tegangan Akibat Beban Titik ($z = 0,5$ m) | 199 |
| Tabel 5.16 | Tegangan pada Tanah Akibat Penambahan Beban dan Variasi Tebal Mortar Busa | 201 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | | |
|------------|--|-----|
| Lampiran 1 | Pengujian Tanah | 219 |
| Lampiran 2 | Pembuatan Bak Uji | 231 |
| Lampiran 3 | Perancangan dan Pembuatan Mortar Busa | 234 |
| Lampiran 4 | Pembuatan Plat Beton K-250 | 238 |
| Lampiran 5 | Tahapan Eksperimen | 242 |
| Lampiran 6 | Tahapan Permodelan Numerik <i>Plaxis</i> 2D Versi 2023 | 250 |
| Lampiran 7 | Hasil Analisis Permodelan <i>Plaxis</i> 2D Versi 2023 | 262 |



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanah yang merupakan dasar dari konstruksi struktur teknik sipil yang dirancang untuk menopang dan menahan beban struktur di atasnya.(Kimpraswil, 2002). Distribusi tanah umumnya dalam bentuk lempung, lanau, dan pasir lokal, lunak dan sangat kompresibel (indeks kompresi terukur: 0,57). Sebagian besar memiliki daya dukung beban yang rendah, yang dapat menyebabkan penurunan dan menghambat konstruksi yang dibangun di atasnya (Wardoyo et al., 2019). Permasalahan yang utama dari tanah lunak antara lain adalah daya dukung tanah yang rendah dan penurunan yang besar. (Rochim & Fitriyana, 2022) Karakteristik lain dari tanah lunak berproduktivitas rendah adalah kandungan airnya yang tinggi (Kusuma et al., 2016).

Konstruksi jalan yang dibangun di daerah perkotaan di atas tanah lunak menyebabkan permasalahan yang muncul dalam membangun infrastruktur transportasi darat yang terletak pada tanah lunak adalah pembuatan konstruksi jalan tersebut.(Iqbal, 2012) Selain itu tanah merupakan bagian yang penting untuk berdirinya suatu bangunan, jalan raya, atau struktur lain yang berhubungan dengan ketekniksipilan. Sering kali suatu konstruksi mengalami kerusakan karena permasalahan yang terjadi pada tanah. Permasalahan ini tidak hanya terbatas pada penurunan saja tetapi mencakup secara menyeluruh, misalnya adanya pengembangan tanah, ketidakstabilan dan lain-lain. Analisa tentang tanah sangat dibutuhkan untuk mengetahui jenis tanah yang ada di lapangan dan akan dijadikan acuan untuk perbaikan struktur bawah jalan.(Amran & Surandono, 2017)

Subgrade sebagai lapisan bawah jalan harus memiliki daya dukung yang bagus. *Subgrade* menjadi bagian yang harus dipertimbangkan karena adanya berat struktur perkerasan dan timbunan di atasnya. (Carvajal & Romana, 2013). Namun kondisi tanah lunak menyebabkan perlu adanya perkuatan terhadap lapisan *subgrade*. Penyelesaian

masalah pembangunan jalan dilakukan dengan rekayasa sehingga *subgrade* sebagai lapisan bawah jalan aman dan stabil serta memiliki daya dukung yang bagus (Widodo et al., 2019).

Usaha yang dilakukan untuk meningkatkan daya dukung pada *subgrade* adalah dengan perkuatan tanah (*soil improvement*). Salah satunya adalah dengan material ringan mortar-busa adalah bahan konstruksi alternatif pada perkuatan tanah untuk konstruksi jalan. Mortar-busa dibentuk dari campuran antara bahan baku busa, semen, pasir dan air. Bahan baku busa yang digunakan mengandung protein nabati atau sejenisnya yang dapat menghasilkan gelembung terpisah yang stabil sehingga dapat menghasilkan campuran material ringan. (Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan, 2015).

Mortar busa digunakan sebagai material timbunan yaitu menggunakan metode campuran rasio tertentu antara semen, *foam* dengan material tanah/pasir. Material yang digunakan bisa berupa material setempat atau material yang diperoleh dari lokasi lain seperti pasir. Penambahan *foam* pada campuran mortar akan mengembang hingga 4 (empat) kali volume awal sehingga kebutuhan material dapat dikurangi bila dibandingkan dengan material tanpa campuran *foam*. (Huang et al., 2017)

Foam agent merupakan cairan yang apabila dicampur dengan air dan diberikan tekanan udara tertentu akan membentuk busa yaitu senyawa kimia dominan yang teridentifikasi dalam cairan pembentuk busa diantaranya: *1-dodecanol*, *methoxyacetic acid tridecyl ester* dan *1-tetradecanol* dapat juga disebut cairan *surfactant* yang memiliki karakteristik kimia yang hampir sama dengan air. Fungsi dari *foam agent* ini adalah untuk menstabilkan gelembung udara selama pencampuran dengan cepat dan mendapatkan campuran mortar dengan berat isi yang ringan serta dapat didesain sesuai dengan rencana (Hidayat et al., 2016). Pemanfaatan *foam* (busa) untuk membentuk material ringan dapat diperoleh kriteria-kriteria mempunyai berat yang ringan sehingga nilai berat isi (*density*) dari material campuran atau mortar tersebut mempunyai berat isi 5-12 kN/m³. Nilai *flow* (*flowability*) pada *foam* (busa) diindikasikan untuk memudahkan pelaksanaan dilapangan bila menggunakan alat penyemprot sehingga

mencapai jarak yang ideal, nilai *flow* umumnya berkisar 180 ± 20 mm (Hidayat et al., 2016)

Jika dikaitkan dengan kestabilan konstruksi yang dibangun di atas tanah lunak, suatu hal yang penting yang harus dilakukan adalah mengkaji permasalahan penurunan akibat berat sendiri timbunan jalan, beban lalu lintas kendaraan. Hal ini membutuhkan dilakukannya penelitian tentang mortar busa sebagai material ringan pada *subgrade* tanah lunak dengan beban-beban terhadap kapasitas dukung yang baik

Penelitian tentang mortar busa sudah ada dilakukan, beberapa penelitian terkait mortar busa pada tanah lunak, diantara adalah (Jiang et al., 2022) yang mempelajari kelayakan dan keunggulan beton ringan busa pada bagian pipa gas bertekanan tinggi terkubur yang ada di bawah dasar jalan tanah lunak. Pembahasan dititik beratkan pada sistem timbunan dengan beton busa ringan yang mengalami penurunan yang lebih rendah dibandingkan dengan timbunan tanggul konvensional. Sehingga penggunaan Beton busa ringan pada tanah lunak dapat mengurangi biaya sebesar 12% dibandingkan dengan metode perawatan pondasi tiang komposit. Penelitian (Huang et al., 2017) tentang penurunan tanah dasar lintasan jalur kereta api kecepatan tinggi. Penggunaan beton busa ringan sebagai pengisi tanah dasar, sehingga dapat mengendalikan penurunan tanah dasar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan beton busa ringan dengan berat jenis target $500\text{--}800$ kg/m³ dapat memenuhi persyaratan kondisi statis dan dinamis dari *subgrade* diisi oleh beton busa ringan dengan target *density* sebesar 650 kg/m³ memiliki stabilitas dinamis jangka panjang yang baik dengan beban siklik ketika lapisan penyangga dinamis dengan ketebalan 0,5 diatur antara lapisan beton busa ringan dan Plat pondasi.

Kestabilan konstruksi yang dibangun di atas tanah lunak dengan menggunakan material ringan mortar busa pada saat kondisi kering dan perubahan muka air tanah pada saat terendam air akan menghasilkan daya angkat. Sehingga perlu dilakukan kajian tentang Perilaku Tanah Lunak pada *Subgrade* Jalan dengan Timbunan Mortar Busa untuk menganalisis penurunan, daya dukung dan daya apung yang terjadi akibat perubahan level muka air .

1.2 Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah yang dapat diungkapkan adalah :

1. Disebabkan karena rendahnya daya dukung *subgrade* tanah lunak yang sering menyebabkan kerusakan pada konstruksi, sehingga menimbulkan biaya pemeliharaan dan perbaikan yang cukup besar. Oleh karena itu, diperlukan metode perkuatan terhadap *subgrade* yang efektif, salah satunya dengan penggunaan mortar busa yang inovatif dan mudah diterapkan dalam proses pengerjaannya.
2. Mortar busa termasuk dalam kategori material timbunan ringan yang mampu mengurangi risiko penurunan tanah. Oleh karena itu, penting untuk melakukan kajian terhadap perilaku tanah lunak pada *subgrade* dengan menerapkan variasi ketebalan mortar busa
3. Keadaan tanah lunak pada saat-saat tertentu terendam air dimusim hujan mengakibatkan terjadinya gaya angkat pada mortar busa, sehingga perlu dilakukan analisa terhadap gaya angkat mortar busa tersebut dengan perubahan level muka air tanah
4. Kerusakan pada lapisan tanah lunak *subgrade* disebabkan oleh beban yang berlebihan, yang mengakibatkan tegangan tinggi pada tanah tersebut. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian mengenai ketebalan mortar busa sebagai material timbunan di atas *subgrade* tanah lunak agar dapat memenuhi persyaratan faktor keamanan yang ditetapkan

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Berapakah tinggi timbunan dengan mortar busa pada *subgrade* akibat pembebanan dan akibat perubahan muka air tanah, yang menghasilkan penurunan terkecil?

2. Bagaimana persamaan matematika yang dihasilkan dengan timbunan mortar busa pada tanah lunak *subgrade* tanah lunak pada kondisi kering dan kondisi terendam air?
3. Bagaimana kondisi gaya angkat yang terjadi akibat variasi tebal mortar busa pada tanah lunak *subgrade* beserta persamaan matematika yang dihasilkan saat terendam air?
4. Bagaimana kondisi yang terjadi pada tanah lunak *subgrade* dengan timbunan mortar busa terhadap faktor aman akibat beban besar yang mempunyai potensi merusak *subgrade*?

1.4 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dan tujuan pada penelitian ini adalah

1. Untuk menganalisis penurunan yang terjadi dengan variasi ketebalan mortar busa yang digunakan sebagai pengganti timbunan pada *subgrade* akibat pembebanan dan perubahan muka air tanah
2. Untuk mendapatkan persamaan matematika timbunan dengan mortar busa yang dihasilkan oleh penurunan tanah lunak *subgrade* yang diberi perkuatan mortar busa pada saat kondisi tanah kering dan terendam air
3. Untuk menganalisis gaya angkat yang terjadi berdasarkan variasi ketebalan mortar yang berupa persamaan matematika.
4. Untuk menganalisis faktor aman yang terjadi dengan menggunakan timbunan mortar busa akibat beban besar yang mempunyai potensi merusak *subgrade*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan pada penelitian ini adalah :

1. Memberikan informasi tentang sifat geoteknis tanah lunak dari parameter yang ada

2. Memberikan informasi seberapa besar pengaruh mortar busa pada lapisan *subgrade* sehingga dapat dijadikan salah satu alternatif penanganan tanah lunak
3. Memberikan solusi alternatif untuk desain pada konstruksi jalan dengan pembebanan yang ada sehingga dapat konstruksi yang kuat dan stabil
4. Menjadi bahan informasi bagi pihak-pihak terkait pembangunan konstruksi di atas tanah lunak dengan penggunaan mortar busa sebagai perkuatan tanah lunak.

1.6 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Sampel tanah lunak diambil adalah sampel tanah yang terganggu dan tidak terganggu dari Jl. Badak Ujung Kota Pekanbaru, berdasarkan pengamatan visual adalah tanah yang lempung lunak.
2. Pembuatan mortar ringan dengan cakupan material : Agregat halus (pasir) yang digunakan adalah pasir Teratak Buluh, Semen yang digunakan jenis *Portland Cement Composite* dari Semen Padang, *foam agent* yang digunakan adalah *foam agent nabati* produksi PT. Samacon.
3. Sifat fisik, kimia dan mekanis *foam agent* dan semen yang digunakan pada penelitian ini tidak diperhatikan/dikaji lebih lanjut.
4. Cetakan mortar busa menggunakan *mould* silinder dengan dimensi diameter 10 cm, tinggi 20 cm.
5. Tebal mortar busa 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.
6. Kondisi muka air tanah pada timbunan mortar busa adalah kondisi kering, kondisi muka air tanah di permukaan *subgrade*, dan kondisi muka air tanah di atas mortar busa (ditengah plat beton).
7. Penelitian ini berupa studi eksperimental dengan model laboratorium

8. Pembuatan bak uji dari bahan plat baja, profil baja, kaca transparan 12 mm dan dimensi bak uji 220 cm x 115 cm x 50 cm.
9. Pengujian model dengan beban vertikal dengan model uji laboratorium menggunakan alat hidrolik
10. Analisa numerik dengan bantuan *software finite element method* dengan menggunakan program *Plaxis 2D* versi 2023

1.7 Originalitas dan Pembaruan

Originalitas dari penelitian ini adalah belum banyaknya yang melakukan pengkajian timbunan dengan mortar busa pada tanah lunak *subgrade*. Perbedaan pada penelitian ini adalah variasi tebal mortar busa sebagai timbunan pada kondisi kering dan kondisi terendam air. Pembebanan vertikal dengan lapisan mortar busa diharapkan dapat mengurangi penurunan tanah dan daya angkat/apung. Penelitian ini menggunakan numerikal *Plaxis 2D* versi 2023.



BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Tanah Lunak

Tanah lunak adalah tanah yang mempunyai nilai kompresibilitas tinggi, umumnya terdiri dari lempung yang berumur Holosen (<10.000 tahun), secara alamiah terbentuk dari proses pengendapan di dataran alluvial pantai, sungai, danau dan rawa. Sifat-sifat tanah lunak, antara lain konsistensi lunak-sangat lunak, kadar air tinggi, gaya geser kecil, kemampatan besar, daya dukung rendah dan tingkat penurunan tinggi. Tanah lunak merupakan salah satu kendala geologi teknik yang dapat menimbulkan permasalahan dalam pembangunan infrastruktur dan penataan ruang. Tanah lunak sering kali menimbulkan permasalahan dalam konstruksi akibat rendahnya daya dukung sehingga berpotensi terjadi perosakan (*settlement*). (Wardoyo et al., 2019)

Lapisan tanah lunak umumnya mempunyai permeabilitas yang rendah. Tanah lunak bila dibebani akan berpengaruh pada tekanan air pori yang akan meningkat dan berbeda antara satu titik dengan titik lainnya. Hal ini mengakibatkan pengaliran air pori ke lapisan tanah dengan tekanan air pori yang lebih rendah, sehingga menyebabkan tanah lunak tersebut mengalami pemampatan yang disertai dengan penurunan muka tanah. Pemampatan tersebut disebabkan oleh deformasi pada partikel tanah, perubahan struktur pada partikel tanah, keluarnya air atau udara dari dalam pori tanah. (Carvajal & Romana, 2013)

Berdasarkan Terzaghi (Das, 1995), nilai porositas, angka pori dan berat satuan tanah tipikal alami dapat dilihat pada Tabel 2.1 :

Tabel 2.1: Porositas, Angka Pori, dan Berat Satuan Tanah-Tanah Tipikal Alami

| No | Uraian | Porositas (n) (%) | Angka Pori (e) | Kadar Air (w) (%) | Berat Satuan (gr/cm ³) | | Berat Satuan (lb/ft ³) | |
|-----|--|-------------------------|-------------------|-------------------------|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|
| | | | | | γ_d | γ | γ_d | γ |
| 1. | Pasir seragam, lepas | 46 | 0,85 | 32 | 1,43 | 1,89 | 90 | 118 |
| 2. | Pasir seragam, padat | 36 | 0,51 | 19 | 1,75 | 2,09 | 109 | 130 |
| 3. | Pasir berbutir campuran, lepas | 40 | 0,67 | 25 | 1,59 | 1,99 | 99 | 124 |
| 4. | Pasir berbutir campuran, padat | 30 | 0,43 | 16 | 1,86 | 2,16 | 116 | 135 |
| 5. | Tillglasial, sangat berbutir campuran | 20 | 0,25 | 9 | 2,12 | 2,31 | 132 | 145 |
| 6. | Lempung glasial lunak | 55 | 1,2 | 45 | - | 1,77 | - | 110 |
| 7. | Lempung glasial kaku | 37 | 0,6 | 22 | - | 2,07 | - | 129 |
| 8. | Lempung organik agak kaku | 66 | 1,9 | 70 | - | 1,58 | - | 98 |
| 9. | Lempung organik sangat lunak | 75 | 3,0 | 110 | - | 1,43 | - | 89 |
| 10. | Beton lunak | 84 | 5,2 | 194 | - | 1,27 | - | 80 |

Sumber : (Das, 1995)

Tanah lunak merupakan tanah kohesif yang sebagian besar terdiri dari butir-butir yang sangat kecil atau halus seperti lempung atau lanau. Tanah lempung lunak secara umum mempunyai sifat-sifat sebagai berikut (Gultom, 2022) :

1. Kuat geser rendah
2. Apabila kadar air bertambah maka kuat geser berkurang
3. Apabila struktur tanah terganggu, kuat geser berkurang
4. Apabila basah bersifat plastis dan mudah mampat
5. Apabila kering akan menyusut dan apabila basah akan mengembang
6. Memiliki kompresibilitas yang besar
7. Berubah volumenya dengan bertambahnya waktu akibat rangkakan pada beban yang konstan
8. Merupakan material yang kedap air

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, 2018). Tanah lempung juga dapat diklasifikasikan menurut kadar airnya pada Tabel 2.2 sebagai berikut (Das, 1995) :

Tabel 2.2: Klasifikasi Tanah Lempung Berdasarkan Kadar Air

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

Sumber : (Das, 1995)

Sistem klasifikasi dibuat untuk memberikan informasi tentang karakteristik dan sifat-sifat fisis tanah. Klasifikasi tanah juga berguna untuk studi yang lebih terperinci mengenai kepadatan tanah tersebut serta kebutuhan akan pengujian untuk menentukan sifat teknis tanah seperti karakteristik pemadatan, kekuatan tanah, berat isi dan sebagainya. (Rustam, 2018) Adapun sistem klasifikasi tanah yang telah umum digunakan adalah *Unified Soil Classification System (USCS)* dan *American Assosiation of State Highway and Transporting Official (AASHTO)*. Sistem klasifikasi USCS merupakan sistem yang paling banyak digunakan. Percobaan yang dipakai adalah analisa butiran tanah dan batas cair serta batas plastis (batas-batas *Atterberg*). (Hardiyatmo, 2016). Indeks plastisitas (PI) merupakan interval kadar air dimana tanah masih bersifat plastis, sehingga indeks plastisitas menunjukkan sifat keplastisan suatu tanah. (Das, 1995) Tanah mempunyai PI tinggi maka tanah tersebut banyak mengandung butiran lempung. Dengan demikian nilai PI rendah seperti lanau membuat terjadinya sedikit pengurangan kadar air berakibat tanah menjadi kering. Batasan tentang indeks plastisitas, sifat, macam tanah, dan kohesi berdasarkan batas-batas *Atterberg*. (Hardiyatmo, 2016)

Tabel 2.3: 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, 2016)

Parameter tanah pada Tabel 2.3 di atas dapat dinilai melalui *Modulus Young* (E), *rasio Poisson* (ν), sudut geser dalam (ϕ), dan kohesi (c). *Modulus Young* menunjukkan elastisitas tanah, yang merupakan rasio antara tegangan dan regangan, dan dapat diperoleh melalui pengujian *triaxial*. (Hardiyatmo, 2018) Nilai ini mencerminkan kekakuan material; semakin tinggi nilai E , semakin kecil perubahan bentuk yang terjadi saat diberi tegangan. Secara empiris, nilai modulus elastisitas dapat ditentukan berdasarkan jenis tanah dan data sondir, dengan berbagai pendekatan yang telah diusulkan dalam literatur untuk mengestimasi nilai E dari parameter tanah lainnya. (Hardiyatmo, 2002)

Tabel 2.4: Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah Lempung

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

Nilai *poisson ratio* (ν) ditentukan sebagai rasio kompresi poros terhadap regangan permukaan lateral. Nilai *poisson ratio* (ν) tanah lempung sebagai berikut (Hardiyatmo, 2010):

Tabel 2.5: Hubungan Antara Jenis Tanah dan *Poisson Ratio* (ν)

| Jenis Tanah | <i>Poisson Ratio</i> (ν) |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Lempung jenuh | 0,40 – 0,50 |
| Lempung tak jenuh | 0,10 – 0,50 |
| Lempung berpasir | 0,20 – 0,30 |
| Lanau | 0,30 – 0,35 |
| Pasir padat | 0,20 – 0,40 |
| Pasir kasar ($e= 0,4 - 0,7$) | 0,15 |
| Pasir halus ($e= 0,4 - 0,7$) | 0,25 |
| Batu | 0,10 – 0,40 |
| <i>Loess</i> | 0,10 – 0,30 |

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 2.6. 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 2.7. Korelasi N_{60} Untuk Tanah Kohesif

| | Tanah Kohesif | | | | |
|--------------------------------|------------------|-------------|---------------|--------------|-------------|
| N_{60} (blows) | < 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 | <i>Very soft</i> | <i>soft</i> | <i>medium</i> | <i>stiff</i> | <i>hard</i> |

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 et al., 2004). Nilai-nilai berat jenis dari berbagai jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 2.8 berikut:

Tabel 2.8: 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, 2010)

Nilai modulus elastis tanah dapat dilihat pada Tabel 2.9 berikut (M.Das, 2010):

Tabel 2.9: Modulus Elastisitas Tanah (Das, 1995)

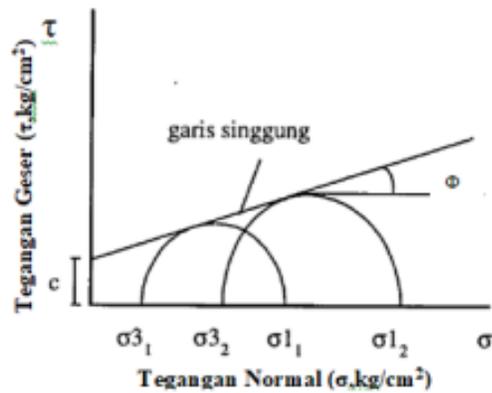
| Jenis Tanah | Es (kN/m ²) |
|---------------|-------------------------|
| Lempung Lunak | 1,800 – 3,500 |
| Lempung Keras | 6,000 – 14,000 |
| Pasir Lepas | 10,000 – 28,000 |
| Pasir Padat | 35,000 – 70,000 |

Untuk nilai *poisson ratio* tanah dapat dilihat pada Tabel 2.10 berikut (M.Das, 2010)

Tabel 2.10: *Poisson Ratio*

| Jenis Tanah | <i>Poisson Ratio</i> (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 |

Lingkaran *Mohr* digunakan untuk mencari parameter dari kekuatan geser tanah itu sendiri yaitu nilai kohesi (C_u) dan sudut geser tanah (ϕ). Pada Gambar 2.1 dijelaskan bagaimana mendapatkan nilai kohesi dan sudut geser tanah yang digunakan sebagai parameter dari kuat geser tanah. Dalam rekayasa geoteknik istilah lunak dan sangat lunak khusus didefinisikan untuk lempung dengan kuat geser diperlihatkan pada Tabel 2.11



Sumber: (Das, 1995)

Gambar 2.1: Lingkaran Mohr

Tabel 2.11: Nilai Kuat Geser

| Konsistensi | Kuat Geser (kN/m ²) |
|--------------|---------------------------------|
| Lunak | 12,5 -25 |
| Sangat Lunak | <12,5 |

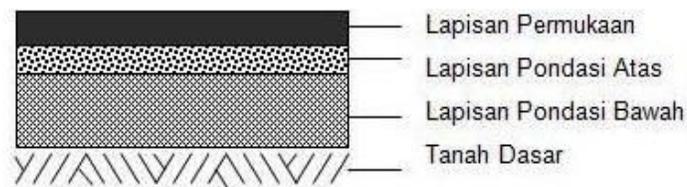
Sumber: (Kimpraswil, 2002)

2.2 Subgrade (Tanah Dasar)

Tanah dasar adalah berupa tanah asli atau tanah galian ataupun berupa tanah timbunan, yang merupakan permukaan dasar untuk perletakan bagian-bagian perkerasan jalan sangat tergantung dari sifat-sifat serta daya dukung dari tanah dasar.

Persoalan yang timbul dapat dicegah sedapat mungkin dengan memperhatikan hal-hal di bawah ini (Hardiyatmo, 2016):

1. Tanah dasar tanpa kohesi
2. Tanah dasar berkohesi
3. Tanah dasar dengan sifat mengembang yang besar
4. Mengusahakan daya dukung tanah dasar yang merata
5. Perbaiki tanah dasar untuk keperluan mendukung beban roda alat-alat besar.



Sumber : (Pasaribu, 2017)

Gambar 2.2: Struktur Lapisan Perkerasan Jalan

Pada pekerjaan pembangunan jalan salah satunya adalah pekerjaan lapisan tanah dasar (*subgrade*), yang merupakan lapisan paling bawah (tanah) yang berfungsi untuk menumpu lapisan perkerasan dan berpengaruh terhadap konstruksi perkerasan jalan di atasnya sehingga *subgrade* sangat berpengaruh terhadap baik buruknya perkerasan jalan. (Rochim & Fitriyana, 2022). Di beberapa proyek pembangunan jalan, tanah yang ada di lokasi tersebut bukan merupakan tanah yang cocok dijadikan sebagai *subgrade* untuk perkerasan jalan, karena jenis tanahnya merupakan tanah lunak (lempung) sehingga cenderung dibuang atau tidak dimanfaatkan. Tanah jika tidak dikenali dan diselidiki secara berhati-hati dapat menyebabkan masalah ketidakstabilan dan penurunan jangka panjang yang tidak dapat ditolerir. (Hendry et al., 2021)

Subgrade (tanah dasar) berfungsi sebagai (Amran & Surandono, 2017):

1. Sebagai lapisan paling bawah pada lapisan perkerasan di atasnya.
2. Sebagai penerima beban akibat berat perkerasan di atasnya ditambah beban akibat muatan kendaraan yang menyebar.

Pada dasarnya persoalan yang menyangkut tentang *subgrade* (tanah dasar) adalah : (Amran & Surandono, 2017)

1. Perubahan bentuk tetap (*permanent of deformation*) dari jenis tanah tertentu akibat beban lalu lintas.
2. Perubahan kadar air yang menyebabkan terjadinya sifat kembang susut dari jenis tanah tertentu.
3. Daya dukung tanah yang tidak merata dan sukar ditentukan secara pasti pada daerah dengan macam tanah yang sangat berbeda sifat dan kedudukannya, atau akibat dari pelaksanaan.

4. Lendutan (*deflection*) dan lendutan balik selama dan sesudah pembebanan lalu lintas dari macam tanah tertentu.
5. Tambahan pemadatan akibat pembebanan lalu lintas dan adanya penurunan, yaitu pada tanah berbutir kasar (*granular soil*) yang tidak dipadatkan secara baik pada saat pelaksanaan.

Analisis kapasitas daya dukung tanah bertujuan untuk mengetahui kemampuan tanah untuk memikul beban yang ada di atasnya. Daya dukung ini dibutuhkan supaya ketika beban bekerja tidak menimbulkan tekanan tanah yang bisa mengakibatkan terjadinya penurunan. (Lestari et al., 2019). Masalah deformasi pada tanah dasar bisa berbentuk penurunan dan pengembangan dari struktur tanah dasar. Hal ini terjadi karena beban lalu lintas yang ada di atasnya. Hal ini telah menjadi perhatian serius seiring dengan meningkatnya arus lalu lintas dan tingkat beban kendaraan. (Carvajal & Romana, 2013)

Tinggi minimum permukaan tanah dasar di atas muka air tanah dan level muka air banjir seperti ditunjukkan pada Tabel 2.10 berikut (Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat, 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 (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 (tanpa dasar normal) | |
| Jalan sedang | 600 | 500 (banjir 10 tahun) |
| Jalan kecil | 400 | NA |

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.

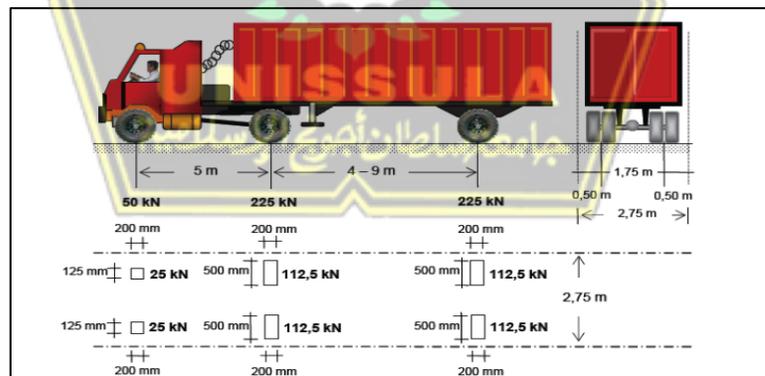
2. Dibentuk dengan benar, sesuai dengan bentuk geometrik jalan.
3. Dipadatkan dengan baik pada ketebalan lapisan sesuai dengan persyaratan.
4. Tidak peka terhadap perubahan air.
5. Mampu mendukung beban lalu lintas pelaksanaan konstruksi.

Timbunan pada tanah lunak harus ditempatkan tidak kurang dari waktu yang ditetapkan berdasarkan Tabel 2.13 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 |

Berdasarkan Direktorat Jenderal Bina Marga, 2016 tentang beban paling maksimum yang akan bekerja pada saat oprit sudah beroperasi adalah beban akibat truk (Beban T), seperti Gambar 2.3 berikut :



Gambar 2.3: Beban Akibat Truk (Beban T)

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

2.3 Mortar Busa

Teknologi mortar busa adalah metode campuran rasio tertentu antara semen, pasir, dengan *foam* (busa). (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, 2015a) Dengan penambahan *foam* pada campuran mortar, maka material campuran akan mengembang hingga sampai dengan 4 kali volume awal sehingga kebutuhan material dapat dikurangi bila dibandingkan dengan material tanpa campuran *foam*. Metode ini dimaksudkan untuk mendapatkan nilai berat isi dan kekuatan dapat direncanakan sesuai kebutuhan. (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan, 2015)

Material ringan mortar busa adalah material menyerupai beton yang terdiri dari campuran material pasir, air, semen dan cairan busa, yang berfungsi sebagai bahan pengganti timbunan tanah dengan densitas kering $6 - 8 \text{ kN/m}^3$, dan kuat tekan bebas minimal 800 kPa. Material ini dapat digunakan sebagai timbunan untuk konstruksi jalan yang dimaksudkan untuk mengurangi beban timbunan (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, 2015a)

2.3.1. Kriteria Material Ringan Mortar Busa

Material ringan mortar busa dengan memanfaatkan *foam* (busa) untuk membentuk timbunan ringan memiliki beberapa kriteria yang harus dipenuhi sebagai berikut (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, 2015b) :

1. Memiliki berat yang ringan, sehingga nilai kepadatan dari material campuran mortar busa tersebut mempunyai nilai densitas $0,5-1,2 \text{ ton/m}^3$.
2. Mempunyai nilai *flow* (kekentalan adukan) yang diindikasikan untuk memudahkan pelaksanaan dilapangan. Nilai *flow* yang diisyaratkan pada pedoman geoteknik umumnya berkisar $180 + 20 \text{ mm}$.
3. Saat pelaksanaan mudah disemprotkan dengan menggunakan alat mesin penyemprot dan dapat padat sendiri, karena berperilaku seperti mortar beton, dimana material campuran tersebut dapat mengeras sesuai dengan waktu pemeraman (*curing time*) yang ditetapkan.

4. Mempunyai kuat tekan yang cukup tinggi sesuai dengan jenis penggunaan konstruksinya, seperti kuat tekannya dalam umur 14 hari mencapai 800 kPa untuk lapis fondasi bawah atau *subbase*.

Selain itu material timbunan ringan mortar busa mempunyai keunggulan-keunggulan sebagai berikut (Fadilah & Hamdhan, 2017):

1. Ringan dan kekuatannya cukup tinggi untuk lapis fondasi bawah atau *subbase*, dimana berat isi dan kuat tekan campuran mortar ini dapat didesain sesuai kebutuhan sehingga dapat dilaksanakan dengan mudah.
2. Karena memiliki pori-pori yang banyak maka memiliki daya rembes yang besar atau mampu melewati air yang dikandungnya tanpa mengalami pemampatan.
3. Kebutuhan material dapat dikurangi disebabkan campuran ini dapat mengembang hingga 4 (empat) kali volume awal.
4. Kemudahan dalam pelaksanaan karena dapat memadat sendiri

2.3.2. Material Ringan Mortar Busa

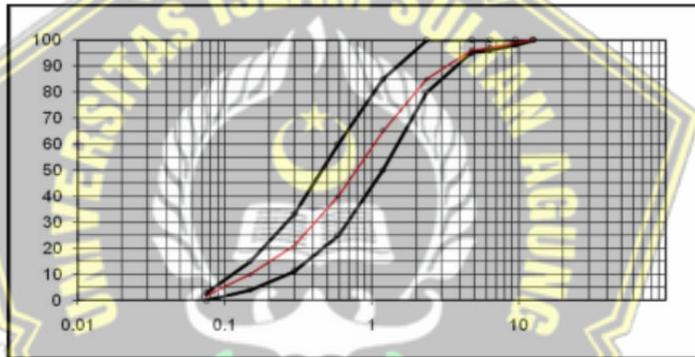
Pada campuran mortar busa, material yang digunakan diharuskan memenuhi kriteria berdasarkan ketentuan sebagai berikut (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, 2015c):

1. Agregat
Agregat yang dimaksud adalah pasir alam (*natural sand*) seperti pasir Sungai, pasir galian atau disebut sebagai pasir mortar berkualitas baik dan memenuhi persyaratan umum/teknis serta persyaratan gradasi. Pasir yang digunakan adalah pasir yang berkualitas baik dan memenuhi persyaratan umum/teknis serta persyaratan gradasi ASTM C 33-97 (1997). Pasir tidak boleh mengandung lumpur, tanah liat dan material-material gembur/mudah hancur (*clay lumps and friable particles*) yang dapat dilihat pada Tabel 2.14 dan Gambar 2.4 berikut :

Tabel 2.14: Persyaratan Pasir

| No | Ukuran Saringan (ASTM) | | % Berat Lolos Saringan | |
|----|------------------------|-------|------------------------|----------|
| | Inc/No | mm | Minimum | Maksimum |
| 1 | ½" | 12,7 | 100 | 100 |
| 2 | 3/8" | 9,51 | 98 | 100 |
| 3 | ¼" | 6,35 | 96 | 100 |
| 4 | No. 4 | 4,76 | 95 | 100 |
| 5 | No. 8 | 2,36 | 80 | 100 |
| 6 | No. 16 | 1,19 | 50 | 85 |
| 7 | No. 30 | 0,595 | 25 | 60 |
| 8 | No. 50 | 0,297 | 11 | 33 |
| 9 | No. 100 | 0,149 | 4 | 15 |
| 10 | No. 200 | 0,075 | 0 | 3 |

Sumber : (American Concrete Institute, 1997)



Sumber : (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan, 2015)

Gambar 2.4: Grafik Gradasi Batasan Pasir untuk Mortar Busa

2. Air

Air yang digunakan dalam pekerjaan harus air bersih, tawar (pH air > 5,5) dan bebas dari minyak, bahan-bahan organik atau bahan-bahan/zat-zat lainnya. Besar kandungan sulfat dan *chloride* dalam air tersebut tidak boleh melebihi batas-batas yang telah ditentukan sesuai dengan spesifikasi yang bisa merusak mutu dan kekuatan material mortar busa seperti yang sudah ditentukan dan harus memenuhi ketentuan yang disyaratkan dalam SNI 06-1140-1989. Air adukan pada timbunan jalan menggunakan material mortar

busa tidak boleh mengandung butir-butir zat padat dari 0,20% dan tidak boleh mengandung larutan garam lebih dari 1,5%

3. *Portland Composite Cement* (PCC) sering juga disebut semen *portland* komposit. Material ini merupakan jenis material yang berfungsi sebagai pengikat hidrolis. Sifat-sifat yang dimiliki *Portland Composite Cement* (PCC) adalah :

- a. Memiliki kondisi panas hidrasi dari rendah hingga sedang
- b. Relatif lebih tahan terhadap sulfat
- c. Hasil tekan awal kurang, namun hasil tekan akhir bisa lebih tinggi

Semen ini merupakan semen yang termasuk kedalam *Blended Cement* atau semen campur. Menurut SK SNI T-15-1991-03:2 membagi jenis semen *portland* kedalam lima jenis yaitu :

- a. Type I yaitu semen pada saat pelaksanaan pekerjaan tanpa diperlukannya perlakuan tertentu
- b. Type II yaitu semen pada saat pelaksanaan membutuhkan ketahanan dengan senyawa sulfat serta mempunyai nilai panas hidrasi yang sedang
- c. Type III yaitu semen pada saat pelaksanaan membutuhkan kekuatan awal yang tinggi
- d. Type IV yaitu semen pada saat pelaksanaan membutuhkan panas hidrasi yang rendah
- e. Type V yaitu semen *portland* pada saat pelaksanaan membutuhkan ketahanan yang tinggi terhadap sulfat



Gambar 2.5: *Portland Composite Cement (PCC)*

Sumber : Dokumentasi Penelitian

4. *Foam Agent*

Foam agent merupakan cairan yang apabila dicampur dengan air dan diberikan tekanan udara tertentu akan membentuk busa yaitu senyawa kimia dominan yang teridentifikasi dalam cairan pembentuk busa diantaranya: *1-dodecanol*, *methoxyacetic acid tridecylester* dan *1-tetradecanol* dapat juga disebut cairan *surfactant* yang memiliki karakteristik kimia yang hampir sama dengan air. Fungsi dari *foam agent* ini adalah untuk menstabilkan gelembung udara selama pencampuran dengan cepat dan mendapatkan campuran mortar dengan berat isi yang ringan serta dapat didesain sesuai dengan rencana. Cairan busa yang digunakan harus dapat menghasilkan gelembung dengan nilai berat isi sebesar $0,075-0,085 \text{ t/m}^3$ bila bercampur dengan air menggunakan alat pembangkit busa (*foam generator*). Pemanfaatan *foam* (busa) untuk membentuk material ringan dapat diperoleh kriteria-kriteria mempunyai berat yang ringan sehingga nilai berat isi (*density*) dari material campuran atau mortar tersebut mempunyai berat isi $5-12 \text{ kN/m}^3$. Nilai *flow* (*flowability*) pada *foam* (busa) diindikasikan untuk memudahkan pelaksanaan dilapangan bila menggunakan alat penyemprot sehingga mencapai jarak yang ideal, nilai *flow* umumnya berkisar $180 \pm 20 \text{ mm}$. Pelaksanaan pekerjaan timbunan dengan mortar busa yaitu mudah disemprotkan bila menggunakan alat mesin penyemprot dan dapat

memadat sendiri karena berperilaku seperti mortar beton dimana material campuran tersebut mengeras sesuai dengan waktu pemeraman (*curing*) yang ditetapkan. *Foaming agent* dapat dilihat pada Gambar 2.6 berikut :



Gambar 2.6: *Foam Agent*

Sumber : Dokumentasi Penelitian

2.3.3 Kuat Tekan Bebas

Kuat tekan bebas adalah besarnya beban persatuan luas yang menyebabkan benda uji tekan beton hancur bila dibebani gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin tekan. Kuat tekan beton tergantung pada antara lain: faktor air semen, gradasi batuan, bentuk batuan, ukuran maksimum batuan, cara pengerjaan (campuran, pengangkutan, pemadatan dan perawatan) dan umur beton (Zulnasri et al., 2021)

Perhitungan kuat tekan mortar busa menggunakan persamaan

$$f'c = \frac{p}{A} \quad (2.1)$$

Dimana :

$f'c$ = Kuat tekan mortar, dalam MPa

P = Beban maksimum total, dalam N

A = Luas permukaan yang dibebani, dalam mm^2



Gambar 2.7: Uji Kuat Tekan Bebas

Sumber : Dokumentasi Penelitian

Agar menghasilkan material ringan yang memenuhi persyaratan, maka dibuat desain timbunan ringan dengan mortar busa untuk bangunan jalan dengan kriteria desain seperti tampak pada Tabel 2.15 di bawah ini :

Tabel 2.15: Kriteria Desain Mortar Busa

| No. | Desain Mix Formula | Kuat Tekan Minimum 14 hari | |
|-----|---|----------------------------|--------------------|
| | | kPa | Kg/cm ² |
| 1 | Lapis fondasi bawah atau <i>subbase</i> | 800 | 8 |
| 2 | Lapis fondasi atau <i>base</i> | 2.000 | 20 |

Sumber : (Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, 2015b)

Pada tabel diatas diketahui bahwa kriteria desain mortar busa untuk bangunan jalan pada umur 14 hari kuat tekan bebas yang dipersyaratkan untuk lapis fondasi bawah (*subbase*) adalah 800 kPa atau 8 kg/cm². Dan untuk lapis fondasi (*base*) kuat tekan bebas yang dipersyaratkan adalah 20 kg/cm².

Untuk parameter lain seperti modulus elastisitas (E_c) dapat ditentukan dengan persamaan yang didapat dalam ACI-8.5.1 sebagai berikut (American Concrete Institute (ACI) 318, 2019) :

$$E_c = 0.043 \times W_c^{1.5} \sqrt{f'c} \quad (2.2)$$

Keterangan :

E_c = Modulus elastisitas mortar busa (MPa)

W_c = Densitas kering mortar busa (kg/m^3)

f'_c = Kuat tekan umur 14 hari (MPa)

Sedangkan nilai poisson ratio berkisar antara 0,1 - 0,2 (Gere & Timoshenko, 1997)

2.4 Geotekstil

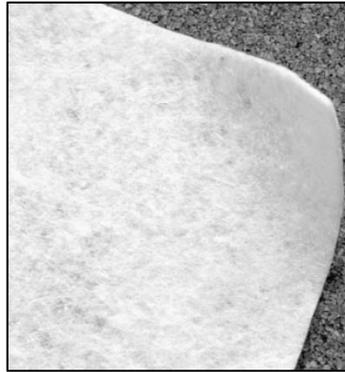
Geotekstil adalah bagian dari geosintetik, merupakan suatu bahan *polymer* yang digunakan dalam struktur berhubungan dengan tanah, batuan atau rekayasa geoteknik. Secara karakteristik umumnya geotekstil terbuat dari bahan yang kuat, awet dan tahan terhadap terjadinya kerusakan dari reaksi kimia, faktor causaha dan penuaan. (Hardiyatmo, 2023).

Polymer yang digunakan pabrik geotekstil, umumnya fiber-fiber geotekstil yang dibuat dari material *polymetrik* sebagai berikut : (Koerner, 2005) :

1. *Polypropylene* (PP) ($\pm 92\%$)
2. *Polyester* (5%) ($\pm 5\%$)
3. *Polyamide* (PA) ($\pm 2\%$)
4. *Polyethlylene* (PE) ($\pm 1\%$)

Berbagai macam bentuk geotekstil ((Hardiyatmo, 2023):

1. Geotekstil anyam (*woven*), yang dibuat dari serat-serat (*fibers*) seperti kawat memanjang tunggal.
2. Geotekstil anyam (*woven*), yang dibuat dari serat-serat pipih yang tipis memanjang.
3. Geotekstil nir-anyam (*non woven*) yang dibuat dari serat-serat serabut mekanis disusun seperti benang kusut (seperti bakmi) sehingga terbentuk material berbulu yang relatif tebal.



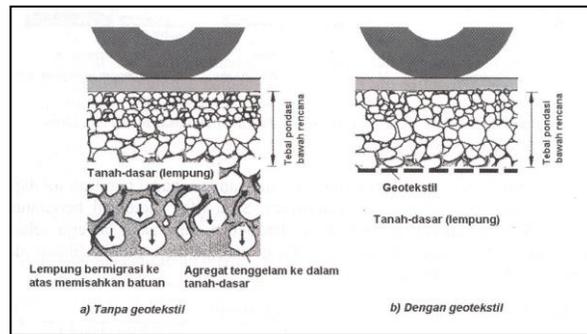
Sumber : (Karen S et al., 2013)

Gambar 2.8: Geotekstil

4. Geotekstil nir-anyam (*non woven*) seperti Gambar 2.8 terbuat dari serat-serata yang dibuat pola acak dan kemudian digabung-gabungkan pada titik seberangnya melalui proses pemanasan atau ikatan kimia dan ditekan dengan penggilas sampai tebalnya relatif tipis.

Terdapat banyak pemakaian aplikasi geotekstil, baik anyam maupun nir anyam, dalam rekayasa geoteknik, aplikasi geotekstil tersebut meliputi: (Hardiyatmo, 2023)

1. Drainase : Serat yang dengan cepat menyalurkan air dari tanah keluar dan dengan demikian dapat memberikan kekuatan geser tanah dan juga mempertahankan stabilitasnya.
2. *Filtrasi* : Penempatan diantara dua lapisan tanah, dengan salah satu butiran kasar dan yang lain halus, maka serat memungkinkan kondisi tidak terjadi kebocoran dari satu lapisan ke lapisan yang lain.
3. Pemisah : geotekstil ini berfungsi memisahkan berbagai lapisan tanah setelah pelaksanaan konstruksi dan selama masa pelayanan konstruksi. Misalnya, didalam konstruksi jalan raya, tanah dasar lempung perlu dipisahkan dari agregat lapis pondasi bawah seperti terlihat pada Gambar 2.9 dibawah ini :



Sumber : (Koerner, 2005)

Gambar 2.9: Geotekstil sebagai pemisah

4. Perkuatan : kekuatan tarik dari geotekstil dapat meningkatkan beban yang bekerja dan meningkatkan kapasitas daya dukung tanah

2.5 Settlement (Penurunan)

Penurunan tanah pada timbunan *subgrade* perlu dikaji dan diperhatikan agar dapat diketahui sejauh mana kekokohan dari konstruksi terhadap terjadinya pembebanan di atasnya. (Islam et al., 2022)

Penurunan tanah pasca konstruksi sebesar 0,3 m – 0,6 m selama umur rencana jalan. Umumnya dapat ditoleransi asalkan penurunan tersebut seragam, terjadi secara perlahan selama waktu tertentu. Apabila pascakonstruksi penurunan terjadi dalam jangka waktu lama, maka kerusakan perkerasan yang disebabkan penurunan dapat diperbaiki ketika perkerasan dilapis ulang (Kadela et al., 2017).

Pada saat tanah dibebani, terjadi regangan pada tanah tersebut. Regangan ini disebut dengan penurunan (*settlement*). Berkurangnya rongga pori/air didalam lapisan tanah menyebabkan berubahnya susunan tanah, hal ini yang menyebabkan terjadinya regangan. (Hardiyatmo, 2016)

Menurut (Hardiyatmo, 2016) penurunan yang terjadi pada tanah terdiri dari :

1. Penurunan konsolidasi/primer (*Primary Consolidation*)

Merupakan pemampatan yang terjadi akibat perubahan volume pada tanah kohesif jenuh air karena keluarnya air dari pori-pori tanah. Proses penurunan konsolidasi terjadi apabila lapisan tanah jenuh mengalir kelapisan tanah dengan mengakibatkan air pada lapisan tanah jenuh

mengalir kelapisan tanah dengan tekanan air pori yang lebih rendah. Permeabilitas yang rendah mengakibatkan proses ini membutuhkan waktu yang cukup lama

2. Penurunan Rangkak/Sekunder (*Secondary Consolidation*)

Merupakan pemampatan yang terjadi akibat penyesuaian sifat plastis dari partikel tanah pada tanah kohesif jenuh air. Umumnya penurunan ini terjadi setelah tekanan air pori hilang seluruhnya. Penurunan rangkak terjadi seiring berjalannya waktu dan biasanya dibutuhkan waktu yang sangat lama setelah beban mulai bekerja

3. Penurunan Seketika (*Immediate Settlement*)

Merupakan pemampatan yang terjadi akibat perubahan elastis dari partikel tanah tanpa adanya perubahan kadar air. Perhitungan penurunan ini didasarkan pada teori elastisitas. Penurunan ini umumnya terjadi pada masa konstruksi dan akan berakhir dalam waktu singkat. Penurunan seketika biasanya hanya terjadi pada pasir lepas sedangkan tanah lempung penurunan seketika jarang terjadi, sehingga penurunan seketika sering tidak diperhitungkan untuk tanah lempung. Penurunan seketika untuk pondasi di atas tanah dapat dirumuskan berdasarkan prinsip teori elastisitas.

Kriteria penurunan timbunan dikelompokkan berdasarkan kelas jalan seperti Tabel 2.16 berikut : (Pusat Litbang Prasarana Transportasi, 2002)

Tabel 2.16: 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, 2002)

Keterangan :

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

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

Faktor keamanan pada timbunan harus diambil untuk kondisi jangka pendek selama masa pelaksanaan dari faktor keamanan seperti pada Tabel 2.17 di bawah ini (Kementerian PUPR, 2002):

Tabel 2.17: Faktor Keamanan untuk Analisa Stabilitas

| No | Kelas jalan | Faktor Keamanan |
|----|-------------|-----------------|
| 1. | I | 1,4 |
| 2. | II | 1,4 |
| 3. | III | 1,3 |

Menurut (Janbu et al., 1956b) Perhitungan rata-rata penurunan segera (S_i) pada beban terbagi rata 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 berdasarkan grafik μ_1 dan μ_0 dapat dilihat persamaan berikut :

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

Dimana :

S_i = Penurunan segera rata-rata

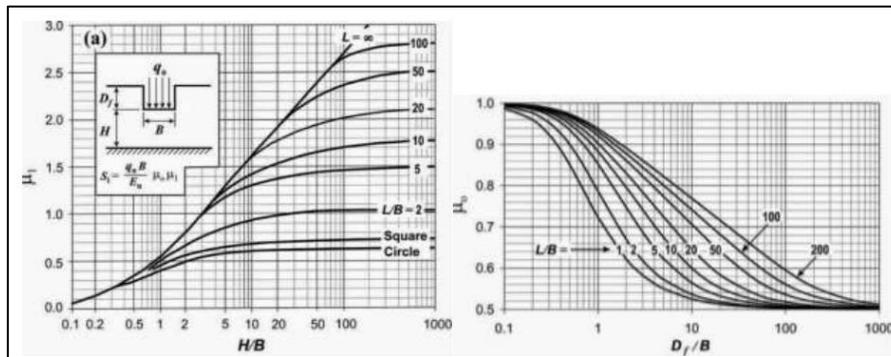
μ_1 = Faktor koreksi kedalaman pondasi D_f

μ_0 = Faktor koreksi untuk lapisan tebal terbatas (H)

B = Lebar pondasi

q_n = Tambahan tegangan *netto*

E = Modulus elastisitas



Gambar 2.10: Grafik untuk Mendapatkan Nilai μ_1 dan Nilai μ_0 (Janbu et al., 1956b)

Gambar 2.10 di atas digunakan untuk nilai modulus E yang bervariasi dengan kedalamannya, yaitu dengan mengganti sistem tanah berlapis sebagai suatu lapisan-lapisan fiktif yang terletak pada lapisan yang keras. Perhitungan besarnya penurunan seketika dilakukan dengan membagi tanah kedalam beberapa lapisan terbatas. Jika tegangan pada tiap lapisan dapat dihitung, maka akan dapat diperoleh penurunan seketika totalnya. (Holtz & Kovacs, 1981)

2.6 Gaya Angkat Hidrostatik (*Hydrostatic Uplift*)

Stabilitas suatu struktur atau lapisan tanah dengan permeabilitas rendah terhadap gaya angkat harus diperiksa dengan membandingkan gaya permanen untuk menstabilkan (sebagai contoh, beban dan friksi kulit) terhadap gaya permanen yang membuat tidak stabil yaitu air dan gaya lainnya (Kimpraswil, 2002)

Perencanaan timbunan harus mempertimbangkan keruntuhan akibat gaya angkat dengan prinsip gaya yang membuat tidak stabil dan gaya vertikal yang bekerja adalah kurang dari atau sama dengan gaya yang menstabilkan atau tahanan yang bekerja. Gaya vertikal sebagai contoh adalah berat struktur atau berat timbunan, sedangkan tahanan yang berkerja adalah gaya-gaya gesek dan/atau gaya ankur. Angkur dalam hal ini merupakan opsi permanen untuk menahan gaya angkat. Adapun opsi-opsi umum yang direkomendasikan untuk menahan gaya angkat hidrostatik, adalah (The British Standard, 2004):

1. Menambah berat timbunan
2. Mengurangi tekanan air di bawah timbunan dengan drainase

3. Melakukan pengangkatan pada lapisan bawah timbunan

Perhitungan faktor keamanan terhadap gaya tekan hidrostatik didalam pedoman ini memberikan nilai FK minimum terhadap gaya angkat untuk kondisi non kritis sebesar 1,3 dan pada kondisi kritis sebesar 1,1 (U S Army Engineering and Design, 2003)

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. Rumus untuk mendapatkan nilai Faktor Keamanan terhadap pergerakan vertikal struktur timbunan akibat kenaikan permukaan air tanah adalah (Stark et al., 2004):

$$FK = \frac{\sum N}{\sum K} \quad (2.4)$$

Dimana :

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

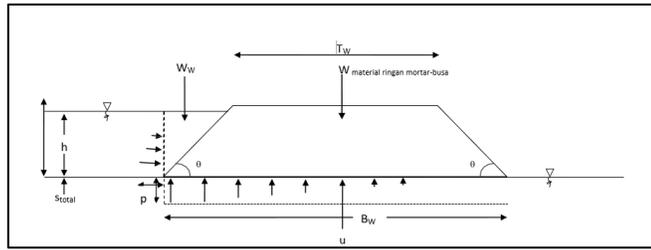
$\sum U$ = Total dari gaya angkat air pada bagian bawah timbunan

$W_{\text{mortar busa}}$ = Berat timbunan mortar busa

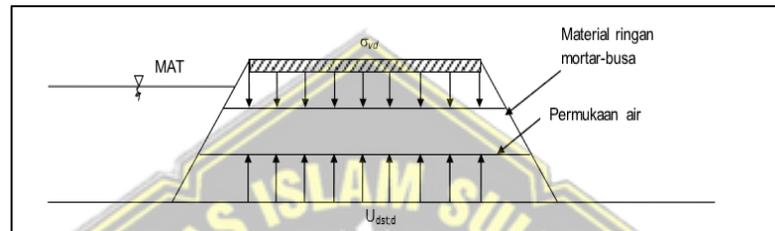
$W_{\text{air}}, W'_{\text{air}}$ = Komponen vertikal dari berat air, di kedua sisi timbunan

Stabilitas struktur di atas lapisan tanah dasar dengan permeabilitas rendah harus mempertimbangkan gaya angkat (*uplift*) akibat tekanan hidrostatik dengan membandingkan upaya stabilisasi permanen (sebagai contoh, berat dan tahanan geser) terhadap gaya permanen yang bekerja, seperti air, tanah atau sumber lainnya.

Mortar busa yang digunakan sebagai material ringan untuk timbunan memiliki berat isi yang rendah sehingga berpotensi untuk mengalami pengangkatan ke atas. Dengan demikian perlu mempertimbangkan stabilitas eksternal pada lapis antarmuka (*interface*) antara bagian bawah timbunan dengan tanah dasar. Gambar 2.11 di bawah ini memperlihatkan variabel-variabel untuk analisis gaya angkat ke atas pada situasi saat air hanya menekan satu sisi timbunan, serta memperlihatkan situasi saat air menekan kedua sisi timbunan saat banjir.



Gambar 2.11: Variabel untuk Analisis Gaya Angkat Hidrostatik pada Situasi Saat Air Hanya Menekan Satu Sisi Timbunan (Arellano et al., 2010)



Gambar 2.12: Gaya Angkat Timbunan Ringan Akibat Tekanan Air dari Kedua Sisi (The British Standard, 2004)

Distribusi tekanan hidrostatik di bawah timbunan tidak selamanya berbentuk segitiga tapi bervariasi tergantung kondisi di lapangan. Distribusi tekanan hidrostatik juga tidak memperhitungkan rembesan. Pada Gambar 2.12 menjelaskan jika tekanan air berasal dari kedua sisi timbunan dan tingginya sama, maka distribusi tekanan hidrostatik di bawah timbunan akan berbentuk segiempat, bukan segitiga. (Holtz & Kovacs, 1981)

Penurunan jangka panjang memberikan pengaruh besar terhadap faktor keamanan terhadap gaya angkat hidrostatik, karena itu perlu dimasukkan kedalam perhitungan gaya angkat U . Tekanan air P diperoleh dari akumulasi tinggi vertikal air pada akhir konstruksi ditambah penurunan total yang diperkirakan. $h + S_{tot}$ serta hasil dari distribusi tekanan disisi timbunan, dengan besaran yang dinyatakan sebagai berikut :

$$\frac{1}{2} [\gamma_w \cdot B_w (h + S_{tot})] \quad (2.5)$$

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

$$FK = \frac{W_{mortar\ busa} + W_{air} + W'_{air} + O_{REQ}}{\gamma_w \times (h + S_{total}) \times B_w} \quad (2.6)$$

Dimana :

O_{REQ} = Gaya *overburden* tambahan yang dibutuhkan di atas timbunan mortar busa untuk mencapai target faktor keamanan terhadap gaya angkat hidrostatis seluruh timbunan

γ_w = Berat isi air (kN/m³)

S_{total} = Perkiraan penurunan total (m)

h = Permukaan air (m)

B_w = Lebar dasar timbunan (m)

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 et al., 2004):

$$U = \gamma_w \times B_w \times (h + S_{total}) = \gamma_w \times B_w \times (h' + S_{total}) \quad (2.7)$$

Berat struktur di atas mortar busa dapat dihitung sebagai berikut (Stark et al., 2004):

$$W = \gamma \times t \times l \quad (2.8)$$

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 :

$$O_{REQ} < W \quad (2.9)$$

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 O_{REQ} yang diperlukan untuk memenuhi faktor keamanan 1,2 dapat dihitung dengan persamaan berikut (Stark et al., 2004) :

$$O_{REQ} = [1,2 (\gamma_w \times (h + S_{total}) \times B_w)] - [(W_{mortar\ busa} + W_{air} + W'_{air})] \quad (2.10)$$

Menghitung beban mortar busa dan beban air yang bekerja dapat digunakan persamaan berikut (Stark et al., 2004):

$$W_{\text{mortar busa}} = \frac{H(l_{\text{atas}} + l_{\text{bawah}})}{2} \times \gamma_d \quad (2.11)$$

$$W_{\text{air}} = \frac{1}{2} (h + S_{\text{total}}) \left(\frac{sh}{sv} \right) (h + S_{\text{total}}) \times \gamma_{\text{air}} \quad (2.12)$$

Dimana :

l_{atas} = Lebar timbunan mortar busa bagian atas (m)

l_{bawah} = Lebar timbunan mortar busa bagian bawah (m)

γ_d = Berat jenis kering mortar busa (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 :

$$h + S_{\text{total}} \text{ dan } h' + S_{\text{total}} \quad (2.13)$$

Dimana :

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

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

S_{total} = Penurunan total (m)

Tekanan air yang dihasilkan menjadi :

$$\gamma_w (h + S_{\text{total}}) \text{ dan } \gamma_w (h' + S_{\text{total}}) \quad (2.14)$$

Dimana :

γ_w = Berat jenis air (N/m³)

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. Stabilitas Daya Dukung Timbunan Mortar Busa

Evaluasi daya dukung tanah dasar diperlukan untuk mengetahui kemampuan tanah dasar di bawah timbunan bermaterial ringan dalam menerima beban yang bekerja. Apabila terjadi keruntuhan daya dukung, maka timbunan dapat mengatasi penurunan vertikal yang dapat mempengaruhi struktur. 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. Kapasitas daya dukung ultimit dapat mengacu ke persamaan umum Terzaghi (Braja M.Das, 2015)

$$q_u = S_u N_c + \gamma b D_f \quad (2.15)$$

Dimana :

$S_u=c$: Kuat geser tanah

N_c : Faktor ketahanan geser daya dukung

γb : Berat volume tanah (kN/m^3)

D_f : Kedalaman timbunan (m)

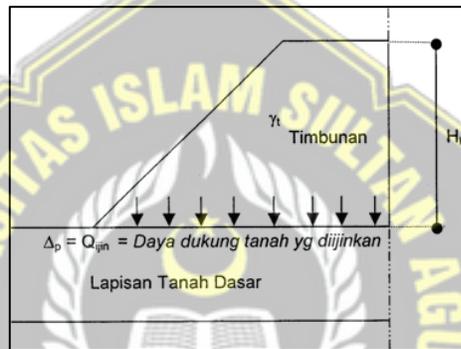
Untuk nilai faktor daya dukung N_c , N_q , dan N_γ ditampilkan pada Tabel 2.18 berikut (M.Das, 2010):

Tabel 2.18. Faktor Daya Dukung Analisis Terzaghi (Braja M.Das, 2015)

| 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 |

| ϕ | Nc | Nq | N γ | ϕ | Nc | Nq | N γ |
|--------|-------|-------|------------|--------|--------|--------|------------|
| 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 |
| 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 | | | | |

Gambar 2.13 di bawah ini memperlihatkan ilustrasi perhitungan daya dukung :



Gambar 2.13: Ilustrasi Perhitungan Daya Dukung Tanah (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2024)

Faktor aman dari daya dukung tanah berdasarkan persamaan berikut :

$$FK = \frac{q_u}{q_a} \quad (2.16)$$

Dimana :

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

$S_{n_{mortar\ busa}}$ = Tegangan normal yang diberikan oleh beban mortar busa pada permukaan tanah (kPa)(Stark et al., 2004):

$$S_{n_{mortar\ busa}} = \gamma_{mortar\ busa} \cdot T_{mortar\ busa} \quad (2.17)$$

Dimana :

$\gamma_{mortar\ busa}$ = Berat jenis mortar busa (kN/m³)

$T_{mortar\ busa}$ = Tebal atau tinggi mortar busa (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):

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_B \quad (2.18)$$

Dimana:

$\Delta\sigma_z$ = Tambahan tegangan vertikal pada lapisan yang ditinjau (kN/m^2)

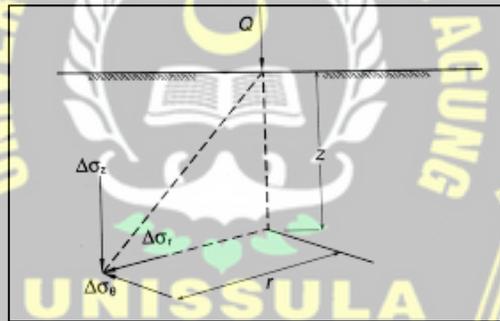
Q = Beban terpusat (kN)

Z = Kedalaman lapisan yang ditinjau (m)

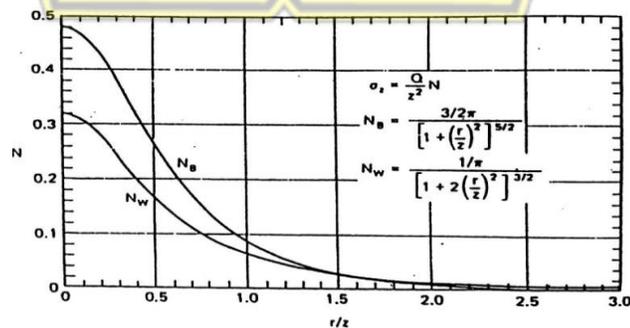
I_B = Faktor pengaruh, bergantung pada nilai r/z

R = Jarak dari pusat beban yang ditinjau

Nilai I_B disajikan dalam bentuk grafik ditampilkan pada Gambar 2.14 di bawah ini, nilai pengaruh I_B untuk teori Boussinesq digambarkan bersama-sama dengan faktor pengaruh beban titik (I_w) untuk teori Westergaard.



Gambar 2.14: Tambahan Tegangan Akibat Beban Titik (Beban Terpusat)



Gambar 2.15: Faktor Pengaruh untuk Beban Titik Didasarkan Teori Boussinesq (I_B) dan Teori Westergaard (I_w) (Taylor,1948)

2.8. Gaya Berat

2.8.1. Hukum Archimedes

Hukum Archimedes menjelaskan hubungan antara gaya berat dan gaya ke atas (gaya apung) pada suatu benda jika dimasukkan ke dalam fluida. Akibat adanya gaya angkat ke atas (gaya apung), benda yang ada di dalam fluida, beratnya akan berkurang. Sehingga, benda yang diangkat di dalam fluida akan terasa lebih ringan dibandingkan ketika diangkat di darat. Gaya apung berdasarkan Hukum Archimedes yang dirumuskan sebagai berikut :

$$F_a = \rho \cdot g \cdot V \quad (2.19)$$

Dimana :

- F_a = Gaya tekan keatas (N)
- ρ = Massa jenis zat cair (kg/m³)
- g = Gravitasi satuan (m/s²)
- V = Volume benda yang tercelup (m³)

Hukum Archimedes mengelompokkan benda menjadi 3 jenis yaitu :

1. Kondisi benda tenggelam

Benda disebut tenggelam dalam zat cair apabila posisi benda selalu terletak pada dasar tempat zat cair berada.

Pada kondisi seimbang maka $W = N + F_a$

sehingga:

$$W > F_a \quad (2.20)$$

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

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

$$\rho_b > \rho_f$$

2. Kondisi benda melayang

Benda melayang dalam zat cair apabila posisi benda di bawah permukaan zat cair dan di atas dasar tempat zat cair berada.

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

$$W = F_a \quad (2.21)$$

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

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

$$\rho_b = \rho_f$$

3. Kondisi Benda terapung

Benda terapung dalam zat cair apabila posisi benda sebagian muncul di permukaan zat cair dan sebagian terbenam dalam zat cair.

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

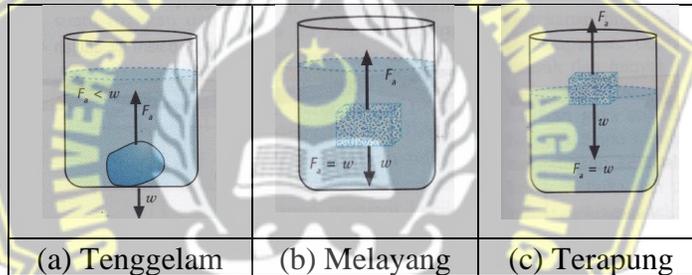
$$W < F_a \tag{2.22}$$

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

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

$$V_1 < V_2$$

$$\rho_b < \rho_f$$



Gambar 2.16: Kondisi Benda pada Berbagai Keadaan

2.8.2. Hukum Newton 2

Hukum Newton 2 menyatakan percepatan sebuah benda berbanding lurus dengan gaya total yang bekerja terhadapnya, tetapi berbanding terbalik dengan massanya. Arah percepatan akan sama dengan arah gaya total yang bekerja terhadapnya. Hukum Newton 2 disebut juga Hukum Gerak. Gaya benda menjadi semakin besar ketika mendapatkan dorongan gaya searah laju arah benda tersebut. Sebaliknya, jika diberikan gaya berlawanan (gaya tolak) melawan gaya benda itu, laju gaya akan melambat atau mengecil karena terjadi perubahan kecepatan dan laju. Besar kecilnya perlambatan atau percepatan yang diberikan pada benda akan mempengaruhi arah gerak benda.

Rumus Hukum Newton 2 adalah sebagai berikut :

$$F = m \cdot g \quad (2.23)$$

Dimana :

F = Gaya yang bekerja pada benda (N)

m = Massa benda (kg)

g = Gravitasi (9,8 m/dt²)

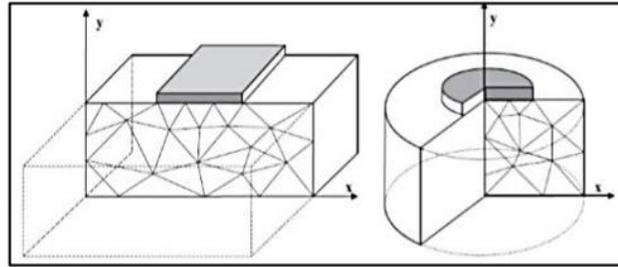
2.9. Metode Elemen Hingga (*Plaxis*)

Metode elemen hingga (*Plaxis*) adalah program analisis geoteknik menggunakan metode elemen hingga yang mampu melakukan analisis yang dapat mendekati perilaku sebenarnya. Geometri tanah yang akan dianalisis memungkinkan untuk diinput dengan cukup teliti. (Hidayat et al., 2016)

Plaxis dilengkapi fitur-fitur khusus yang berhubungan dengan banyak aspek dari struktur geometri yang kompleks. Permasalahan geoteknik membutuhkan suatu model untuk mensimulasi perilaku non-linear suatu tanah dan pengaruh waktu. *Plaxis* memberikan beberapa pilihan model dalam memecahkan masalah. *Plaxis* juga menyediakan berbagai analisis tentang *displacement*, tegangan dan regangan yang terjadi pada tanah, faktor keamanan dan lain-lain. (Hidayat et al., 2016)

Plaxis 2D merupakan program elemen hingga dua dimensi yang dikembangkan untuk analisis deformasi, stabilitas dan aliran air tanah dalam rekayasa geoteknik. Program ini dilengkapi dengan fitur untuk menangani berbagai aspek struktur geoteknik dan proses konstruksi menggunakan prosedur komputasi. (Robbani & Ikhyia, 2019)

Langkah awal yang dilakukan adalah melakukan pemodelan menggunakan model regangan bidang (*plane strain*) atau *axisymmetry* sesuai kasus yang akan dianalisis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17 di bawah ini :



Sumber : (*Plaxis* 2016a dalam (Robbani & Ikhya, 2019))

Gambar 2.17: Contoh Regangan Bidang *Plane Strain* dan *Axisymmetry*

Dalam keadaan tegangan umum, model tegangan regangan berperilaku linear dalam rentang elastis. *Mohr-Coulomb* menghasilkan permukaan pada ruang tegangan utama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17. Parameter tanah yang digunakan dalam *Mohr-Coulomb* model yaitu E (modulus elastisitas *Young's*), ν (poisson's ratio), ϕ (sudut geser tanah), c (kohesi tanah), dan ψ (sudut dilatasi). (*Plaxis* 2016a dalam (Robbani & Ikhya, 2019))

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 (Gultom et al., 2022)

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 (Gultom et al., 2023a).

Penggunaan *Modulus Young* dan angka *Poisson* menyajikan perilaku tanah dasar 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 (Gultom et al., 2023b)

Jenis model *Mohr-Coloumb* seperti Gambar 2.18 sangat direkomendasikan sebagai analisis pertama dari setiap masalah yang akan dibahas. Setiap lapisan tanah harus dirata-ratakan 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 (Gultom et al., 2023a).

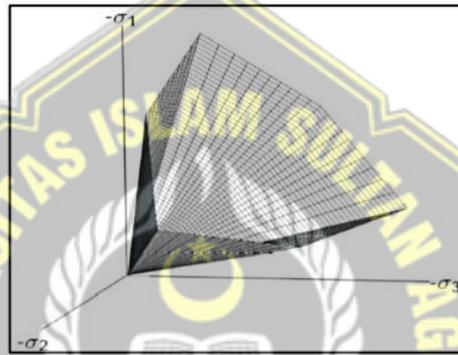
Lines digunakan untuk mengekspresikan ikatan geometri, model, dan diskontinuitas pada geometri seperti dinding, lempengan, dan lain-lain. *Lines* dapat memiliki beberapa fungsi dan metrial yang berbeda. *Cluster* adalah area tertutup yang sepenuhnya dibatasi oleh garis. Dalam satu *cluster* hanya terdapat satu material (homogennya). *Cluster* dapat diaplikasikan sebagai lapisan atas. Proses simulasi dalam *Plaxis* terdiri 3 tahap yaitu (Gultom, 2022):

1. Model *Input data*
Membuat 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 berlangsung secara otomatis dalam *Plaxis*. Jumlah elemen yang dihasilkan tergantung pada pemilihan tingkat kekasaran (kekasaran global).



Sumber : (*Plaxis* 2016a dalam (Robbani & Ikhya, 2019))

Gambar 2.18: Kurva *Mohr-Coulomb Soil Model*

2.10. Korelasi dan Regresi

Fungsi korelasi untuk mengetahui derajat atau keeratan hubungan dan untuk mengetahui arah hubungan variabel numerik. Simbol 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 2.19 berikut (Sugiyono, 2007):

Tabel 2.19: 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 |

Regresi yaitu untuk membuat suatu prediksi dari nilai suatu variable (*variable dependen*) melalui variabel 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 variabel yang ditentukan dan variabel yang menentukan. Kedua variabel 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 variabel semakin kuat. $R^2 = 0$ maka antara variabel tidak memiliki pengaruh. R^2 semakin kecil maka pengaruh hubungan antara variabel 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 2.20: 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 |

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 dan Y). Pada umumnya dalam grafik, variabel *independent* (X) diletakkan pada garis horizontal, 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)

2.11. Penelitian Terdahulu

Berikut Tabel 2.21 yang menjelaskan tentang penelitian-penelitian terdahulu yang relevan

Tabel 2.21: Penelitian-Penelitian yang Relevan

| No | Judul Paper, Tahun, Author | Author dan Tahun | Tujuan | Metode Riset | Hasil Riset |
|----|---|----------------------------|---|---|---|
| 1. | <i>Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high-speed railway roadbed</i> <i>Construction and Building Materials</i> 170 (2018) 153–166 | (She et al., 2018) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Untuk mempelajari potensi penggunaan beton busa sebagai bahan pengisi ringan untuk jalan kereta api kecepatan tinggi. ▪ Menganalisis pengaruh abu layang kasar terhadap <i>workability</i>, <i>mechanical</i>, <i>shrinkage performance</i> dan durabilitas beton busa | Menggunakan X-ray Computed Tomography (XCT) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Menunjukkan bahwa <i>fly ash</i> kasar meningkatkan banyak sifat beton busa, termasuk kemampuan kerja dan sifat mekanik dan tahan beku cair, ▪ Adanya hubungan linier yang baik antara konten halus dan koefisien penyerapan |
| 2. | <i>Mechanical Characterization of Lightweight Foamed Concrete</i> <i>Advances in Materials Science and Engineering</i> | (Kozłowski & Kadela, 2018) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 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 beton normal. |

| No | Judul Paper, Tahun, Author | Author dan Tahun | Tujuan | Metode Riset | Hasil Riset |
|----|--|---------------------------|---|--|--|
| 3. | <i>Effectiveness of Foamed Mortar Light Weight Fills as An Approach Bridge Fill On Sheet-Pile Structures</i> Jurnal Jalan dan Jembatan Volume 37 No 2 tahun 2020 | (Wicaksono & Iqbal, 2020) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Untuk mengevaluasi efektifitas mortar busa pada bidang kontak antara mortar busa dan turap ▪ Untuk memantau tekanan lateral yang terjadi. | Metode pemantauan dengan <i>instrument pressure cell</i> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dapat mereduksi nilai tekanan lateral sebesar 95,36 % dan tekanan vertikal sebesar hampir 80,00%. ▪ Dapat mengatasi terjadinya deformasi struktur konstruksi penanggulangan yang ada, dalam hal ini mengatasi potensi terjadinya deformasi turap (<i>sheet pile</i>). |
| | Analisis Stabilitas Timbunan Tinggi pada Mortar Busa Menggunakan Metode Elemen Hingga pada Proyek Pembangunan Jalan Baru Batas Kota Singaraja-Mengwitani Jurnal Aplikasi Teknik Sipil Volume 20, Nomor 1 Tahun 2022 | (Wartoyo et al., 2022) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Membandingkan analisa terhadap faktor kewan kondisi eksisting (menggunakan <i>geogrid</i>, <i>geotextile</i> dan <i>gabbion</i>) dengan faktor keamanan pada timbunan mortar busa ▪ Mengetahui kestabilan timbunan tinggi menggunakan mortar busa dengan variasi kemiringan tegak 1:1, 1:2 dan 1:3 | Metode deskriptif kualitatif menggunakan program <i>Plaxis</i> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Faktor keamanan pada kondisi eksisting (Menggunakan <i>geogrid</i>, <i>geotextile</i>, <i>gabbion</i>) adalah 1,606 sedangkan menggunakan perkuatan timbunan mortar busa didapatkan faktor keamanan sebesar 2,791 ▪ Pada pemodelan dengan variasi kemiringan yang berbeda, menunjukkan bahwa semakin landai kemiringan yang digunakan maka semakin besar pula faktor keamanan yang terjadi. |
| 5. | Analisis Material Ringan dengan Mortar Busa pada | (Hidayat et al., 2016) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mendapatkan perbandingan deformasi pada tanah dasar akibat | Metode deskriptif kualitatif | Deformasi mortar busa lebih rendah daripada timbunan konvensional (besar dari 6 m) |

| No | Judul Paper, Tahun, Author | Author dan Tahun | Tujuan | Metode Riset | Hasil Riset |
|----|---|--------------------------|--|---|--|
| | Konstruksi Timbunan Jalan Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Universitas Muhammadiyah Jakarta Tahun 2016 | | beban timbunan menggunakan timbunan konvensional dengan timbunan ringan | menggunakan program <i>Plaxis</i> | Penurunan pada pada timbunan ringan akibat beban merata 39,9 mm dan beban terpusat 98,3 mm sedangkan penurunan pada konstruksi timbunan konvensional sebesar 6810 mm |
| 6. | Analisis Perbandingan Penggunaan Material Ringan Mortar Busa dengan Material Tanah Sirtu pada Pekerjaan Timbunan Jalan Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Universitas 17 Agustus Volume 12 No.1 Tahun 2021 | (Salim & Siswanto, 2021) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Membandingkan penggunaan material ringan mortar busa dengan material sirtu ▪ Mengetahui biaya dan waktu yang dibutuhkan untuk masing-masing metode ▪ Mengetahui resiko yang didapat dari masing-masing metode ▪ Mengetahui kelebihan dan kekurangan yang didapat di setiap metode | Penelitian dengan kualitatif dengan studi kasus | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Material mortar busa ringan, dengan berat timbunan ringan 0,8 t/m³ dibandingkan dengan material sirtu ▪ Waktu pelaksanaan mortar busa lebih cepat (17,5 bulan), sedangkan material sirtu 31 bulan (selisih 43 %) ▪ Biaya mortar busa lebih mahal (Rp. 20.147.856.115,23) sedangkan biaya material sirtu Rp. 5.634.164.544,37. Selisih 72% |
| 7. | Stabilisasi Tanah Lempung dengan Campuran <i>Fly Ash</i> (FA) dan <i>Expanded Polystyrene</i> (EPS) | (Hendry et al., 2021) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mendapatkan komposisi pencampuran <i>fly ash</i> dengan persentase yang tetap dan komposisi <i>expanded polystyrene</i> | Metode pengujian laboratorium | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mendapatkan komposisi campuran yang optimal adalah pada komposisi campuran IV dengan tanah 83,25% + FA 16% + EPS 0,75% dengan masa peram selama 14 hari |

| No | Judul Paper, Tahun, Author | Author dan Tahun | Tujuan | Metode Riset | Hasil Riset |
|----|---|-----------------------------------|--|---|--|
| | sebagai Alternatif Timbunan Ringan pada Lapisan <i>Subgrade</i> Jurnal Potensi Sipil Politeknik Volume 23 No 1 Tahun 2021 | | pada tanah lempung yang dapat menghasilkan nilai CBR yang tinggi dan berat isi yang rendah, sebagai alternatif timbunan ringan pada lapisan <i>subgrade</i> . | | |
| 8. | <i>Bearing Ratio of Reinforced Fly Ash Overlaying Soft Soil and Deformation Modulus of Fly Ash</i> <i>Geotextiles And Geomembranes</i> 27 (2009) 313–320 | (Ghosh & Dey, 2009) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Untuk mempelajari perlakuan lapisan abu terbang tanpa perkuatan dan perkuatan di atas tanah lunak dengan atau tanpa lapisan geotekstil pada permukaan, melalui serangkaian uji rasio daya dukung | Metode pengujian laboratorium dan studi empirik | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Meningkatnya daya dukung ▪ Dapat dimanfaatkan untuk perkuatan di atas tanah lunak |
| 9. | <i>The Effect of Using Foam Mortar As an Alternative Backfill Material on Sheet Pile Walls on Slopes</i> International Journal of Civil Engineering and Infrastructure | (Nusyura Al Islami & Nizar, 2023) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Untuk mengetahui efektivitas mortar busa sebagai bahan timbunan kinerja turap yang membandingkan lereng tanah homogen dengan mortar busa dan pasir lepas sebagai bahan timbunan serta kombinasi variabel | Metode Numerik (FEM) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Variasi timbunan 1 m, 2 m, 3 m dan 4 m, variasi rasio kemiringan 1:1,5 ; 1:2 ; 1:3 ▪ Semakin tinggi timbunan semakin tinggi efektifitas mortar dan faktor keamanannya. ▪ Hasil analisis menunjukkan peningkatan nilai faktor keamanan terbesar pada tinggi timbunan 4 m dengan perbandingan kemiringan 1:3 |

| No | Judul Paper, Tahun, Author | Author dan Tahun | Tujuan | Metode Riset | Hasil Riset |
|-----|---|-------------------|---|----------------|--|
| | Volume 1 No. 1 Tahun 2023 | | tinggi timbunan dan rasio kemiringan lereng terhadap nilai kinerja turap yang berupa faktor keamanan, nilai perpindahan, dan momen lengkung. Serta mengkaji tingkat kenaikan dari perbandingan pasir lepas dan mortar busa. | | sebesar 28,89%, nilai reduksi lendutan terbesar pada tinggi timbunan 4m dengan perbandingan kemiringan 1:3 sebesar 96,2%, dan nilai reduksi momen lentur terbesar terjadi pada tinggi timbunan 4m dengan perbandingan kemiringan 1:1,5 sebesar 89,73%. |
| 10. | <p><i>Numerical Research of Lightweight Foam Concrete Replacement Method of Deep Soft Foundation Treatment of Low- Filled Embankment</i></p> <p>Hindawi Geofluids Volume 2022</p> | (Li et al., 2022) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Untuk mengganti material tanah lunak dengan mortar busa ▪ Untuk mendapatkan pengendalian tanah lunak di bawah timbunan | Metode numerik | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dapat mengimbangi sebagian beban mati; ▪ Dapat mengganti beton busa ringan dapat menyebarkan tegangan dengan baik; ▪ Dapat meningkatkan ketebalan penggantian akan menyebabkan <i>necking</i> dari gelembung tegangan tambahan ▪ Dapat menekan air pori berlebih tegangan tambahan ▪ Pemodelan numerik memberikan prediksi penurunan yang sangat cocok untuk timbunan. |

| No | Judul Paper, Tahun, Author | Author dan Tahun | Tujuan | Metode Riset | Hasil Riset |
|-----|---|---------------------------------|--|---|---|
| 11. | <i>Analysis of Road Embankment Improvement on Soft Soil Using Foamed Mortar Lightweight Embankment</i> <i>Journal of Infrastructure & Facility Asset Management</i> Volume 6 No. 1 tahun 2024 | (Permana Putuarga et al., 2024) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mengevaluasi timbunan tidak dan diberi perkuatan mortar busa dengan variasi tebal dan kemiringan ▪ Menganalisis stabilitas, penurunan dan tekanan <i>uplift</i> | Metode Numerik (<i>Finite Elemen Method</i>) dengan studi kasus | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Diperlukan perkuatan mortar busa sebagai timbunan ▪ Semakin tebal mortar busa semakin kecil laju penurunan yang terjadi ▪ Ketebalan mortar busa yang memenuhi syarat untuk timbunan lereng eksisting adalah setebal 1,50 meter atau lebih dan untuk timbunan lereng vertikal setebal 2,00 meter atau lebih. |
| 12. | <i>Design and construction of lightweight EPS geofom embedded geomaterial embankment system for control of settlements</i> <i>Geotextiles And Geomembranes</i> | (Puppala et al., 2019) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Untuk mengetahui penurunan/<i>settlement</i> di bawah sistem timbunan <i>geofom</i> EPS | Metode numerik (<i>finite element</i>) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dapat mengurangi penurunan diferensial dari Plat pendekatan pada jembatan ▪ Mengurangi masalah timbunan pada persimpangan jembatan dan perkerasan. |
| 13. | <i>Behaviour Study of Abutment Foundation Pile on Lightweight Embankment Oprit (Case Study : Kali Otek Bridge – Lamongan North Ring</i> | (Pertiwi et al., 2025) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Menganalisa penurunan dan stabilitas dengan memvariasikan persentase tinggi timbunan eksisting dan mortar busa. | <i>Plaxis 2D Modelling Method</i> dengan studi kasus | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mengurangi penurunan tanah dasar dengan penggunaan perkuatan mortar busa sebesar 61,2% ▪ Lendutan lateral terkecil terjadi pada variasi timbunan <i>foam</i> mortar 100% dengan waktu konsolidasi 190 hari. |

| No | Judul Paper, Tahun, Author | Author dan Tahun | Tujuan | Metode Riset | Hasil Riset |
|-----|--|----------------------|--|---------------------|---|
| | <p><i>Road Construction Package Section 2)</i></p> <p><i>Journal of Infrastructure and Facility Asset Management</i></p> <p>Volume 7 No.2 tahun 2025</p> | | <ul style="list-style-type: none"> Menganalisis pengaruh penggunaan timbunan ringan, baik secara keseluruhan maupun variasinya terhadap stabilitas tiang pancang pondasi abutmen jembatan, baik dengan maupun tanpa <i>Prefabricated Vertical Drain (PVD)</i> | | |
| 14. | <p><i>Behavior of Sandy Slopes Remediated by EPS-Block Geofom Under Seepage flow</i></p> | (Akay et al., 2013) | <ul style="list-style-type: none"> Perbaiki lereng, perilaku blok <i>geofom</i> untuk sistem lereng yang mengalami aliran rembesan | Model eksperimental | <ul style="list-style-type: none"> Konfigurasi blok <i>geofom</i> ditemukan stabil terhadap kondisi rembesan yang akan menyebabkan kegagalan lereng yang dangkal tanpa adanya blok <i>geofom</i>. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa blok <i>geofom</i> dapat sepenuhnya mengisi massa material lereng yang ada yang mengalami kegagalan. |
| 15. | <p><i>Research on the Application of Foamed Lightweight Concrete (FLC) in the Construction of Highway Soft Soil Foundation Engineering</i></p> | (Jiang et al., 2022) | <ul style="list-style-type: none"> Untuk mempelajari kelayakan dan keunggulan beton ringan busa pada bagian pipa gas bertekanan tinggi terkubur yang ada di | Metode analitik | <ul style="list-style-type: none"> Sistem timbunan dengan beton busa ringan mengalami penurunan yang lebih rendah dibandingkan dengan timbunan tanggul konvensional Penggunaan beton busa ringan pada tanah lunak dapat mengurangi biaya sebesar 12% dibandingkan dengan |

| No | Judul Paper, Tahun, Author | Author dan Tahun | Tujuan | Metode Riset | Hasil Riset |
|-----|--|----------------------------|---|---|--|
| | <i>with Buried High-Pressure Gas Pipes</i> <i>Applied Sciences 2022</i> | | bawah dasar jalan tanah lunak | | metode perawatan pondasi tiang komposit |
| 16. | Evaluasi Stabilitas dan Penurunan antara Timbunan Ringan Mortar Busa Dibandingkan dengan Timbunan Pilihan pada Oprit Jembatan (Studi Kasus: Flyover Antapani, Kota Bandung) Jurnal Reka Racana ITENAS Volume 4 No 1 | (Atamini & Moestafa, 2018) | <ul style="list-style-type: none"> Evaluasi terhadap perilaku dan kinerja deformasi stabilitas dan penurunan timbunan ringan Mortar Busa dibandingkan timbunan pilihan tanah merah laterit | <ul style="list-style-type: none"> Metode Numerik dengan <i>Plaxis</i> | <ul style="list-style-type: none"> Penggunaan timbunan ringan mortar busa di atas tanah lunak akan menghasilkan penurunan yang lebih kecil (<74,40%) dibandingkan dengan timbunan pilihan tanah merah laterit, karena timbunan mortar busa dapat mengurangi besarnya penurunan yang terjadi akibat berat isi materialnya Penggunaan timbunan ringan di atas tanah lunak akan menghasilkan faktor keamanan yang lebih besar (>50,36%) dibandingkan timbunan pilihan Faktor keamanan pada timbunan pilihan tanah merah laterit dengan Dinding Penahan Tanah (DPT) akan lebih besar dibandingkan timbunan ringan mortar busa Penurunan langsung pada akhir konstruksi lebih besar dari pada secara bertahap |
| 17. | <i>Laboratory Evaluation of Geogrids Used For</i> | (Zumrawi & Mansour, 2016) | <ul style="list-style-type: none"> Untuk mengetahui efisiensi penggunaan | <ul style="list-style-type: none"> Metode pengujian laboratorium | <ul style="list-style-type: none"> Nilai CBR sangat dipengaruhi oleh letak lembaran <i>geogrid</i> tanah dan jumlah lembaran yang digunakan. |

| No | Judul Paper, Tahun, Author | Author dan Tahun | Tujuan | Metode Riset | Hasil Riset |
|-----|--|--------------------------|--|--|---|
| | <i>Stabilizing Soft Subgrades</i> | | tulangan <i>geogrid</i> untuk stabilisasi <i>subgrade</i> | | <ul style="list-style-type: none"> Ketika lebar <i>geogrid</i> diletakkan pada lapisan 1 <i>geofom</i> tanah terjadi peningkatan nilai CBR 26%, dan nilai CBR meningkat 62% ketika lembar <i>geogrid</i> ditempatkan di keempat lapisan. |
| 18. | <i>Application of a cement–clay–air foam mixture as a lightweight embankment material for construction on soft clay</i> <i>Case Studies in Construction Materials Journal</i> | (Chaiyaput et al., 2023) | <ul style="list-style-type: none"> Untuk mengetahui penurunan, kuat dukung (q_u) dengan menggunakan material mortar busa pada lapisan konstruksi jalan | <ul style="list-style-type: none"> Pengujian skala penuh dilapangan | <ul style="list-style-type: none"> Timbunan dengan skala penuh 14 x 14 m tinggi 2,5 m, tebal lapisan 11 m Nilai q_u 1,3-1,8 kali lebih tinggi dibandingkan daripada q_u di laboratorium. Penggunaan material mortar busa 80% mengurangi timbunan dibandingkan dengan metode konvensional |
| 19. | <i>Application of Foamed Concrete in Road Pavement-Weak Soil System</i> <i>Procedia Engineering</i> Volume 193 pp 439-446 Tahun 2017 | (Kadela et al., 2017) | <ul style="list-style-type: none"> Mengkaji kemungkinan penggunaan mortar busa sebagai lapisan <i>sub base</i> dibawah struktur perkerasan jalan | <ul style="list-style-type: none"> <i>Numerical model FEM with</i> | <ul style="list-style-type: none"> Tegangan tarik maksimal pada zona bawah lapisan <i>sub base</i>, untuk struktur perkerasan KR5 dan jenis tanah dasar adalah 0,039 MPa. Nilai ini lebih rendah dari kuat lentur beton berbusa dengan kepadatan $860 \div 1060 \text{ kg/m}^3$ yaitu $0,55 \div 0,67$ MPa. |
| 20. | <i>Application of Foamed Soil in Widening Project</i> | (Sheng et al., 2020) | <ul style="list-style-type: none"> Meninjau penerapan penggunaan mortar busa | <ul style="list-style-type: none"> <i>Plaxis 2D Modelling</i> | <ul style="list-style-type: none"> Penurunan dalam waktu 3 bulan setelah konstruksi hanya 3,67 cm, |

| No | Judul Paper, Tahun, Author | Author dan Tahun | Tujuan | Metode Riset | Hasil Riset |
|----|--|------------------|--|---|---|
| | <p data-bbox="218 329 550 394"><i>of Limited Expressway Subgrade</i></p> <p data-bbox="218 440 550 540"><i>IOP Conference Series: Earth and Environmental Science</i></p> <p data-bbox="218 586 550 651">Volume 565 No. 1 Tahun 2020</p> | | <p data-bbox="831 329 1119 394">pada proyek pelebaran tanah dasar di jalan tol</p> | <p data-bbox="1207 329 1404 394"><i>Method</i> dengan studi kasus</p> | <p data-bbox="1482 329 1927 467">yang secara efektif dapat menyelesaikan masalah penurunan yang tidak merata pada jalan yang diperlebar.</p> <ul data-bbox="1440 480 1927 581" style="list-style-type: none"> <li data-bbox="1440 480 1927 581">• Perpindahan horizontal maksimum dalam waktu 5 bulan setelah konstruksi hanya 36 mm |

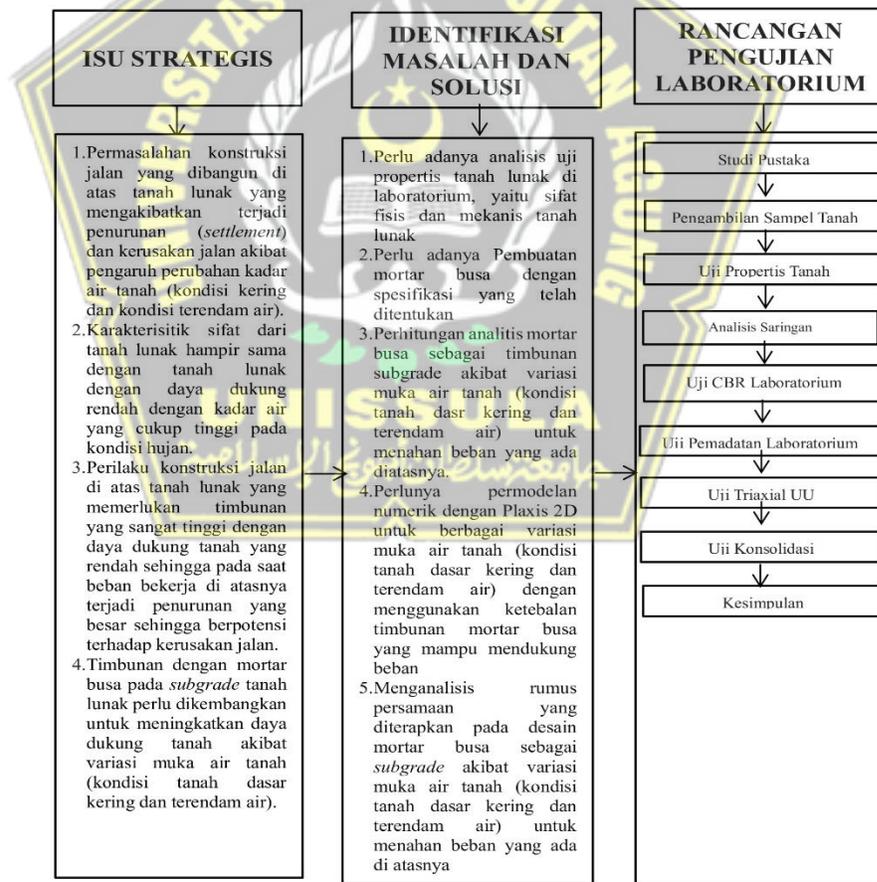
Sumber : Dari berbagai jurnal



Perbedaan penelitian ini dengan penelitian terdahulu adalah terletak pada pengkajian tentang penurunan (*settlement*) timbunan dengan lapisan mortar busa pada *subgrade* tanah lunak yang diberi pembebanan dengan variasi muka air tanah dalam kondisi kering dan terendam air.

2.12. Kerangka Berpikir

Pengumpulan referensi dari penelitian-penelitian terdahulu yang relevan dengan tema penelitian dilakukan untuk memperdalam pemahaman terkait karakteristik tanah lunak dan penggunaan mortar busa, sehingga dapat memastikan keaslian penelitian yang dilakukan, meskipun telah banyak penelitian serupa, penelitian ini secara khusus difokuskan pada analisis timbunan dengan mortar busa pada *subgrade* tanah lunak, terutama dalam kaitannya dengan penurunan dan perubahan muka air tanah, dan kerangka berpikir penelitian ini digambarkan secara visual pada sketsa Gambar 2.19.



Gambar 2.19. Kerangka Berpikir (Sumber : Olahan Penelitian)

Novelty dari penelitian ini adalah kajian penggunaan timbunan material ringan mortar busa pada *subgrade* tanah lunak dengan variasi muka air tanah (kondisi tanah dasar kering dan terendam air) dengan ketebalan mortar busa ($h_{\text{mortar busa}}$) antara 1/2 sampai 2/3 ketinggian tanah dasar (h_t), yaitu 60 cm. Ketebalan mortar busa divariasikan dengan ukuran tebal 20 cm, 30 cm, dan 40 cm.



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Konsep dan Pelaksanaan

Penelitian ini merupakan penelitian dikategorikan sebagai bentuk penelitian eksperimental di laboratorium yang dapat didefinisikan sebagai sebuah pendekatan keilmuan dan sistimatis dimana benda uji dan model uji di laboratorium diperiksa, diberi perlakuan, diamati, dikaji dan akhirnya dirangkum menjadi menjadi suatu kesimpulan penelitian.

Tanah lunak *subgrade* dimodelkan tanpa perkuatan mortar busa dan dengan perkuatan mortar busa. Mortar busa diletakkan di atas tanah lunak *subgrade* dengan asumsi tebal tanah dasar 60 cm (tanpa mortar busa), tebal tanah dasar 60 cm dengan tebal mortar busa variasi 20 cm, 30 cm, dan 40 cm, kondisi tanah dasar kering dan terendam air. Kondisi mortar busa pada tanah lunak yang terendam air akan mendapatkan tekanan ke atas (*up-lift*), sehingga mortar busa mengapung pada tanah lunak. Pembebanan vertikal diperhitungkan atas berat sendiri benda uji dan beban luar dengan variasi 0, 5 kN, 10 kN, 15 kN, dan 20 kN.

Ruang lingkup pada penelitian ini adalah :

1. Sampel tanah lunak yang digunakan untuk pengujian laboratorium diambil dari tanah lunak jalan Badak, Tenayan Raya kota Pekanbaru
2. Validasi awal sebagai border terlebih dahulu dianalisis menggunakan analisis numerik *Plaxis* 2D versi 2023 pada *prototype subgrade* dengan timbunan mortar busa dengan kondisi tanah lunak kering dan terendam air. Analisis hasil pengujian eksperimental laboratorium dan terakhir divalidasi dengan metode numerik *Plaxis* 2D versi 2023.
3. Beban vertikal dalam model uji laboratorium menggunakan alat *hidrolik*.
4. Plat beton yang diletakkan di atas timbunan mortar busa adalah material beton K-250 (fc 20,75 MPa) dengan ukuran 60 cm x 40 cm dan tebal 10 cm.

5. Material besi yang digunakan untuk plat beton adalah besi diameter 8 mm dengan f_y 240 MPa
6. Material geotekstil *non woven Polyester* (PET) 150 gr sebagai separator atau pemisah antara mortar busa dan tanah adalah dengan spesifikasi seperti Tabel 3.1 di bawah ini:

Tabel 3.1: Spesifikasi Geotekstil

| Item | Test Methods | Spesifikasi | Satuan |
|---|---------------------------|-------------|--------|
| <i>Thickness</i> (tebal) | ASTM D5199-12 | 1,1 | mm |
| <i>Tensile Strenght</i> (kekuatan tarik) | ASTM D4595-11 | 7,1 | kN/m |
| <i>Elongation</i> (mulur) | ASTM D4595-11 | ≥ 50 | % |
| <i>CBR Brust Strenght</i> (kekuatan jebol) | ASTM D6241-14 Probe 50 mm | 1017,3 | N |
| <i>Tearing Strenght</i> (kekuatan sobek) | ASTM D4533-15 | 280 | N |
| <i>Index Puncture</i> (indeks kekuatan tusuk) | ASTM D4833-07 Probe 8 mm | 170 | N |

Sumber : Data Penelitian

7. Tahapan pembuatan mortar busa

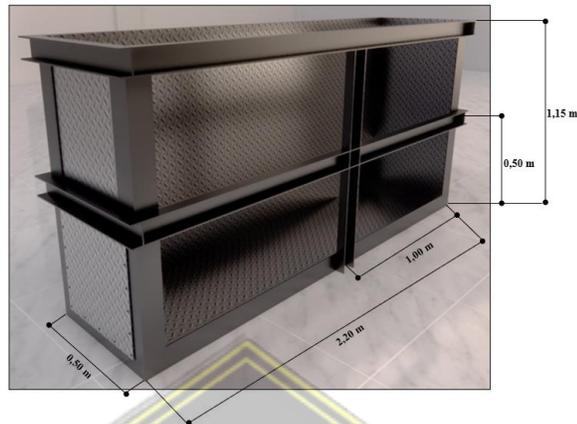
Untuk merencanakan campuran mortar busa dengan kekuatan tekan minimum umur 14 hari 800 kPa mengacu kepada surat edaran yang dikeluarkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat No. 44/SE/M/2015 tentang Pedoman Perancangan Campuran Material Ringan dengan Mortar Busa untuk Konstruksi Jalan. *Mix design* mortar busa dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut:

Tabel 3.2: Rancangan Campuran (*Mix Design*) Mortar Busa 800 kPa untuk 1 m³

| No | Semen (kg) | Air (kg) | Pasir (kg) | Busa (kg) | Total (kg) | Sumber Referensi |
|----|------------|----------|------------|-----------|------------|--|
| 1 | 270 | 135 | 209,6 | 52,58 | 667,18 | (Hermanto, 2019) |
| 2 | 320 | 144 | 348,40 | 49,60 | 862,00 | (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan, 2015) |

8. Tahapan permodelan *prototype*
 - a. Pembuatan bak uji dimensi 220 cm x 115 cm x 50 cm, dengan menggunakan plat besi 5 mm, plat *strip* 8 mm untuk rangka tengah, dan besi siku 70.70.5

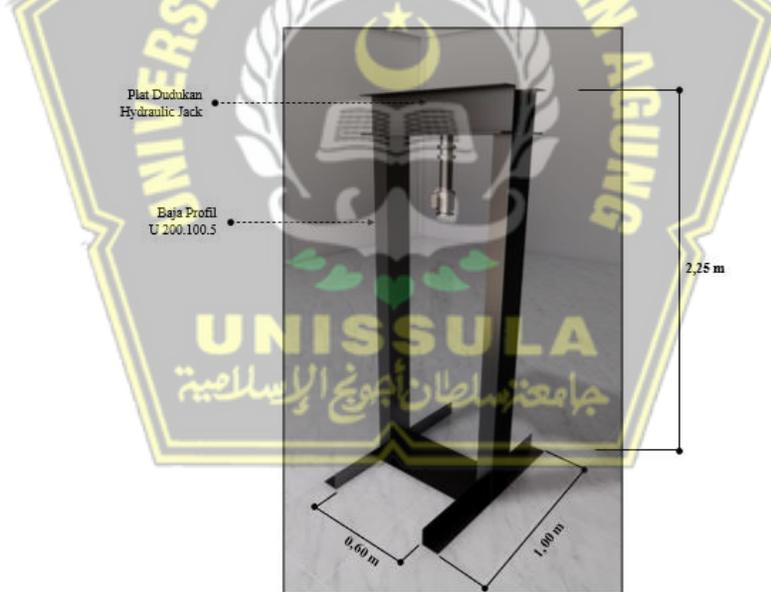
mm untuk rangka bagian bawah. Bagian sisi lainnya terdapat kaca tebal 12 mm untuk bagian depan



Gambar 3.1: Bak Uji

Sumber : Dokumentasi Penelitian

b. Pembuatan *frame hydraulic jack*



Gambar 3.2: *Frame Hydraulic Jack*

Sumber : Dokumentasi Penelitian

c. Model tanah lunak *subgrade* diambil dari lokasi Jl. Badak Tenayan Raya Pekanbaru

- d. Tanah lunak yang sudah diuji, 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 *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP).
- e. Pembebanan dengan menggunakan alat *hydraulic jack*.
- f. Penurunan tanah yang terjadi dibaca dengan menggunakan *Linier Variable Differential Transformer* (LVDT) dan dicatat berdasarkan data *logger*
- g. Permodelan skalatik tanpa menggunakan mortar busa dengan asumsi tebal lapisan tanah dasar 60 cm
- h. Permodelan skalatik dengan menggunakan *prototype* di desain dengan variasi :
 - 1) Tinggi tanah dasar = 60 cm dan tebal mortar busa 20 cm, kondisi tanah dasar kering dan terendam air
 - 2) Tinggi tanah dasar = 60 cm dan tebal mortar busa 30 cm, kondisi tanah dasar kering dan terendam air
 - 3) Tinggi tanah dasar = 60 cm dan tebal mortar busa 40 cm kondisi tanah dasar kering dan terendam air
- i. Variasi pembebanan untuk benda uji:
 - 1) Pembebanan terpusat vertikal dengan variasi 0, 5, 10, 15 dan 20 kN
 - 2) Beban vertikal dalam model uji laboratorium menggunakan alat *hydraulic jack*
 - 3) Plat beton yang diletakkan di atas mortar busa dengan mutu beton K-250
 - 4) Material besi pada plat beton dengan diameter 8 mm dengan f_y 240 Mpa

3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi pengambilan sampel tanah lunak pada jalan Badak Tenayan Raya kota Pekanbaru. Sedangkan pengujian laboratorium dan pembuatan mortar busa dilaksanakan di laboratorium Mekanika Tanah dan laboratorium Bahan Program Studi Teknik Sipil Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru dan Universitas Lancang Kuning,

sedangkan pengujian Eksperimental *prototype* permodelan dilaksanakan di *Workshop* PT. Harista Karsa Mandiri Pekanbaru

3.3 Variabel Penelitian

Definisi konseptual dari penelitian ini adalah karena daya dukung tanah lunak pada *subgrade* jalan yang rendah dapat mengakibatkan terjadinya penurunan jika terdapat beban konstruksi di atasnya. Berdasarkan Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan, daya dukung tanah yang rendah kecil dari 6% memerlukan timbunan material ringan mortar busa agar dapat menahan beban struktur dengan gaya angkat pada saat terendam air yang sebelumnya ditinjau juga melalui pengujian dalam kondisi kering.

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. Mortar busa diletakkan di bawah plat beton dalam sebuah bak uji, plat 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. *Linier 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 menggunakan variasi pembebanan tanah yang berbeda pada *dial gauge*, yaitu beban terpusat vertikal dengan variasi 0, 5, 10, 15 dan 20 kN. Sebelumnya dilakukan analisa secara numerik dengan menggunakan *software Finite Element Method/Plaxis*. Analisa secara numerik dilakukan untuk mendapatkan nilai pendekatan awal yang bisa dijadikan acuan melakukan permodelan pengujian di

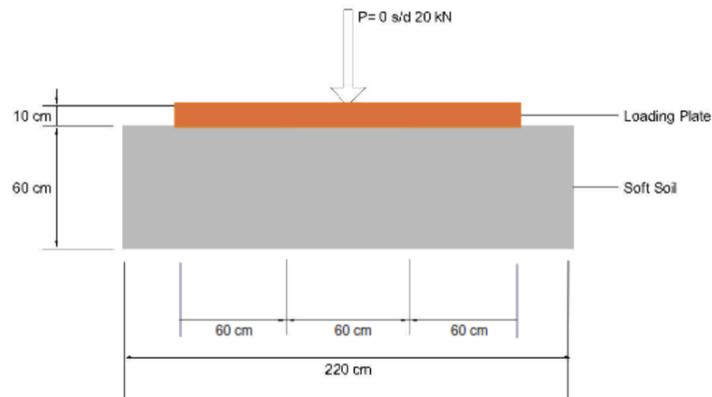
laboratorium. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan kamera di depan bak uji agar dapat diketahui perlakuan dan penurunan yang terjadi setelah diberikan pembebanan secara vertikal.

Variabel penelitian yang akan dilakukan meliputi :

1. Besarnya penurunan yang terjadi pada lapisan *subgrade* berdasarkan pembebanan, tebal *subgrade*, dan variasi tebal mortar busa dalam kondisi tanah dasar kering dan basah
2. Ketinggian minimal dari timbunan dan mortar busa
3. Gaya angkat (*up lift*) yang terjadi akibat adanya pembebanan vertikal.

Pengujian-pengujian *prototype* yang dimodelkan dilaboratorium adalah sebagai berikut :

1. Pengujian 1
 - a) Pengujian yang dilakukan dengan tebal tanah dasar = 60 cm (Tabel 2.10), (Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, 2015a) tebal plat 10 cm (standar minimum plat), dengan pembebanan mengacu pada Beban Kelompok Sumbu Kendaraan Berat (Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat, 2017) yaitu 0, 5, 10, 15 dan 20 kN. Beban terpusat vertikal Berdasarkan SNI 1725:2016 Badan Standarisasi Nasional tentang 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. (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2016)
 - b) Pada kondisi ini adalah kondisi awal tanpa menambahkan mortar busa. Skematik permodelan dapat dilihat pada Gambar 3.3 di bawah ini:



Gambar 3.3: Model Skematik Pengujian 1 Tanpa Lapisan Mortar Busa

Sumber : Olahan Penelitian

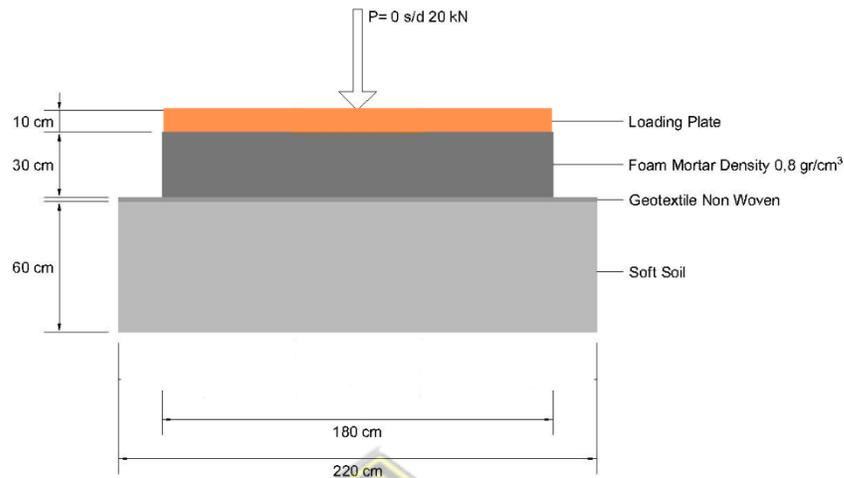
2. Pengujian 2

Dimodelkan dalam 3 kondisi:

1) Kondisi 1

- a) Tinggi tanah dasar = 60 cm
- b) Tebal plat = 10 cm (standar minimum plat di atas 90 cm) mortar busa
- c) Tinggi mortar busa = 30 cm (Diambil dari $\frac{1}{2}$ Ht (tinggi *subgrade* asumsi < 90 cm (Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat, 2017)
- d) Pembebanan = 0, 5, 10, 15 dan 20 kN (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2016)
- e) Kondisi = kering

Skematik permodelan dapat dilihat pada Gambar 3.5 di bawah ini :

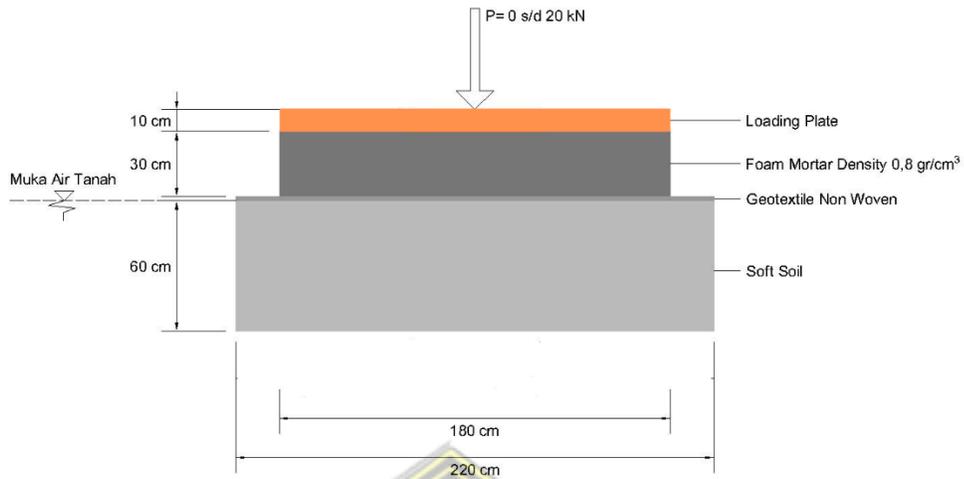


Gambar 3.4: Model Skematik Pengujian 2 Variasi 1

Sumber : Olahan Penelitian

- 2) Kondisi 2
- a) Tinggi tanah dasar = 60 cm
 - b) Tebal plat = 10 cm (standar minimum plat di atas 90 cm) mortar busa
 - c) Tinggi mortar busa = 30 cm (Diambil dari $\frac{1}{2}$ Ht (tinggi *subgrade* asumsi < 90 cm (Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat, 2017)
 - d) Pembebanan = 0, 5, 10, 15 dan 20 kN (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2016)
 - e) Kondisi tanah dasar = basah (tinggi muka air terletak di permukaan tanah dasar *subgrade*)

Skematik permodelan dapat dilihat pada Gambar 3.5 di bawah ini :

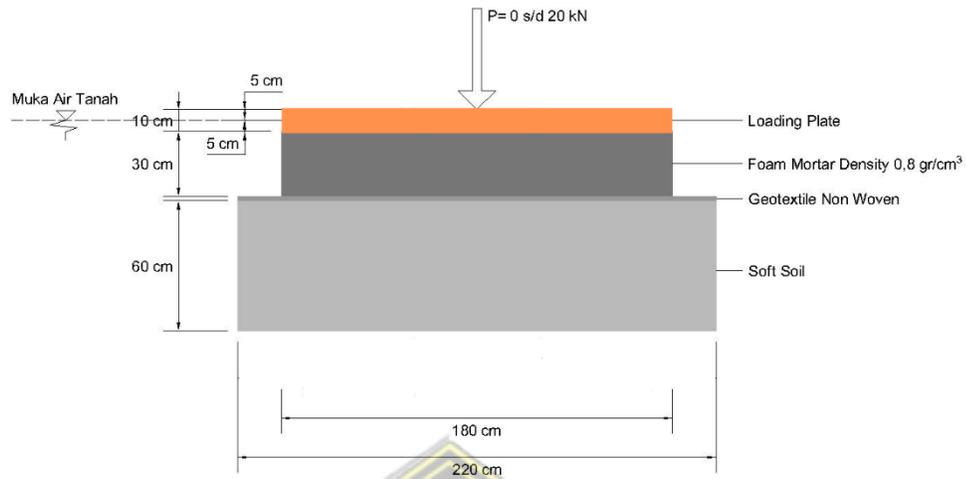


Gambar 3.5: Model Skematik Pengujian 2 Variasi 2

Sumber : Olahan Penelitian

- 3) Kondisi 3
- Tinggi tanah dasar = 60 cm
 - Tebal plat = 10 cm (standar minimum plat di atas 90 cm) mortar busa
 - Tinggi mortar busa = 30 cm (Diambil dari $\frac{1}{2}$ Ht (tinggi *subgrade* asumsi < 90 cm (Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat, 2017)
 - Pembebanan = 0, 5, 10, 15 dan 20 kN (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2016)
 - Kondisi = basah (tinggi muka air terletak di tengah plat beton)

Skematik permodelan dapat dilihat pada Gambar 3.6 di bawah ini :



Gambar 3.6: Model Skematik Pengujian 2 Variasi 3

Sumber : Olahan Penelitian

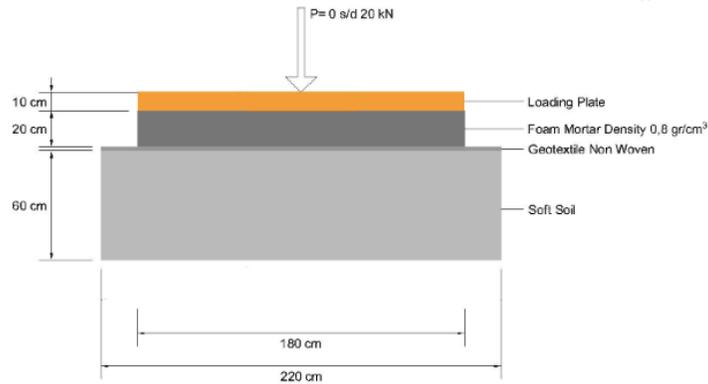
3. Pengujian 3

Dimodelkan dalam 3 kondisi:

1) Kondisi 1

- a) Tinggi tanah dasar = 60 cm
- b) Tebal plat = 10 cm (standar minimum plat di atas 90 cm) mortar busa
- c) Tinggi mortar busa = 20 cm (Diambil dari $1/3 H_t$ (tinggi *subgrade* asumsi < 90 cm (Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat, 2017)
- d) Pembebanan = 0, 5, 10, 15 dan 20 kN (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2016)
- e) Kondisi = kering

Skematik permodelan dapat dilihat pada Gambar 3.7 di bawah ini :

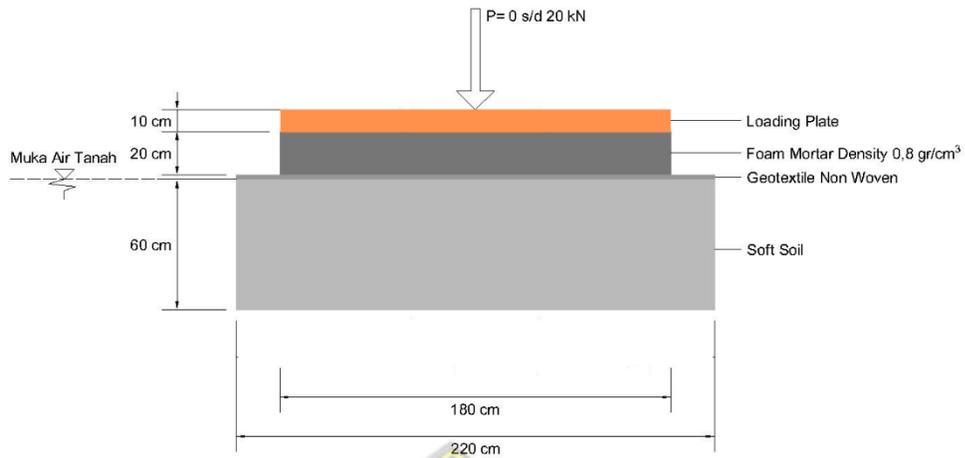


Gambar 3.7: Model Skematik Pengujian 3 Variasi 1

Sumber : Olahan Penelitian

- 2) Kondisi 2
- a) Tinggi tanah dasar = 60 cm
 - b) Tebal plat = 10 cm (standar minimum plat di atas 90 cm) mortar busa
 - c) Tinggi mortar busa = 20 cm (Diambil dari 1/3 Ht (tinggi *subgrade* asumsi < 90 cm (Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat, 2017)
 - d) Pembebanan = 0, 5, 10, 15 dan 20 kN (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2016)
 - e) Kondisi = basah (tinggi muka air terletak di permukaan tanah dasar)

Skematik permodelan dapat dilihat pada Gambar 3.8 di bawah ini :

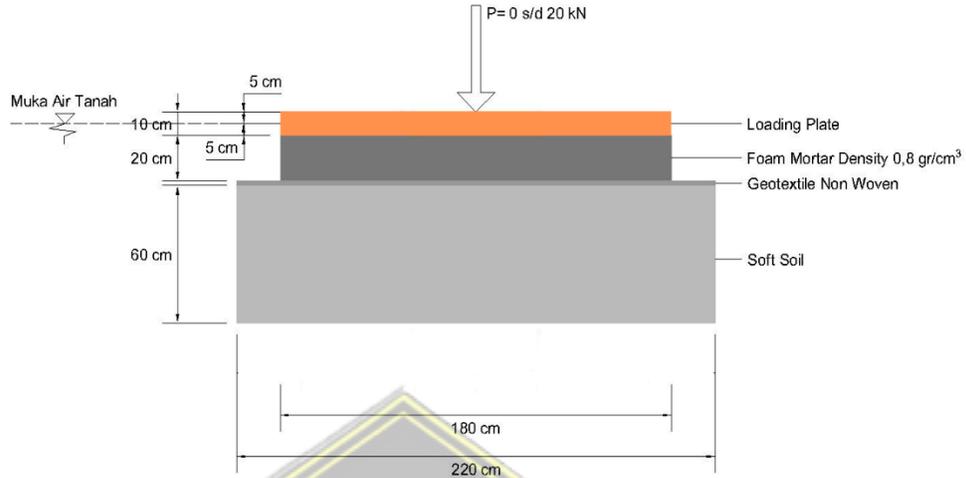


Gambar 3.8: Model Skematik Pengujian 3 Variasi 2

Sumber : Olahan Penelitian

- 3) Kondisi 3
- a) Tinggi tanah dasar = 60 cm
 - b) Tebal plat = 10 cm (standar minimum plat di atas 90 cm) mortar busa
 - c) Tinggi mortar busa = 20 cm (Diambil dari $1/3 H_t$ (tinggi *subgrade* asumsi < 90 cm (Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat, 2017)
 - d) Pembebanan = 0, 5, 10, 15 dan 20 kN (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2016)
 - e) Kondisi = basah (tinggi muka air terletak di tengah plat beton)

Skematik permodelan dapat dilihat pada Gambar 3.9 di bawah ini :



Gambar 3.9: Model Skematik Pengujian 3 Variasi 3

Sumber : Olahan Penelitian

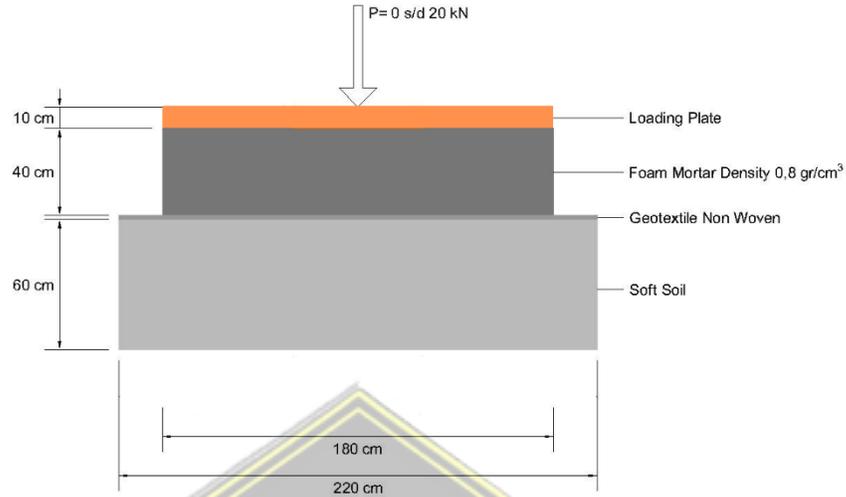
4. Pengujian 4

Dimodelkan dalam 3 kondisi:

1) Kondisi 1

- a) Tinggi tanah dasar = 60 cm
- b) Tebal plat = 10 cm (standar minimum plat di atas 90 cm) mortar busa
- c) Tinggi mortar busa = 40 cm (Diambil dari $\frac{2}{3}$ Ht (tinggi *subgrade* asumsi < 90 cm (Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat, 2017)
- d) Pembebanan = 0, 5, 10, 15 dan 20 kN (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2016)
- e) Kondisi = kering

Skematik permodelan dapat dilihat pada Gambar 3.10 di bawah ini :

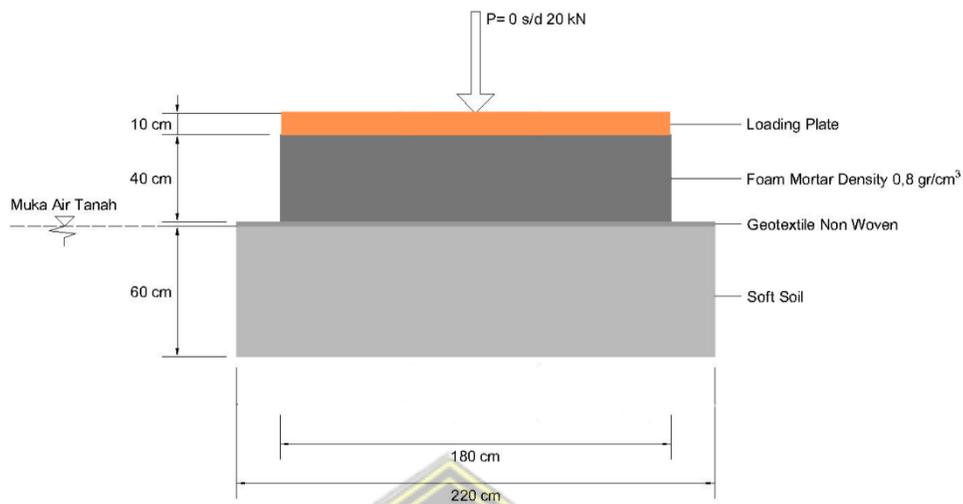


Gambar 3.10: Model Skematik Pengujian 3 Variasi 1

Sumber : Olahan Penelitian

- 2) Kondisi 2
- a) Tinggi tanah dasar = 60 cm
 - b) Tebal plat = 10 cm (standar minimum plat di atas 90 cm) mortar busa
 - c) Tinggi mortar busa = 40 cm (Diambil dari $\frac{2}{3} H_t$ (tinggi *subgrade* asumsi < 90 cm (Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat, 2017)
 - d) Pembebanan = 0, 5, 10, 15 dan 20 kN (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2016)
 - e) Kondisi = basah (tinggi muka air terletak di permukaan tanah dasar)

Skematik permodelan dapat dilihat pada Gambar 3.11 di bawah ini :

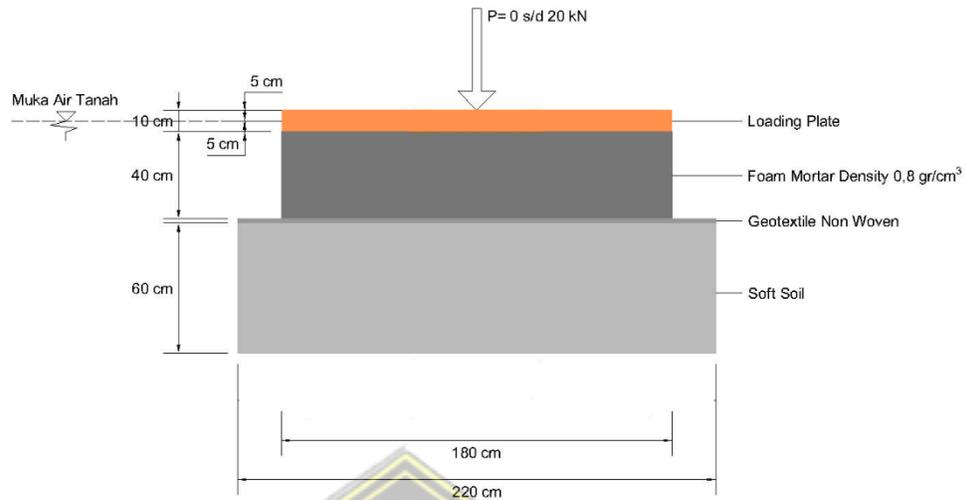


Gambar 3.11: Model Skematik Pengujian 3 Variasi 2

Sumber : Olahan Penelitian

- 3) Kondisi 3
- a) Tinggi tanah dasar = 60 cm
 - b) Tebal plat = 10 cm (standar minimum plat di atas 90 cm) mortar busa
 - c) Tinggi mortar busa = 40 cm (Diambil dari $\frac{2}{3}$ Ht (tinggi *subgrade* asumsi < 90 cm (Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat, 2017)
 - d) Pembebanan = 0, 5, 10, 15 dan 20 kN (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2016)
 - e) Kondisi = basah (tinggi muka air terletak di tengah plat beton)

Skematik permodelan dapat dilihat pada Gambar 3.12 di bawah ini :



Gambar 3.12: Model Skematik Pengujian 3 Variasi 3

Sumber : Olahan Penelitian

3.4. Metode Pengumpulan Data Penelitian

Metode pengumpulan data pada penelitian dilakukan dengan beberapa tahapan yaitu :

1. Tahapan pengujian lapangan

Pengujian ini dimaksudkan adalah pengambilan sampel tanah lunak di lokasi yang telah ditentukan yaitu di jalan Badak, Tenayan Raya Pekanbaru-Riau. Sampel tanah yang diambil merupakan sampel tanah terganggu dan tak terganggu. Untuk sampel tanah tak terganggu diambil pada kedalaman 1-2 m dengan menggunakan *hand bore*.

2. Tahapan pengujian laboratorium

Setelah pengambilan tanah dilapangan, tanah tersebut dibawa ke laboratorium untuk dilakukan pengujian fisik dan mekanik agar didapatkan parameternya

Pengujian laboratorium meliputi :

a. Pengujian sifat-sifat fisik tanah

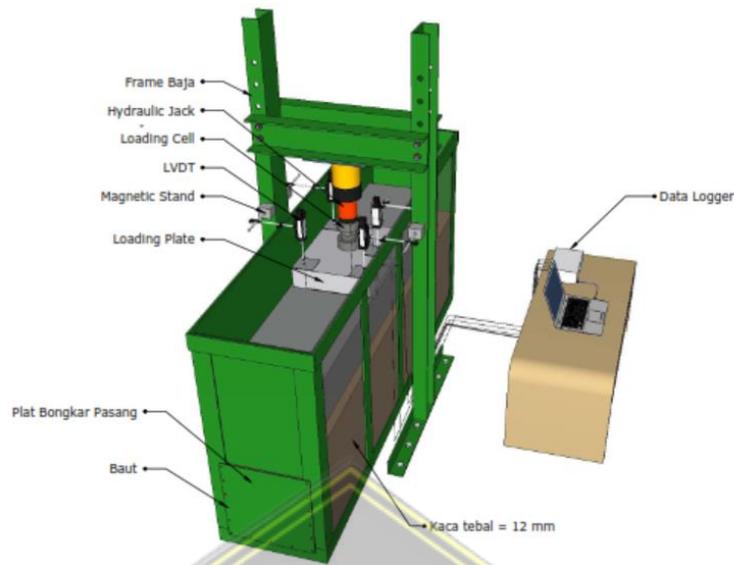
- 1) Pengujian analisa saringan/*sieve analysis* : SNI 3423-2008
- 2) Pengujian berat jenis : SNI 1964-2008
- 3) Pengujian kadar air : SNI 1965-2008

- 4) Pengujian *atterberg limit*: SNI 1967-2008
- 5) Pengujian berat isi tanah : SNI 03-3637-1994
- b. Pengujian mekanis
 - 1) Pengujian *proctor* (pemadatan) : SNI 1742-2008
 - 2) Pengujian kuat geser : SNI 1742-2008
 - 3) Pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) : SNI 1744-2008
3. Tahapan pembuatan mortar busa
Tahapan pembuatan mortar busa adalah :
 - a. Pengujian agregat halus
 - 1) Pengujian gradasi ASTM C109 dan 3423-2008
 - 2) Pengujian berat jenis pasir : SNI 1964-2008
 - 3) Pengujian kadar lumpur pasir : SNI 03-6819-2002
 - b. Formula rancangan campuran
 - 1) Perhitungan desain campuran
 - 2) *Jobmix design* mortar
 - 3) Pembuatan busa (*foam*)
 - c. Pencampuran busa (*foam* dan air) dan material (pasir, air dan semen)
4. Plat 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 $f'c$ 20,75 MPa. Komposisi ini nanti yang akan dijadikan acuan dalam pembuatan Plat beton pengujian mortar busa
5. Tahap persiapan benda uji
Material yang digunakan dalam pembuatan bak uji sebagai perletakan tanah lunak dan tempat *prototype* adalah sebagai berikut :
 - a. Perakitan bak uji dari bahan plat baja, profil baja dan kaca transparan dengan dimensi bak uji 220 cm x 115 cm x 50 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 baja dan dinding dihubungkan dengan menggunakan las.
6. Tahap pengujian dengan model *prototype*
- a. Pengujian pembebanan vertikal dengan kondisi tanah dasar kering
Prototype sudah terinstal dalam bak uji yang sudah diisi dengan tanah lunak. Timbunan dengan mortar busa dengan variasi tebal tanah dasar tanpa mortar busa dan dengan mortar busa Pada saat dilakukan pengujian beban awal yang diberikan adalah 5 kN, dari pembebanan ini data-data akan terekam langsung kedalam data *logger* yang sudah terhubung dengan computer. *Settlement* yang terjadi akan tercatat dalam data *logger*. Kemudian dilanjutkan dengan tahap selanjutnya dengan beban 10 kN, 15 kN, dan 20 kN.
 - b. Pengujian dengan beban vertikal dengan kondisi tanah dasar basah
Prototype sudah terinstal dalam bak uji yang sudah diisi dengan tanah lunak. Timbunan dengan mortar busa dengan variasi tebal tanah tanah dasar dan tebal mortar busa Pada saat dilakukan pengujian beban awal yang diberikan adalah 5 kN, dari pembebanan ini data-data akan terekam langsung kedalam data *logger* yang sudah terhubung dengan komputer. *Settlement* yang terjadi akan tercatat dalam data *logger*. Kemudian dilanjutkan dengan tahap selanjutnya dengan beban 10 kN, 15 kN, dan 20 kN.
7. Tahapan analisa numerik
Menggunakan *software Finite Element Method Plaxis 2D* versi 2023

3.5. Instrument Penelitian

Tampilan *prototype* pengujian dalam bentuk 3 Dimensi dapat dilihat pada Gambar 3.13 di bawah ini



Gambar 3.13: Model Skematik *Prototype* Pengujian 3 Dimensi

Sumber : Olahan Penelitian

Keterangan :

1. Tanah lunak *subgrade*
2. Mortar busa
3. Geotekstil *non woven* sebagai separator
4. Bak uji : terbuat dari plat baja dan kaca dengan ketebalan 1,2 cm
5. Plat beton bertulang K-250
6. Batang penghubung *load cell* dan LVDT
7. *Hydraulic jack*
8. *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT)

3.5.1. Tahap Persiapan dan Pembuatan Benda Uji

Instrument yang digunakan pada penelitian ini adalah :

1. *Load Cell*

Load Cell merupakan merupakan sensor yang dirancang untuk mendeteksi tekanan atau berat sebuah beban, yang dapat membaca beban yang diberikan dan selanjutnya terbaca pada data *logger*. Pada penelitian ini *Load cell* yang digunakan pada penelitian ini yaitu 1 (satu) unit kapasitas 50 ton



Gambar 3.14: *Load Cell* Kapasitas 50 Ton

Sumber: Dokumentasi Penelitian

2. *Hydroulic Jack*

Hydroulic jack adalah dongkrak yang digerakkan secara manual yang memiliki kapasitas 2 Ton seperti dapat dilihat pada Gambar 3.15 dibawah ini :



Gambar 3.15: *Hydroulic Jack*

Sumber : Dokumentasi Penelitian

3. *Data Logger*

Data logger adalah sebuah alat elektronik yang mencatat data dari waktu ke waktu baik yang terintegrasi dengan sensor dan *instrument* didalamnya maupun eksternal sensor dan *instrument*. Atau secara singkat *data logger* adalah alat untuk melakukan data *login*, Pada pengujian ini *data logger* dihubungkan dengan LVDT dan *load cell* serta perangkat komputer. pergerakan Plat dan beban perangkat komputer. Secara terus menerus *data logger* akan merekam data yang diberikan.



Gambar 3.16: Data Logger

Sumber : Dokumentasi Penelitian

4. *Linier Variabel Differential Transformer (LVDT)*

LVDT adalah alat sensor yang berfungsi untuk melihat kinerja penurunan yang terjadi. LVDT ini dipasang pada Plat beton bertulang. LVDT yang digunakan pada penelitian ini berukuran 50 mm diletakkan pada permukaan mortar busa di 4 titik pada masing-masing sudut.



Gambar 3.17: LVDT Ukuran 50 mm

Sumber : Dokumentasi Penelitian

5. Kamera

Kamera berfungsi untuk melihat dan merekam perlakuan yang terjadi pada benda uji khususnya data penurunan. Kamera diletakkan pada bagian depan bak uji transparan (kaca).



Gambar 3.18: Kamera Digital

Sumber : Dokumentasi Penelitian

6. Laptop

Laptop fungsinya sebagai alat bantu perekaman data dan pengolahan data



Gambar 3.19: Laptop

Sumber : Dokumentasi Penelitian

3.5.2. Pelaksanaan Pengujian Laboratorium

Pengujian yang dilakukan pada eksperimen ini adalah :

1. Tahap pengujian sampel tanah

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 *California Bearing Ratio* (CBR) 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 telah ditempatkan dalam bak uji sesuai dengan ukuran yang telah ditentukan, dan tanah ini berfungsi sebagai tanah dasar (*subgrade*). Di atas lapisan tanah lunak, mortar busa dipasang sesuai dengan dimensi yang telah direncanakan. Pada tahap pengujian, benda uji akan dikenakan beban vertikal sebesar 5 kN, dengan distribusi beban menggunakan plat pengujian berukuran 60 cm x 40 cm dan ketebalan 10 cm. Beban ini akan dikontrol menggunakan *load cell* dan diterapkan dengan bantuan *hydraulic jack* untuk menekan sampel. Pada pengujian pertama, data beban yang diterapkan akan langsung tercatat dalam data *logger*, sementara LVDT akan digunakan untuk mengukur penurunan yang terjadi. Selanjutnya, beban akan ditambah secara bertahap sebesar 5 kN hingga mencapai total beban akhir sebesar 20 kN. Semua data hasil pengujian akan dicatat dalam data *logger* dan juga secara manual dengan mengukur 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. Tahap selanjutnya pada kondisi terendam sampai permukaan mortar busa dan diberi pembebanan bertahap.

3.5.3. Tahap Pengumpulan Data

Esperimen yang dilakukan pada timbunan mortar busa di atas tanah lunak dengan skala kecil di laboratorium akan menghasilkan data mengenai besaran penurunan (*settlement*) yang terjadi akibat beban vertikal yang diterapkan. Pengukuran penurunan ini dilakukan dengan menggunakan data *logger* yang terhubung ke komputer. Data numerik juga dikumpulkan melalui metode *Finite Element Method* (FEM) menggunakan perangkat lunak *Plaxis 2D* versi 2023 untuk menganalisis deformasi yang terjadi selama proses pembebanan vertikal. Hasil analisis ini kemudian dibandingkan dengan data eksperimen yang diperoleh di laboratorium untuk mengevaluasi konsistensi antara model numerik dengan data eksperimen di laboratorium

3.5.4. Tahap Analisis Data

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 angkat yang terjadi akibat *up-lift* mortar busa akibat terendam air.
3. Melakukan studi komperasi dari hasil eksperimen di laboratorium dengan hasil numerik program *Plaxis 2D* versi 2023, dan berapa besar kesesuaiannya.

3.5.5. Penyajian Hasil Penelitian dan Studi Komparasi

Penyajian hasil eksperimen 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 *up-lift* mortar busa yang terendam air dengan tebal mortar busa berdasarkan pengujian model di laboratorium dan numerik program *Plaxis* 2D versi 2023.

3.6 Metode Analisis Data

Tahapan metode analisis dilakukan setelah mendapatkan hasil dari pengujian laboratorium. Analisis dilakukan berdasarkan rumus-rumus yang ada dengan membandingkan analisa secara numerikal melalui *Finite Element Method (Plaxis)* 2D versi 2023 sebagai validasi data dari analisa rumus tersebut. Tahapan analisis berdasarkan rumus adalah sebagai berikut :

1. Kuat tekan mortar busa

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

Dimana :

$f'c$ = Kuat tekan mortar busa (MPa)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang (mm^2)

Untuk mendapatkan Modulus Elastisitas (E_s) pada timbunan mortar busa diestimasi dengan persamaan untuk beton ringan (*lightweight concrete*) dari AASTHO 2010.

$$E_c = 0.043 \times W_c^{1.5} \sqrt{f'c} \quad (3.2)$$

Keterangan :

E_c = Modulus elastisitas mortar busa (Mpa)

W_c = Densitas kering mortar busa (kg/m^3)

$f'c$ = Kuat tekan umur 14 hari (Mpa)

Sedangkan nilai poisson ratio berkisar antara 0,1 - 0,2 (Gere & Timoshenko, 1997)

2. Penurunan.

Menghitung penurunan tanah dapat dirumuskan sebagai berikut (Janbu et al., 1956a)

$$S_i = \mu_1 \mu_0 \frac{q_n B}{E} \quad (\text{hanya untuk } \nu = 0,5) \quad (3.3)$$

Dimana :

S_i = Penurunan segera rata-rata (m)

μ_1 = Faktor koreksi untuk kedalaman pondasi D_f

μ_0 = Faktor koreksi untuk lapisan tanah tebal terbatas (H)

B = Lebar beban terbagi rata untuk luasan empat persegi panjang atau diameter lingkaran pada beban lingkaran (m)

q_n = Tambahan tegangan *netto* (kN/m^2)

E = Modulus Elastisitas (kN/m^2)

3. Gaya Apung/Angkat

Hydrostatic uplift ditentukan dengan menggunakan rumus berikut :

$$FK = \frac{\sum N}{\sum U} \quad (3.4)$$

$$\sum N = W_{\text{Mortar Busa}} + W_{\text{air}} + W'_{\text{air}} \quad (3.5)$$

Dimana:

$\sum N$ = Total dari gaya normal yang bekerja

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

$W_{\text{Mortar Busa}}$ = Berat timbunan mortar busa

$W_{\text{air}}, W'_{\text{air}}$ = Komponen vertikal dari berat air, di kedua sisi 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 :

$$h + S_{\text{total}} \text{ dan } h' + S_{\text{total}} \quad (3.6)$$

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 :

$$\gamma_w (h + S_{total}) \text{ dan } \gamma_w (h' + S_{total}) \quad (3.7)$$

Dimana :

γ_w = Berat jenis air (N/m³)

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

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

Stotal = Penurunan total (m)

Untuk menentukan Faktor Keamanan pada kasus tinggi air di kedua sisi timbunan memiliki tinggi yang sama berdasarkan rumus berikut:

$$FK = \frac{W_{Mortar\ busa} + W_{air} + W'_{air} + O_{REQ}}{\gamma_w x (h + S_{total}) B_w} \quad (3.8)$$

Dimana :

$W_{Mortar\ Busa}$ = Berat timbunan mortar busa

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

O_{REQ} = Beban tambahan yang diperlukan struktur timbunan mortar busa agar memenuhi faktor keamanan (kN/m)

Tekanan air menimbulkan gaya angkat pada dasar timbunan dengan menggunakan rumus :

$$U = \gamma_w x B_w x (h + S_{total}) = \gamma_w x B_w x (h' + S_{total}) \quad (3.9)$$

Dimana :

γ_w = Berat jenis air (N/m³)

B_w = Lebar dasar timbunan (m)

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

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

Stotal = Penurunan total (m)

Komponen dalam perhitungan nilai O_{REQ} adalah berat struktur yang berada di atas mortar busa. Untuk menghitung berat struktur di atas mortar busa dengan rumus berikut :

$$W = \gamma.t.l \quad (3.10)$$

Dimana:

γ = Berat jenis bahan di atas struktur mortar busa

t = Tebal

l = Lebar

Agar mendapatkan nilai faktor keamanan yang diinginkan untuk gaya angkat air, maka :

$$O_{REG} < W \quad (3.11)$$

Faktor keamanan 1,2 merupakan nilai FK yang diinginkan dalam perhitungan gaya angkat air. Nilai O_{REG} untuk memenuhi FK 1,2 dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

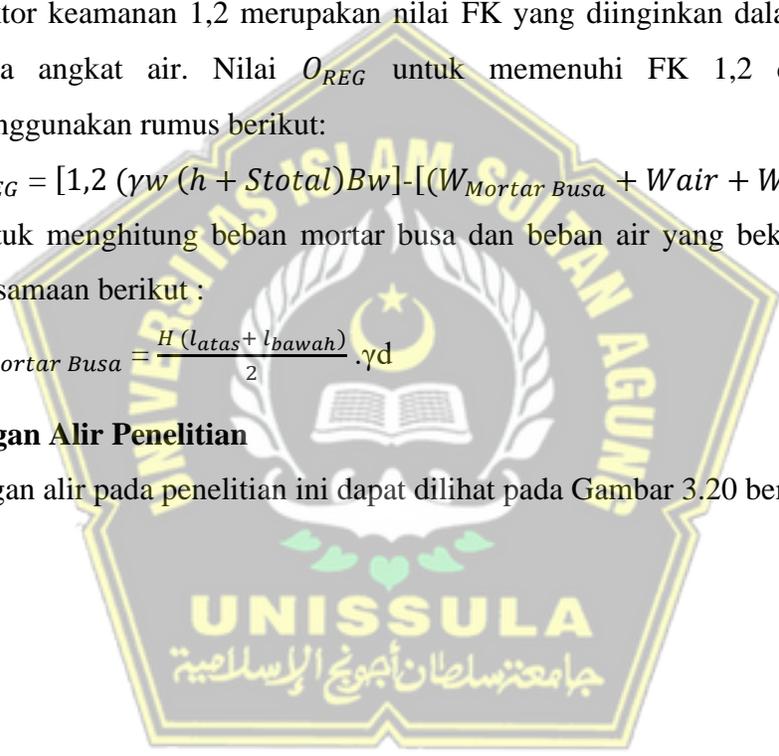
$$O_{REG} = [1,2 (\gamma W (h + Stotal) Bw)] - [(W_{Mortar Busa} + W_{air} + W'_{air}] \quad (3.12)$$

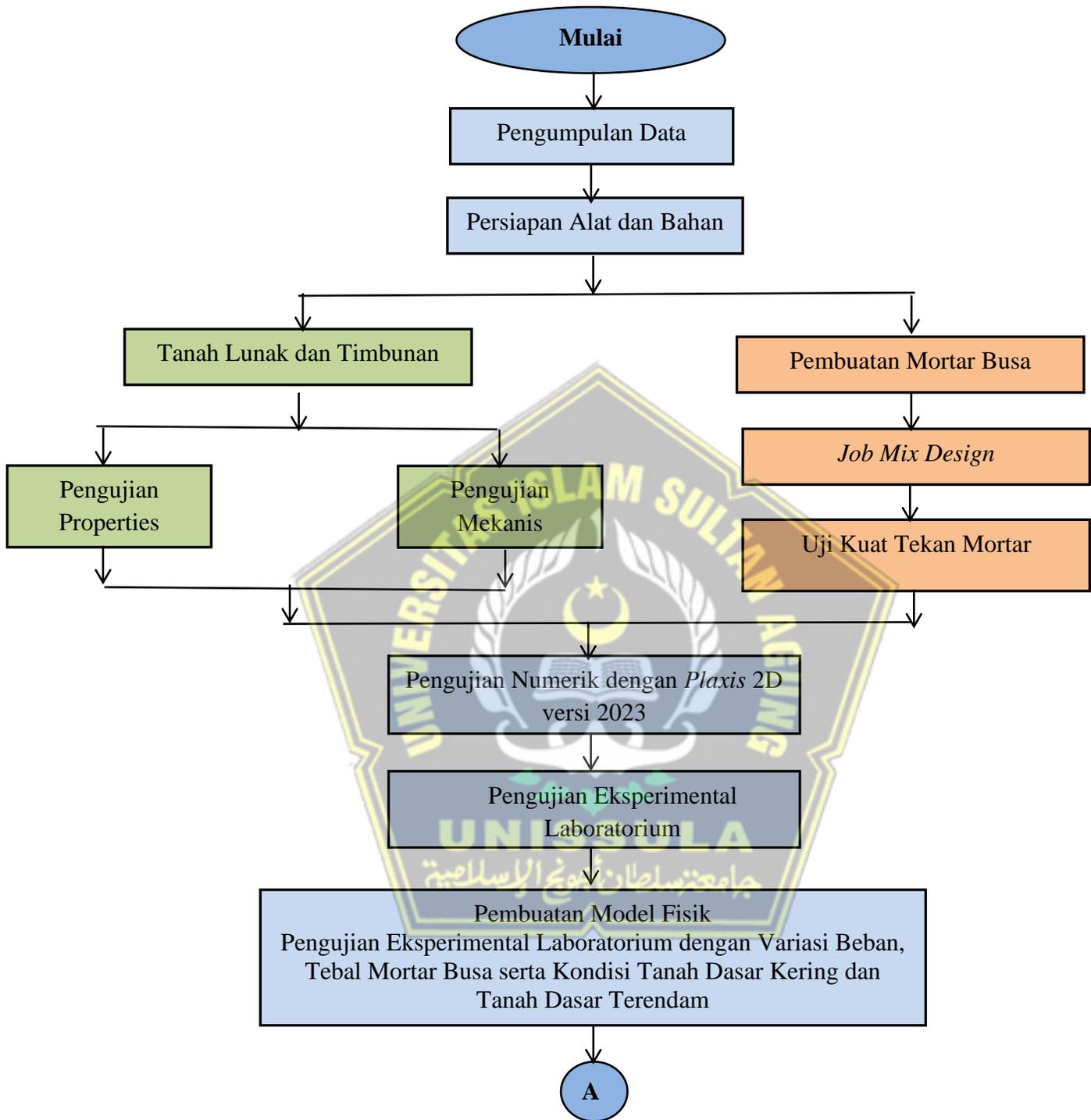
Untuk menghitung beban mortar busa dan beban air yang bekerja digunakan persamaan berikut :

$$W_{Mortar Busa} = \frac{H (l_{atas} + l_{bawah})}{2} . \gamma d \quad (3.13)$$

3.7 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.20 berikut :







Gambar 3.20: Bagan Alir Penelitian

Sumber : Olahan Penelitian

BAB IV

ANALISIS DATA DAN HASIL ANALISIS

4.1 Tahapan Penelitian

Pelaksanaan penelitian di laboratorium dilakukan dengan beberapa tahapan yaitu pengambilan sampel tanah di lapangan dan pengujian sampel tanah di laboratorium. Pengujian ini dilaksanakan untuk memastikan bahwa sampel tanah yang akan digunakan adalah tanah lunak. Pembuatan model uji untuk pengujian eksperimen di laboratorium dengan memasukan tanah lunak yang dimodelkan sebagai tanah dasar (*subgrade*) kemudian di atas tanah dasar diletakkan mortar busa 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 Tahapan Pelaksanaan Eksperimen di Laboratorium

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.

4.2.1 Persiapan Bak Uji

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 untuk bahan untuk membuat bak uji. Penyediaan bak uji ukuran 220 cm x 115 cm x 50 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. Material bahan yang akan digunakan seperti Gambar 4.1 berikut :



Gambar 4.1: Material Bak Uji

Sumber : Dokumentasi Penelitian

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. Berikut adalah kaca yang digunakan seperti terlihat pada Gambar 4.2:



Gambar 4.2: Kaca Tebal 12 mm

Sumber : Dokumentasi Penelitian

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 4.3 dan Gambar 4.4 berikut :



Gambar 4.3: Proses Pembuatan Rangka Bak Uji

Sumber : Dokumentasi Penelitian



Gambar 4.4: Proses *Finishing* Perakitan Bak Uji

Sumber : Dokumentasi Penelitian

4.2.2 Pengujian 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 1 m x 1 m pada satu titik, setelah itu diambil sampel tanah terganggu (*disturbed*) untuk dilakukan pengujian di laboratorium. Gambar 4.5 dibawah ini adalah pengambilan sampel tanah terganggu (*undistrubed*) :



Gambar 4.5: Proses Pengambilan Sampel Tanah Terganggu (*Disturbed*)

Sumber : Dokumentasi Penelitian

Sampel tanah terganggu ini dibawa ke laboratorium untuk melakukan pengujian CBR laboratorium dan pengujian pemadatan laboratorium. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa tanah yang sedang diuji memenuhi kriteria tanah lunak, yaitu memiliki daya dukung rendah berdasarkan nilai CBR kurang dari 6%. Untuk pengumpulan data, sampel tanah tak terganggu (*undisturbed*) diperoleh menggunakan alat *handbore* pada dua titik kedalaman, yakni 0,5 meter hingga 1,00 meter serta 1,00 meter hingga 1,50 meter. Total sampel yang berhasil diperoleh adalah dua buah. Dapat dilihat pada Gambar 4.6 di bawah ini :



Gambar 4.6: 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. Pengujian laboraorium yang dilakukan adalah :

a) Uji sifat – sifat fisik

1) Pengujian analisa saringan

Pengujian yang dilaksanakan di laboratorium berdasarkan standar SNI 342-2008. Berikut pada Gambar 4.7 dapat dilihat tentang pengujian analisa saringan di laboratorium :



Gambar 4.7: Pelaksanaan Pengujian Analisa Saringan di Laboratorium

Sumber : Dokumentasi Penelitian

2) Pengujian kadar air

Pengujian kadar air tanah berpedoman pada standar SNI 1965–2008.

Gambar 4.8 berikut adalah pengujian kadar air awal di laboratorium :



Gambar 4.8: Pelaksanaan Pengujian Kadar Air

Sumber : Dokumentasi Penelitian

3) Pengujian berat isi tanah

Pemeriksaan berat isi tanah mengacu pada standar SNI 03-3637-1994, seperti terlihat pada Gambar 4.9 dibawah ini :



Gambar 4.9: Pelaksanaan Pengujian Berat Isi Tanah

Sumber : Dokumentasi Penelitian

4) Pengujian *atterberg*

Pengujian *atterberg limits* dilakukan untuk mengetahui tingkat plastisitas tanah yang mengacu pada standar SNI 1967–2008. Gambar 4.10 berikut adalah alat pengujiannya :



Gambar 4.10: Alat Uji *Atterberg Limits*

Sumber : Dokumentasi Penelitian

Gambar 4.11 berikut adalah pengujian *atterberg limits* yang dilaksanakan di laboratorium :



Gambar 4.11: Pelaksanaan Pengujian *Atterberg Limits*

Sumber : Dokumentasi Penelitian

5) Pengujian berat jenis

Pemeriksaan berat jenis tanah mengacu pada standar SNI 1964–2008.

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat dari kepadatan seperti terlihat pada Gambar 4.12 dibawah ini :



Gambar 4.12: Pelaksanaan Pengujian Berat Jenis Tanah

Sumber : Dokumentasi Penelitian

b) Uji sifat-sifat mekanis

6) Uji *triaxial compression test*

Pengujian *triaxial compression test* mengacu pada standar SNI 3420-2106. Gambar 4.13 berikut adalah alat pengujiannya :



Gambar 4.13: Pelaksanaan Pengujian *Triaxial* UU

Sumber : Dokumentasi Penelitian

7) Uji CBR laboratorium

Pengujian CBR laboratorium mengacu pada standar SNI 03-1744-2008.

Pada Gambar 4.14 berikut adalah alat pengujiannya :



Gambar 4.14: Alat Uji CBR Laboratorium

Sumber : Dokumentasi Penelitian

8) Uji *proctor*

Pengujian pemadatan laboratorium mengacu pada standar SNI 1742-2008. Pada Gambar 4.15 dibawah ini alat pengujiannya :



Gambar 4.15: Pelaksanaan Pengujian Pemadatan Laboratorium

Sumber : Dokumentasi Penelitian

Pengujian sifat mekanis tanah dengan melakukan pengujian *triaxial compression test* untuk mendapatkan nilai kohesi (c) dan sudut geser (ϕ). Parameter ini digunakan untuk input data pada aplikasi *Plaxis 2D*. Hasil pengujian propertis dan mekanis terhadap tanah dasar yang dilaksanakan dilaboratorium didapat rekapitulasi data pengujian tanah dasar pada Tabel 4.1 dibawah ini:

Tabel 4.1: Rekapitulasi Data Pengujian Tanah Dasar

| No | Pengujian | Data | Satuan |
|----|------------------------------------|--------|-------------------|
| 1. | Berat volume basah (γ_b) | 17,84 | kN/m ³ |
| 2. | Berat volume kering (γ_d) | 14,47 | kN/m ³ |
| 3. | Angka pori (e) | 0,88 | - |
| 4. | Porositas (n) | 0,47 | - |
| 5. | Kadar air (w) | 27,58 | % |
| 6. | Berat jenis (Gs) | 2,6109 | - |
| 7. | <i>Sieve analysis</i> | | |
| | <i>Gravel</i> | 0,00 | % |
| | <i>Sand</i> | 0,39 | |
| | <i>Silt</i> | 99,61 | |
| | <i>Clay</i> | | |
| 8. | <i>Atterberg Limits</i> | | |
| | LL | 45,89 | % |
| | PL | 33,25 | |
| | PI | 12,64 | |
| 9. | Triaxial UU | | |
| | c | 20,59 | kN/m ² |
| | ϕ | 6,331 | ° |

Sumber : Olahan Penelitian

4.2.3 Pembuatan Campuran Mortar Busa

Penggunaan material ringan mortar busa merujuk pada kriteria-kriteria yaitu memiliki densitas kering material campuran, maksimum 0,8 gr/cm³, memiliki kuat minimum 600 kPa (6 kg/cm²), memiliki *flow* atau daya air (*flowability*) sebesar 180 mm \pm 20 mm dan dapat mengeras sendiri karena berperilaku seperti mortar beton, serta menggunakan lapis pencegah retak refleksi di atas timbunan mortar-busa, agar retakan yang terjadi di timbunan tidak akan merefleksi ke permukaan perkerasan.

Tahapan pembuatan mortar busa :

- a. Persiapan material dan peralatan



(a) Foam



(b) Semen



(c).Pasir



(d). Air

Gambar 4.16: Material Campuran Mortar Busa

Sumber : Dokumentasi Penelitian



Gambar 4.17: Mould Silinder Mortar Busa

Sumber : Dokumentasi Penelitian



(a)
*Compressor dan
Foam Generator*

(b)
Timbangan

(c)
Mixer

(d)
Pengayak Pasir

Gambar 4.18: Peralatan Pembuatan Campuran Mortar Busa

Sumber : Dokumentasi Penelitian

- b. Pembuatan busa (*foam*) campuran campuran *foam* dengan air

Bahan pembuat busa adalah cairan busa (*foam agent*) dengan air. Untuk membuat busa dilakukan pencampuran cairan busa dan air menggunakan *foam generator*. Setelah busa terbentuk dilakukan pemeriksaan berat isi standar $0,04 \pm 0,005 \text{ t/m}^3$ dan cukup dilakukan 1 kali dalam tahap pencampuran.

- 1) Untuk *job mix* awal, timbang agregat, semen dan air diambil perbandingan agregat sebesar 1:1, air sebanyak 0,5 dari berat semen
- 2) Perbandingan *foam* dan air 1:25, pengukuran dilakukan dengan menggunakan gelar ukur
- 3) Setelah itu dihubungkan *compressor* dengan *foam generator*



Gambar 4.19: Pembuatan *Foam*

Sumber : Dokumentasi Penelitian

- 4) *Foam* dan air dicampur didalam ember, dan dimasukkan kedalam *foam generator*, dengan tekanan 10 bar hingga tercampur sempurna
- c. Pembuatan material campuran (campuran *foam*, semen dan pasir)
- Material campuran yang terdiri semen, pasir dan air, semua material dicampur menggunakan *hand mixer* dan dengan komposisi material sesuai dengan perhitungan, hal ini dilakukan agar bisa diperoleh spesifikasi material ringan mortar busa yang dikehendaki, serta dilakukan pemeriksaan supaya tidak adanya gumpalan
- 1) Untuk *job mix* awal campuran *foam*, semen dan pasir diambil perbandingan berat: berat semen + agregat sebesar 1,2 : 1, dilakukan penimbangan seperti Gambar 4.20 agar hasil campuran *foam* sesuai dengan yang direncanakan



Gambar 4.20: Penimbangan Material Mortar Busa

Sumber : Dokumentasi Penelitian

- 2) Agregat dan semen dimasukkan kedalam bejana *mixer*, dilakukan pengadukan selama ± 2 menit
- 3) Selanjutnya campuran *foam* dimasukkan kedalam bejana *mixer* juga, dilakukan pengadukan lagi selama ± 2 menit, serta memastikan telah tercampur sempurna



Gambar 4.21: Pengadukan dengan *Mixer*

Sumber : Dokumentasi Penelitian

d. Pengujian berat isi (densitas) mortar dan *flow*

Pengujian berat isi material campuran yang telah dicampur dengan busa dilakukan sesaat setelah proses pencampuran. Pengujian nilai *flow* material mortar busa dilakukan dalam kondisi segar. Bahan tersebut dituangkan ke dalam *flow cane* hingga batas atasnya. Kemudian *flow cane* diangkat perlahan hingga sampel mengalir dan menyebar, kemudian dihitung diameternya setelah 1 menit kemudian, diameter hasil *flow* $180 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$.

Pengecekan *flow* sebagai berikut:

- 1) Hasil campuran dimasukkan ke dalam silinder di atas bidang yang rata dan ditimbang beratnya agar diketahui berat isi mortar
- 2) Silinder diangkat dan dilakukan pengukuran diameter alirannya untuk mengetahui berat isi mortar
- 3) Nilai *flow* harus memenuhi $18 \pm 2 \text{ cm}$



Gambar 4.22: Pengujian *Flow*

Sumber : Dokumentasi Penelitian

- e. Pembuatan dan pengujian benda uji
- 1) Cetakan *mould* mortar (diameter 10 cm dan tinggi 20 cm) dipersiapkan, dan campuran mortar busa dituang ke dalam *mould* tersebut sampai penuh. Penandaan pada benda uji dilakukan agar mudah untuk mengidentifikasinya. Setelah benda uji mengeras, cetakan dibuka.
 - 2) Campuran mortar dituang ke dalam *mould* silinder sesuai kebutuhan (dengan minimal benda uji 3 buah untuk setiap pengujian uji tekan 14 hari)
 - 3) Pemberian label pada setiap *mould* silinder dan di setiap pengujian Benda uji dibuka setelah 1 hari, dan dilakukan proses perawatan (*curing*). Pada proses perawatan benda uji dibungkus dengan menggunakan plastik, hal ini dimaksudkan agar benda uji dapat terhindar dari kontaminasi udara bebas sehingga proses oksidasi dapat dicegah.
 - 4) Dilakukan penimbangan benda uji dan dihitung densitasnya
 - 5) Pengujian kuat tekan bebas dilakukan pada waktu yang telah ditentukan (14 hari)
 - 6) Uji kadar air dilakukan dengan contoh benda uji yang telah diuji tekan bebas
 - 7) Dilakukan pemeriksaan nilai pengujian untuk dapat mengetahui nilai kuat tekan telah masuk ke dalam spesifikasi.



Gambar 4.23: *Mould* Silinder Mortar Busa

Sumber : Dokumentasi Penelitian

- f. Perawatan benda uji (*curing*)

Setelah cetakan dibuka, perlu dilakukan perawatan (*curing*) agar benda uji tidak mengalami kerusakan. Pada proses perawatan benda uji dibungkus dengan menggunakan plastik, hal ini dimaksudkan agar terhindar dari kontaminasi. Perawatan benda uji dilakukan sesuai SNI 03-4810-1998

- g. Pengujian berat isi dan kuat tekan bebas (*Unconfined Compressive Strength/UCS*). Pengujian berat isi mortar dilakukan sebelum pengujian kuat tekan bebas, dengan cara menimbang benda uji dan menghitung densitasnya, seperti pada Gambar 4.24 dibawah ini :



Gambar 4.24: Pengujian Berat Isi (Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, 2015a)

Sumber : Dokumentasi Penelitian

Gambar 4.25 menjelaskan tentang pengujian uji tekan bebas yang sesuai dengan SNI 03-3838-1994. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai UCS benda uji. Nilai UCS harus memenuhi persyaratan mortar busa. Jika nilai UCS benda uji sudah sesuai dengan yang dikehendaki maka komposisi material benda uji tersebut bisa digunakan dengan waktu 14 hari.



Gambar 4.25: Pengujian Kuat Tekan Bebas

Sumber : Dokumentasi Penelitian

- h. Pembuatan bekisting cetakan mortar busa dengan 3 ukuran (180 cm x 40 cm x 20 cm, 180 cm x 40 cm x 30 cm dan 180 cm x 40 cm x 40 cm) dengan mal kayu multiplek 12 mm, kayu 4 x 6 cm, direkatkan menggunakan paku dan baut. Seperti terlihat pada Gambar 4.26 dibawah ini :



Gambar 4.26: Bekisting Mortar Busa

Sumber : Dokumentasi Penelitian

- i. Tahap selanjutnya adalah melakukan pengecoran dengan densitas mortar busa $0,8 \text{ gr/cm}^3$ seperti terlihat pada Gambar 4.27. Pengecoran dilakukan secara manual dan pada umur mortar busa 14 hari setelah pengecoran, maka bekisting sudah bisa dilepas. Tabel 4.2 menjelaskan tentang hasil pengujian densitas mortar busa.



Gambar 4.27: Mortar Busa

Sumber : Dokumentasi Penelitian

Tabel 4.2: Hasil Pengujian Densitas Mortar Busa

| Benda Uji Mortar Busa | Umur Mortar Busa (Hari) | Densitas Mortar Busa (MPa) | Densitas Mortar Busa Rencana (MPa) |
|-----------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Sampel 1 | 14 | 0,802 | 0,8 |
| Sampel 2 | 14 | 0,840 | 0,8 |
| Sampel 3 | 14 | 0,802 | 0,8 |
| Sampel 4 | 14 | 0,840 | 0,8 |

Sumber : Hasil Penelitian

4.2.4 Pembuatan Plat Beton K-250

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 dan agregat halus

Agregat kasar dan agregat halus diambil dari *quarry* Kampar. Agregat kasar yang digunakan adalah batu pecah $\frac{1}{2}$.



Gambar 4.28: Agregat Kasar dan Agregat Halus

Sumber : Dokumentasi Penelitian

b. Semen

Semen yang digunakan adalah semen *Portland Cement Composit (PCC)* dari Semen Padang. Gambar 4.29 berikut adalah semen yang digunakan pada penelitian :



Gambar 4.29: Semen

Sumber : Dokumentasi Penelitian

c. Air

Dari hasil uji tekan yang diperoleh yaitu sesuai dengan mutu beton K-250 atau setara dengan $f_c' 20 \text{ MPa}$, maka komposisi tersebut akan dijadikan acuan sebagai *loading plate*. Berikut adalah Gambar alat uji tekan beton :



Gambar 4.30: Alat Uji Kuat Tekan Beton

Sumber : Dokumentasi Penelitian

Dilakukan *Job Mix Design* Rencana untuk beton K-250 (f_c 20 Mpa) untuk *loading plate* yang akan diletakkan di atas mortar busa didalam bak uji. Persiapan *loading plate* dimulai dengan merakit tulangan baja BJTP diameter 8 mm pada bagian Plat, 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 diberikan getaran agar Plat 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 4.31:. *Loading Plate*

Sumber : Dokumentasi Penelitian

Tabel 4.3: Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

| Benda Uji | Umur beton (Hari) | Mutu Beton (MPa) | Mutu Beton Rencana (MPa) |
|------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Sampel 1 | 14 | 21,737 | 20 |
| Sampel 2 | 14 | 23,409 | 20 |
| Sampel 3 | 14 | 19,743 | 20 |
| Sampel 4 | 28 | 22,977 | 20 |
| Sampel 5 | 28 | 25,467 | 20 |
| Sampel 6 | 28 | 19,525 | 20 |

Sumber : Hasil Penelitian

4.2.5 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 sekaligus dilakukan penyinaran agar kadar air tetap terjaga.

4.2.6. Pemasangan *Instrument Data Logger*

Instrument data logger digunakan untuk merekam data pergerakan mortar busa ketika diberi beban. *Data logger* berkapasitas 6 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. Kabel data pada *data logger* yang terhubung dengan komputer di kode seperti pada Tabel 4.4 berikut :

Tabel 4.4 Perletakan dan Kode Sensor LVDT

| No | Perletakan | Sensor | Nama Sensor | Kode |
|-----------|-------------------|---------------|----------------------|-------------|
| 1 | Mortar Busa | Sensor 1 | Mortar Busa sudut 1 | MB1 |
| 2 | Mortar Busa | Sensor 2 | Mortar Busa sudut 2 | MB2 |
| 3 | Mortar Busa | Sensor 3 | Mortar Busa sudut 3 | MB3 |
| 4 | Mortar Busa | Sensor 4 | Mortar Busa ditengah | MB4 |

Sumber : Hasil Penelitian

4.2.7 Pemasangan *Instrument Linier Variabel Differential Transformer (LVDT)*

LVDT atau *Linear Variable Differential Transformer*, adalah sensor yang berfungsi untuk mendeteksi penurunan yang terjadi. Sensor ini dipasang pada permukaan *loading plate* di empat titik, dengan tiga titik diletakkan di masing-masing sudut dan satu titik di tengah bidang *loading plate*. LVDT yang digunakan memiliki ukuran 50 mm. Pemasangan LVDT bertujuan untuk mengukur penurunan pada mortar busa akibat pemberian beban. Selanjutnya, LVDT dihubungkan ke *data logger* untuk merekam pembacaannya. Gambar 4.32 memperlihatkan skema pemasangan LVDT adalah sebagai berikut :

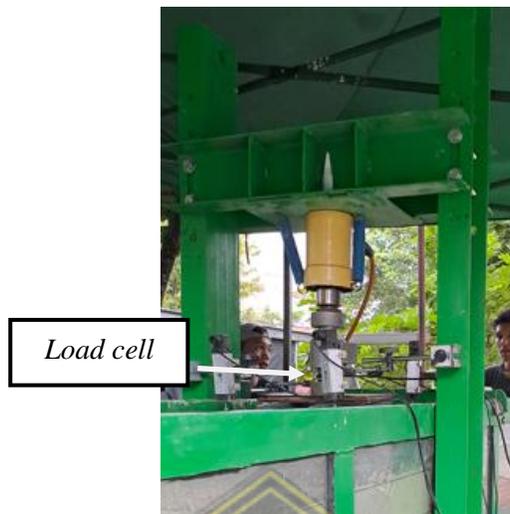


Gambar 4.32: Letak LVDT pada Box Uji

Sumber : Dokumentasi Penelitian

4.2.8. Pemasangan *Instrument Load Cell*

Load cell mampu mendeteksi beban yang diterapkan pada model, dan hasilnya dapat langsung dibaca pada data *logger*. Dalam penelitian ini, digunakan satu *unit load cell* dengan kapasitas 50 ton. Alat ini berfungsi untuk memastikan bahwa beban yang diberikan sesuai dengan kebutuhan, yaitu 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN, dan 20 kN. Gambar 4.33 memperlihatkan instrumen *load cell* dan pemasangannya pada *frame* pengujian.



Gambar 4.33: Letak *Load Cell*

Sumber : Dokumentasi Penelitian

4.2.9. Pelaksanaan Pengujian Eksperimental

Pemeriksaan dilakukan untuk memeriksa *instrument* yang telah dipasang dan melakukan uji coba pada alat tersebut guna memastikan bahwa sensor yang terpasang pada material model (mortar busa) berfungsi dengan optimal. 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 *hydraulik jack*.
2. Persiapan pembebanan vertikal
Beban vertikal yang diberikan adalah 5 kN, 10 kN, 15 kN, dan 20 kN. Pengoperasiaannya dilakukan secara manual. Pembebanan vertikal konstan terbuat dari 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 sebesar 0,56 kN.
3. Pelaksanaan pengujian dengan pembebanan vertikal terkecil yaitu 5 kN ditambah beban konstan 0,56 kN, 10 kN ditambah beban konstan 0,56 kN, 15 kN ditambah beban konstan 0,56 kN, dan 20 kN ditambah beban konstan 0,56 kN. Pengaturan

kapasitas pembebanan vertikal pada *load cell* disesuaikan dengan kebutuhan penelitian.

4. Sebelum proses pengambilan data dilaksanakan, pastikan bahwa semua *instrument* sensor telah terpasang dengan baik. Berikut adalah data *logger* dengan 4 kabel LVDT dan 1 kabel *load cell* yang terhubung dengan laptop melalui data *logger*
5. Perekaman data hasil penelitian dilaksanakan setelah semua *instrument* sensor berfungsi dengan baik. Pergerakan langsung tersimpan dalam komputer seperti pada Gambar 4.34 berikut :



Gambar 4.34: Penyimpanan Data *Logger* di Laptop

Sumber : Dokumentasi Penelitian

6. Selama pelaksanaan pengujian, data direkam ke laptop untuk memantau penurunan per satuan waktu sesuai dengan beban yang diterapkan. Setelah peralatan terhubung ke laptop, proses perekaman dilakukan selama tahap pembebanan yang diberikan.

Selama eksperimen di laboratorium, titik pemantauan penurunan (*settlement*) diletakkan di permukaan Plat beton, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.35 berikut ini :



Gambar 4.35: Titik Monitoring *Settlement*

Sumber : Dokumentasi Penelitian

Bahan yang digunakan dalam eksperimen di laboratorium adalah mortar busa dan Plat beton. Setiap bahan memiliki berat yang berbeda, dan berat masing-masing bahan tersebut ditunjukkan dalam Tabel 4.5 berikut

Tabel 4.5: Berat Material Benda Uji

| No | Material | Berat (kg) |
|----|-------------------------|------------|
| 1. | Mortar busa tebal 20 cm | 115,2 |
| 2. | Mortar busa tebal 30 cm | 172,8 |
| 3. | Mortar busa tebal 40 cm | 230,4 |
| 4. | Plat beton | 57,6 |

Sumber: Hasil Penelitian

Pengujian laboratorium untuk masing-masing tahapan adalah sebagai berikut :

1. Pengujian tanah lunak *subgrade* tanpa mortar busa
Tahapannya adalah :
 - a. Tanah lunak dimasukkan kedalam bak uji
 - b. Dilakukan pengujian *Dynamic Cone Penetrometer (DCP)* dan *sand cone*, pada tanah lunak
 - c. *Loading plate* diletakkan di atas tanah lunak
 - d. LVDT dipasang pada posisi yang telah ditetapkan
 - e. Uji pembebanan dilakukan dengan alat *hydraulic jack* pada *loading cell*
 - f. *Settlement* didapatkan dari data *logger* yang terhubung ke laptop dan tersimpan pada *file data*.

Pengujian pada tanah lunak tanpa perkuatan ini terdiri dari tebal tanah lunak *subgrade* 60 cm, 80 cm, 90 cm dan 100 cm

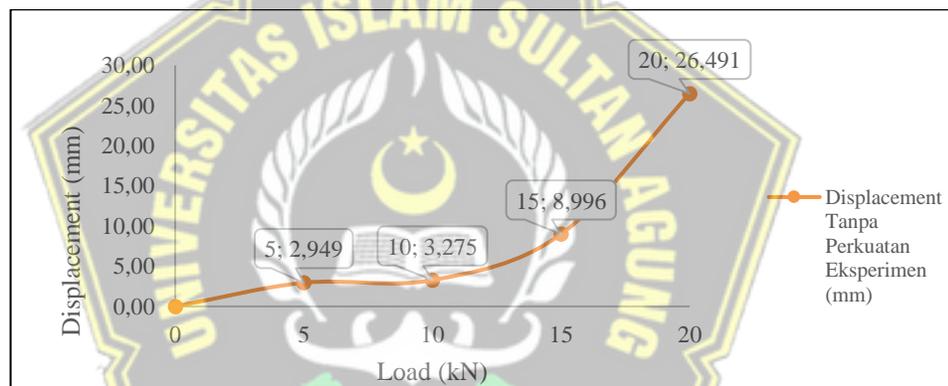
a. Tanah lunak 60 cm Tanpa Mortar Busa

Tabel 4.6: *Settlement* Tanah Lunak 60 cm Tanpa Mortar Busa

| Beban (kN) | <i>Settlement</i> (mm) |
|------------|------------------------|
| 0 | 0 |
| 5 | 2,949 |
| 10 | 3,275 |
| 15 | 8,996 |
| 20 | 26,491 |

Sumber: Hasil Penelitian

Gambar 4.36 berikut menunjukkan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak tanpa perkuatan mortar busa :



Gambar 4.36: *Settlement* yang Terjadi pada Tanah Lunak tebal 60 cm Tanpa Mortar Busa

Sumber: Hasil Penelitian

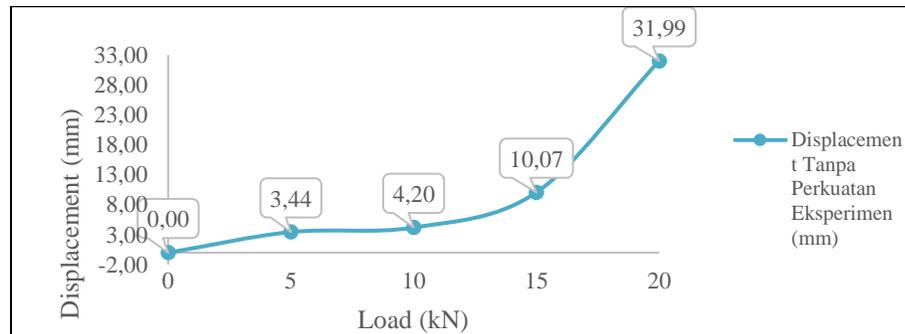
Pada grafik di atas terlihat *settlement* maksimum terjadi pada beban 20 kN sebesar 26,491 kN

b. Tanah lunak 80 cm Tanpa Mortar Busa

Tabel 4.7: *Settlement* Tanah Lunak 80 cm Tanpa Mortar Busa

| Beban (kN) | <i>Settlement</i> (mm) |
|------------|------------------------|
| 0 | 0 |
| 5 | 3,444 |
| 10 | 4,197 |
| 15 | 10,065 |
| 20 | 31,989 |

Gambar 4.37 berikut menunjukkan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak tanpa perkuatan mortar busa :



Gambar 4.37: *Settlement* yang Terjadi pada Tanah Lunak tebal 80 cm Tanpa Perkuatan Mortar Busa

Sumber : Hasil Penelitian

Pada gambar terlihat *settlement* maksimum terjadi pada beban 20 kN sebesar 31,99 kN

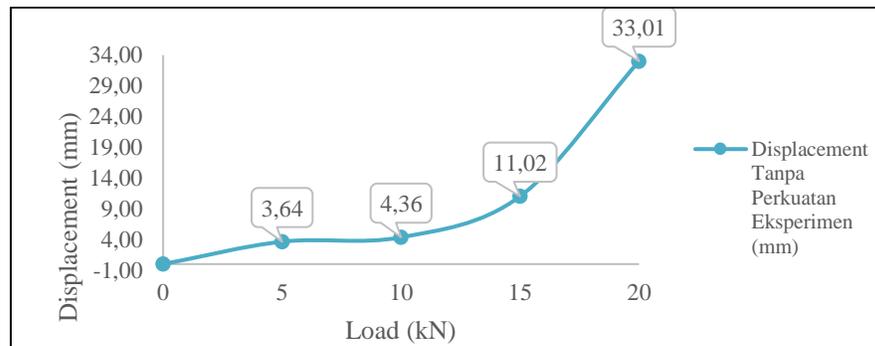
c. Tanah lunak 90 cm

Tabel 4.8: *Settlement* Tanah Lunak 90 cm Tanpa Perkuatan Mortar Busa

| Beban (kN) | <i>Settlement</i> (mm) |
|------------|------------------------|
| 0 | 0 |
| 5 | 3,643 |
| 10 | 4,355 |
| 15 | 11,023 |
| 20 | 33,008 |

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar 4.38 berikut menunjukkan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak tanpa perkuatan mortar busa :



Gambar 4.38: *Settlement* yang Terjadi pada Tanah Lunak tebal 90 cm Tanpa Perkuatan Mortar Busa

Sumber : Hasil Penelitian

Pada gambar terlihat *settlement* maksimum terjadi pada beban 20 kN sebesar 33,008 kN

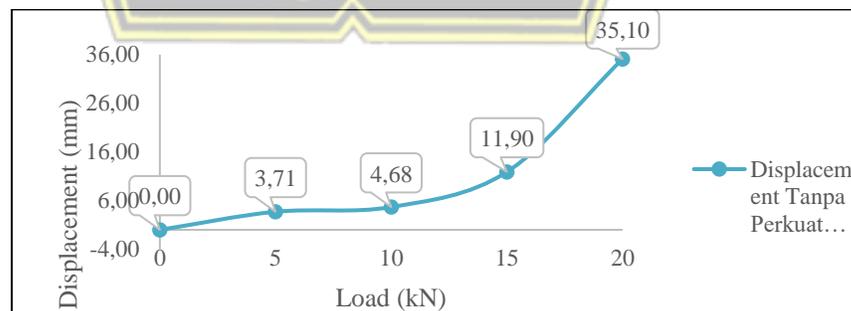
d. Tanah lunak 100 cm

Tabel 4.9: *Settlement* Tanah Lunak 100 cm Tanpa Perkuatan Mortar Busa

| Beban (kN) | <i>Settlement</i> (mm) |
|------------|------------------------|
| 0 | 0 |
| 5 | 3,711 |
| 10 | 4,678 |
| 15 | 11,897 |
| 20 | 35,098 |

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar 4.39 berikut menunjukkan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak tanpa perkuatan mortar busa :



Gambar 4.39: *Settlement* yang Terjadi pada Tanah Lunak Tebal 100 cm Tanpa Perkuatan Mortar Busa

Sumber : Hasil Penelitian

Pada gambar terlihat *settlement* maksimum terjadi pada beban 20 kN sebesar 35,10 kN

2. Pengujian 2

Pada pengujian ini tanah lunak (*subgrade*) 60 cm dengan perkuatan mortar busa 20 cm dalam kondisi kering (tanpa Muka Air Tanah). Tahapannya adalah :

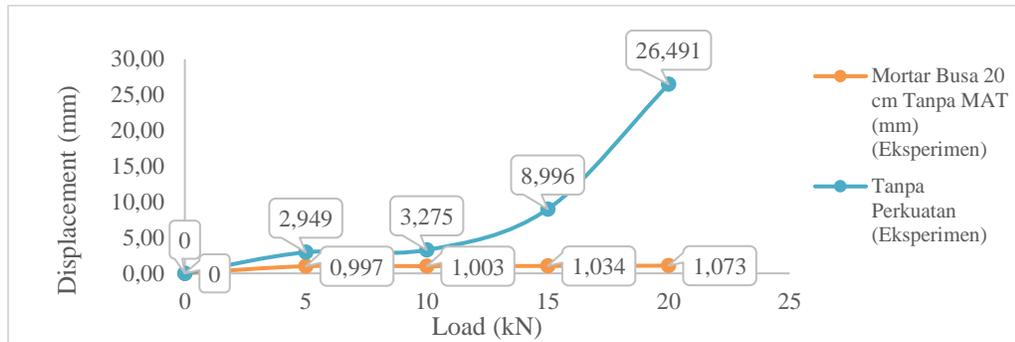
- a. Tanah lunak dimasukkan kedalam bak uji
- b. Dilakukan pengujian *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) dan *sand cone* pada tanah lunak
- c. Separator geotekstil di hampar di atas tanah lunak
- d. Lapisan perkuatan mortar busa dengan tebal 20 cm diletakkan di atas tanah lunak dan geotekstil
- e. *Loading plate* diletakkan di atas tanah lunak
- f. LVDT dipasang pada posisi yang telah ditetapkan
- g. Uji pembebanan dilakukan dengan alat *hydraulic jack* pada *load cell*
- h. *Settlement* didapatkan dari data *logger* yang terhubung ke laptop dan tersimpan pada komputer

Tabel 4.10: *Settlement* Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 20 cm Tanpa MAT

| Beban (kN) | <i>Settlement</i> (mm) |
|------------|------------------------|
| 0 | 0 |
| 5 | 0,997 |
| 10 | 1,008 |
| 15 | 1,034 |
| 20 | 1,073 |

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar 4.40 berikut menunjukkan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 20 cm :



Gambar 4.40: *Settlement* yang Terjadi pada Tanah Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 20 cm

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar di atas menjelaskan tentang penurunan maksimum yang terjadi pada pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 20 cm adalah pada pembebanan 20 kN sebesar 1,073 mm. Sedangkan penurunan yang terjadi tanpa menggunakan perkuatan mortar busa pada beban 20 kN adalah 26,491 mm. Hal ini menunjukkan bahwa tanah lunak yang diberi perkuatan mortar busa tebal 20 cm dapat mengurangi penurunan dibandingkan dengan tanpa perkuatan mortar busa sebesar 95,95%.

3. Pengujian 3

Pada pengujian ini tanah lunak (*subgrade*) 60 cm dengan perkuatan mortar busa 30 cm dalam kondisi kering (tanpa Muka Air Tanah). Tahapannya adalah :

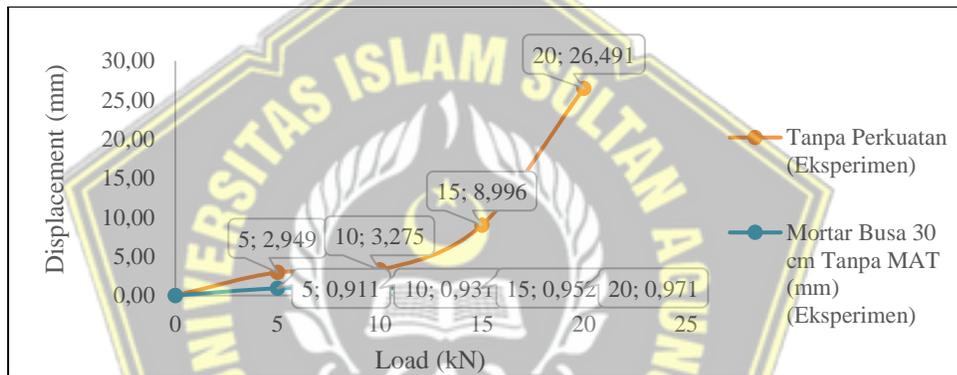
- a. Tanah lunak dimasukkan kedalam bak uji
- b. Dilakukan pengujian *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) pada tanah lunak
- c. Separator geotekstil di hampar di atas tanah lunak
- d. Lapisan perkuatan mortar busa dengan tebal 30 cm diletakkan di atas tanah lunak dan geotekstil
- e. *Loading plate* diletakkan di atas tanah lunak
- f. LVDT dipasang pada posisi yang telah ditetapkan
- g. Uji pembebanan dilakukan dengan alat *hydraulic jack* pada *load cell*
- h. *Settlement* didapatkan dari data *logger* yang terhubung ke laptop dan tersimpan pada komputer

Tabel 4.11: *Settlement* Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa 30 cm Tanpa MAT

| Beban (kN) | <i>Settlement</i> (mm) |
|------------|------------------------|
| 0 | 0 |
| 5 | 0,911 |
| 10 | 0,931 |
| 15 | 0,952 |
| 20 | 0,971 |

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar 4.41 berikut menunjukkan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 30 cm :



Gambar 4.41: *Settlement* yang Terjadi pada Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 30 cm

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar di atas menjelaskan tentang penurunan maksimum yang terjadi pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 30 cm adalah pada pembebanan 20 kN sebesar 0,971 mm. Sedangkan penurunan yang terjadi tanpa menggunakan perkuatan mortar busa pada beban 20 kN adalah 26,491 mm. Hal ini menunjukkan bahwa tanah lunak yang diberi perkuatan mortar busa tebal 30 cm dapat mengurangi penurunan dibandingkan dengan tanpa perkuatan mortar busa sebesar 96,33%.

4. Pengujian 4

Pada pengujian ini tanah lunak (*subgrade*) 60 cm dengan perkuatan mortar busa 40 cm dalam kondisi kering (tanpa Muka Air Tanah). Tahapannya adalah :

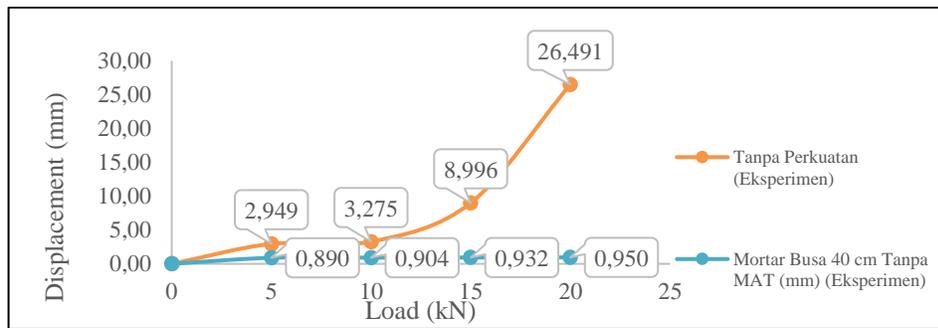
- a. Tanah lunak dimasukkan kedalam bak uji
- b. Dilakukan pengujian *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) pada tanah lunak
- c. Separator geotekstil dihampar di atas tanah lunak
- d. Lapisan perkuatan mortar busa dengan tebal 40 cm diletakkan di atas tanah lunak dan geotekstil
- e. *Loading plate* diletakkan di atas tanah lunak
- f. LVDT dipasang pada posisi yang telah ditetapkan
- g. Uji pembebanan dilakukan dengan alat *hydraulic jack* pada *loading cell*
- h. *Settlement* didapatkan dari data *logger* yang terhubung ke laptop dan tersimpan pada komputer

Tabel 4.12: *Settlement* Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa 40 cm Tanpa MAT

| Beban (kN) | Settlement (mm) |
|-------------------|------------------------|
| 0 | 0 |
| 5 | 0,890 |
| 10 | 0,940 |
| 15 | 0,912 |
| 20 | 0,950 |

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar 4.42 berikut menunjukkan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 40 cm :



Gambar 4.42: *Settlement* yang Terjadi pada Tanah Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 40 cm

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar di atas menjelaskan tentang penurunan maksimum yang terjadi pada pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 40 cm adalah pada pembebanan 20 kN sebesar 0,950 mm. Sedangkan penurunan yang terjadi tanpa menggunakan perkuatan mortar busa pada beban 20 kN adalah 26,491 mm. Hal ini menunjukkan bahwa tanah lunak yang diberi perkuatan mortar busa tebal 40 cm dapat mengurangi penurunan dibandingkan dengan tanpa perkuatan mortar busa sebesar 96,41%.

5. Pengujian 5

Pada pengujian ini tanah lunak (*subgrade*) 60 cm dengan perkuatan mortar busa 20 cm dalam Muka Air Tanah (MAT) terletak di permukaan *subgrade*. Tahapannya adalah :

- a. Tanah lunak dimasukkan kedalam bak uji
- b. Dilakukan pengujian *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) dan *sand cone* pada tanah lunak
- c. Separator geotekstil di hampar di atas tanah lunak
- d. Lapisan perkuatan mortar busa dengan tebal 20 cm diletakkan di atas tanah lunak dan geotekstil
- e. Bak uji digenangi air hingga permukaan *subgrade*
- f. *Loading plate* diletakkan di atas mortar busa
- g. LVDT dipasang pada posisi yang telah ditetapkan

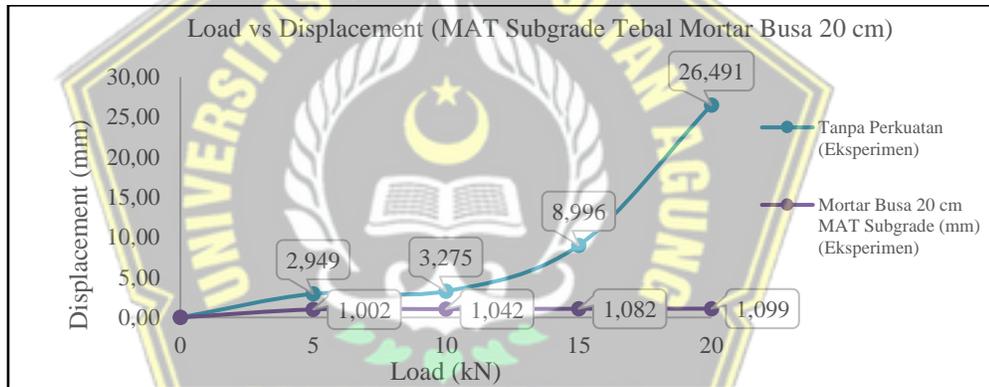
- h. Uji pembebanan dilakukan dengan alat *hydraulic jack* pada *load cell*
- i. *Settlement* didapatkan dari data *logger* yang terhubung ke laptop dan tersimpan pada komputer

Tabel 4.13: *Settlement* Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 20 cm MAT *Subgrade*

| Beban (kN) | <i>Settlement</i> (mm) |
|------------|------------------------|
| 0 | 0 |
| 5 | 1,002 |
| 10 | 1,042 |
| 15 | 1,082 |
| 20 | 1,099 |

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar 4.43 berikut menunjukkan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 20 cm MAT di permukaan *Subgrade*:



Gambar 4.43: *Settlement* yang Terjadi pada Tanah Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 20 cm MAT di Permukaan *Subgrade*

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar di atas menjelaskan tentang penurunan maksimum yang terjadi pada pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 20 cm muka air tanah terletak pada permukaan *subgrade* adalah pada pembebanan 20 kN sebesar 1,099 mm. Sedangkan penurunan yang terjadi tanpa menggunakan perkuatan mortar busa pada beban 20 kN adalah 26,491 mm. Muka air tanah di permukaan *subgrade* mengakibatkan penurunan yang terjadi semakin kecil daripada kondisi tidak terendam air. Besar penurunan yang terjadi pada *subgrade* tebal 20 kondisi

MAT pada permukaan *subgrade* dibandingkan dengan tanpa perkuatan adalah sebesar 95,851%.

6. Pengujian 6

Pada pengujian ini tanah lunak (*subgrade*) 60 cm dengan perkuatan mortar busa 30 cm dalam Muka Air Tanah (MAT) terletak di permukaan *subgrade*. Tahapannya adalah :

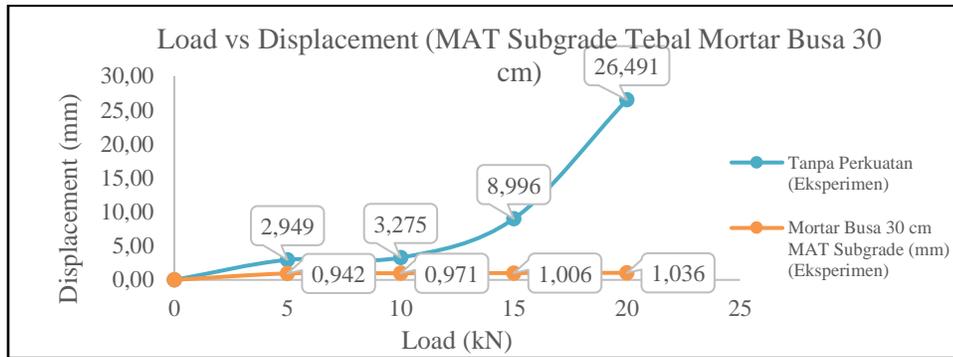
- a. Tanah lunak dimasukkan kedalam bak uji
- b. Dilakukan pengujian *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) dan *sand cone* pada tanah lunak
- c. Separator geotekstil di hampar di atas tanah lunak
- d. Lapisan perkuatan mortar busa dengan tebal 30 cm diletakkan di atas tanah lunak dan geotekstil
- e. Bak uji digenangi air hingga permukaan *subgrade*
- f. *Loading plate* diletakkan di atas mortar busa
- g. LVDT dipasang pada posisi yang telah ditetapkan
- h. Uji pembebanan dilakukan dengan alat *hydraulic jack* pada *loading cell*
- i. *Settlement* didapatkan dari data *logger* yang terhubung ke laptop dan tersimpan pada komputer

Tabel 4.14: *Settlement* Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 30 cm
MAT *Subgrade*

| Beban (kN) | <i>Settlement</i> (mm) |
|------------|------------------------|
| 0 | 0 |
| 5 | 0,942 |
| 10 | 0,971 |
| 15 | 1,006 |
| 20 | 1,036 |

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar 4.44 berikut menunjukkan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 30 cm MAT di permukaan *Subgrade*:



Gambar 4.44: *Settlement* yang Terjadi pada Tanah Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 30 cm MAT di Permukaan *Subgrade*

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar di atas menjelaskan tentang penurunan maksimum yang terjadi pada pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 30 cm muka air tanah terletak pada permukaan *subgrade* adalah pada pembebanan 20 kN sebesar 1,036 mm. Sedangkan penurunan yang terjadi tanpa menggunakan perkuatan mortar busa pada beban 20 kN adalah 26,491 mm. Muka air tanah di permukaan *subgrade* mengakibatkan penurunan yang terjadi semakin kecil daripada kondisi tidak terendam air. Besar penurunan yang terjadi pada *subgrade* tebal 30 kondisi MAT pada permukaan *subgrade* dibandingkan dengan tanpa perkuatan adalah 96,089%.

7. Pengujian 7

Pada pengujian ini tanah lunak (*subgrade*) 60 cm dengan perkuatan mortar busa 40 cm dalam Muka Air Tanah (MAT) terletak di permukaan *subgrade*.

Tahapannya adalah :

- a. Tanah lunak dimasukkan kedalam bak uji
- b. Dilakukan pengujian *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) dan *sand cone* pada tanah lunak
- c. Separator geotekstil di hampar di atas tanah lunak
- d. Lapisan perkuatan mortar busa dengan tebal 30 cm diletakkan di atas tanah lunak dan geotekstil
- e. Bak uji digenangi air hingga permukaan *subgrade*

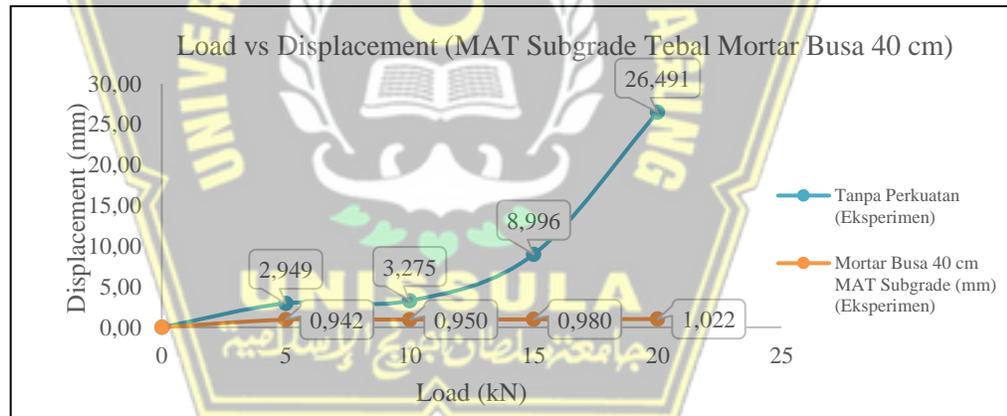
- f. *Loading plate* diletakkan di atas mortar busa
- g. LVDT dipasang pada posisi yang telah ditetapkan
- h. Uji pembebanan dilakukan dengan alat *hydraulic jack* pada *loading cell*
- i. *Settlement* didapatkan dari data *logger* yang terhubung ke laptop dan tersimpan pada *file data*

Tabel 4.15: *Settlement* Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 40 cm MAT *Subgrade*

| Beban (kN) | Settlement (mm) |
|-------------------|------------------------|
| 0 | 0 |
| 5 | 0,942 |
| 10 | 0,950 |
| 15 | 0,980 |
| 20 | 1,022 |

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar 4.45 berikut menunjukkan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 40 cm MAT di permukaan *Subgrade*:



Gambar 4.45: *Settlement* yang Terjadi pada Tanah Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 40 cm MAT di Permukaan *Subgrade*

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar di atas menjelaskan tentang penurunan maksimum yang terjadi pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 40 cm muka air tanah terletak pada permukaan *subgrade* adalah pada pembebanan 20 kN sebesar 1,022 mm. Sedangkan penurunan yang terjadi tanpa menggunakan perkuatan mortar busa pada beban 20 kN adalah 26,491 mm. Muka air tanah di permukaan

subgrade mengakibatkan penurunan yang terjadi semakin kecil daripada kondisi tidak terendam air. Besar penurunan yang terjadi pada *subgrade* tebal 40 kondisi MAT pada permukaan *subgrade* dibandingkan dengan tanpa perkuatan adalah 96,142%.

8. Pengujian 8

Pada pengujian ini tanah lunak (*subgrade*) 60 cm dengan perkuatan mortar busa 20 cm dalam Muka Air Tanah (MAT) terletak di tengah plat beton. Tahapannya adalah :

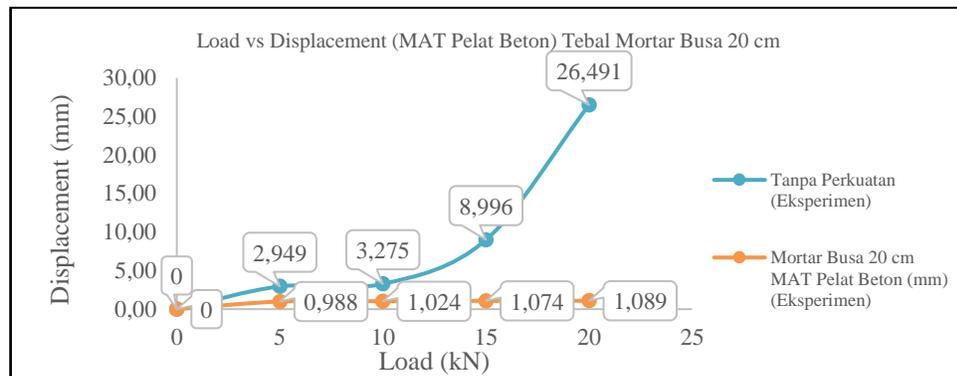
- a. Tanah lunak dimasukkan kedalam bak uji
- b. Dilakukan pengujian *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) dan *sand cone* pada tanah lunak
- c. Separator geotekstil di hampar di atas tanah lunak
- d. Lapisan perkuatan mortar busa dengan tebal 20 cm diletakkan di atas tanah lunak dan geotekstil
- e. *Loading plate* diletakkan di atas mortar busa
- f. Bak uji digenangi air hingga ditengah plat beton
- g. LVDT dipasang pada posisi yang telah ditetapkan
- h. Uji pembebanan dilakukan dengan alat *hydraulic jack* pada *loading cell*
- i. *Settlement* didapatkan dari data *logger* yang terhubung ke laptop dan tersimpan pada *file data*

Tabel 4.16: *Settlement* Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 20 cm MAT di Tengah Plat Beton

| Beban (kN) | <i>Settlement</i> (mm) |
|-------------------|-------------------------------|
| 0 | 0 |
| 5 | 0,988 |
| 10 | 1,024 |
| 15 | 1,074 |
| 20 | 1,089 |

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar 4.46 berikut menunjukkan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 20 cm MAT ditengah plat beton



Gambar 4.46: *Settlement* yang Terjadi pada Tanah Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 20 cm MAT di Tengah Plat Beton

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar di atas menjelaskan tentang penurunan maksimum yang terjadi pada pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 20 cm muka air tanah terletak pada Plat beton adalah pada pembebanan 20 kN sebesar 1,089 mm. Sedangkan penurunan yang terjadi tanpa menggunakan perkuatan mortar busa pada beban 20 kN adalah 26,491 mm. Muka air tanah pada Plat beton mengakibatkan penurunan yang terjadi semakin kecil daripada kondisi tidak terendam air. Besar penurunan yang terjadi pada *subgrade* tebal 20 kondisi MAT diplat beton dibandingkan dengan tanpa perkuatan adalah 92,865%.

9. Pengujian 9

Pada pengujian ini tanah lunak (*subgrade*) 60 cm dengan perkuatan mortar busa 30 cm dalam Muka Air Tanah (MAT) terletak di tengah plat beton. Tahapannya adalah :

- a. Tanah lunak dimasukkan kedalam bak uji
- b. Dilakukan pengujian *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) dan *sand cone* pada tanah lunak
- c. Separator geotekstil di hampar di atas tanah lunak
- d. Lapisan perkuatan mortar busa dengan tebal 20 cm diletakkan di atas tanah lunak dan geotekstil
- e. *Loading plate* diletakkan di atas mortar busa
- f. Bak uji digenangi air hingga ditengah plat beton

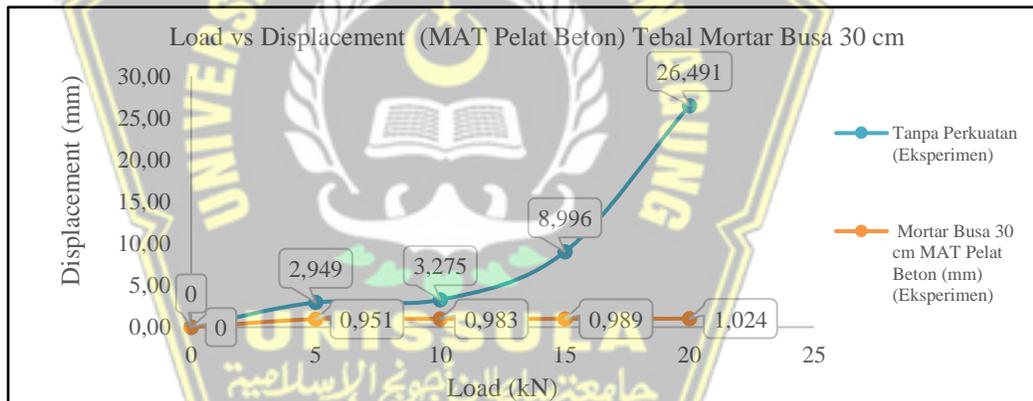
- g. LVDT dipasang pada posisi yang telah ditetapkan
- h. Uji pembebanan dilakukan dengan alat *hydraulic jack* pada *loading cell*
- i. *Settlement* didapatkan dari data *logger* yang terhubung ke laptop dan tersimpan pada *file data*.

Tabel 4.17: *Settlement* Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 30 cm MAT Ditengah Plat Beton

| Beban (kN) | <i>Settlement</i> (mm) |
|------------|------------------------|
| 0 | 0 |
| 5 | 0,951 |
| 10 | 0,983 |
| 15 | 0,989 |
| 20 | 1,024 |

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar 4.47 berikut menunjukkan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 30 cm MAT ditengah plat beton



Gambar 4.47: *Settlement* yang Terjadi pada Tanah Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 30 cm MAT di Tengah Plat Beton

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar di atas menjelaskan tentang penurunan maksimum yang terjadi pada pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 30 cm muka air tanah terletak pada Plat beton adalah pada pembebanan 20 kN sebesar 1,024 mm. Sedangkan penurunan yang terjadi tanpa menggunakan perkuatan mortar busa pada beban 20 kN adalah 26,491 mm. Muka air tanah pada Plat beton

mengakibatkan penurunan yang terjadi semakin kecil daripada kondisi tidak terendam air. Besar penurunan yang terjadi pada *subgrade* tebal 30 kondisi MAT diPlat beton dibandingkan dengan tanpa perkuatan adalah 96,134%.

10. Pengujian 10

Pada pengujian ini tanah lunak (*subgrade*) 60 cm dengan perkuatan mortar busa 40 cm dalam Muka Air Tanah (MAT) terletak di tengah plat beton. Tahapannya adalah :

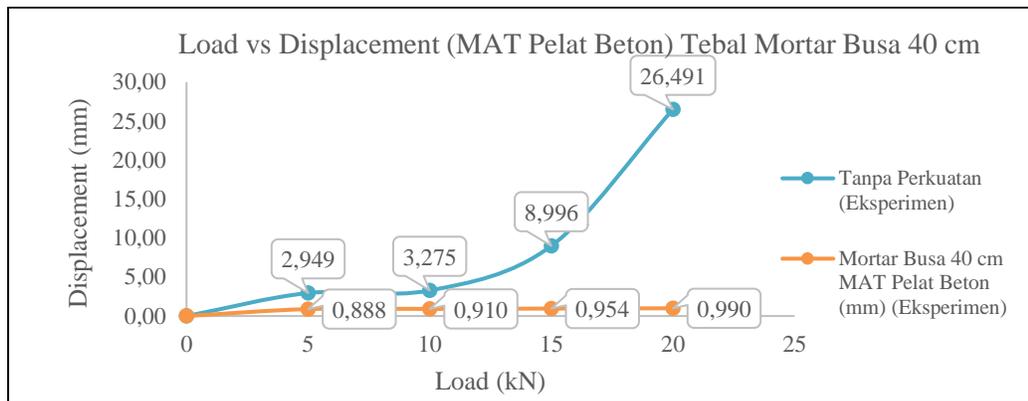
- a. Tanah lunak dimasukkan kedalam bak uji
- b. Dilakukan pengujian *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) dan *sand cone* pada tanah lunak
- c. Separator geotekstil di hampar di atas tanah lunak
- d. Lapisan perkuatan mortar busa dengan tebal 40 cm diletakkan di atas tanah lunak dan geotekstil
- e. *Loading plate* diletakkan di atas mortar busa
- f. Bak uji digenangi air hingga ditengah plat beton
- g. LVDT dipasang pada posisi yang telah ditetapkan
- h. Uji pembebanan dilakukan dengan alat *hydraulic jack* pada *loading cell*
- i. *Settlement* didapatkan dari data *logger* yang terhubung ke laptop dan tersimpan pada komputer

Tabel 4.18: *Settlement* Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 40 cm MAT Ditengah Plat Beton

| Beban (kN) | <i>Settlement</i> (mm) |
|------------|------------------------|
| 0 | 0 |
| 5 | 0,888 |
| 10 | 0,910 |
| 15 | 0,954 |
| 20 | 0,990 |

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar 4.48 berikut menunjukkan *settlement* yang terjadi pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 40 cm MAT ditengah plat beton



Gambar 4.48: *Settlement* yang Terjadi pada Tanah Tanah Lunak dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 40 cm MAT di Tengah Plat Beton

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar di atas menjelaskan tentang penurunan maksimum yang terjadi pada pada tanah lunak dengan perkuatan mortar busa tebal 40 cm muka air tanah terletak di Plat beton adalah pada pembebanan 20 kN sebesar 0,990 mm. Sedangkan penurunan yang terjadi tanpa menggunakan perkuatan mortar busa pada beban 20 kN adalah 26,491 mm. Muka air tanah pada Plat beton mengakibatkan penurunan yang terjadi semakin kecil daripada kondisi tidak terendam air. Besar penurunan yang terjadi pada *subgrade* tebal 40 kondisi MAT di Plat beton dibandingkan dengan tanpa perkuatan adalah 96,263%.

Keseluruhan eksperimen di atas menyatakan dengan beban maksimum 20 kN terjadi penurunan terbesar, rekapannya dapat dilihat pada Tabel 4.19 dibawah ini :

Tabel 4.19: Rekapian Pengujian Laboratorium Beban 20 kN

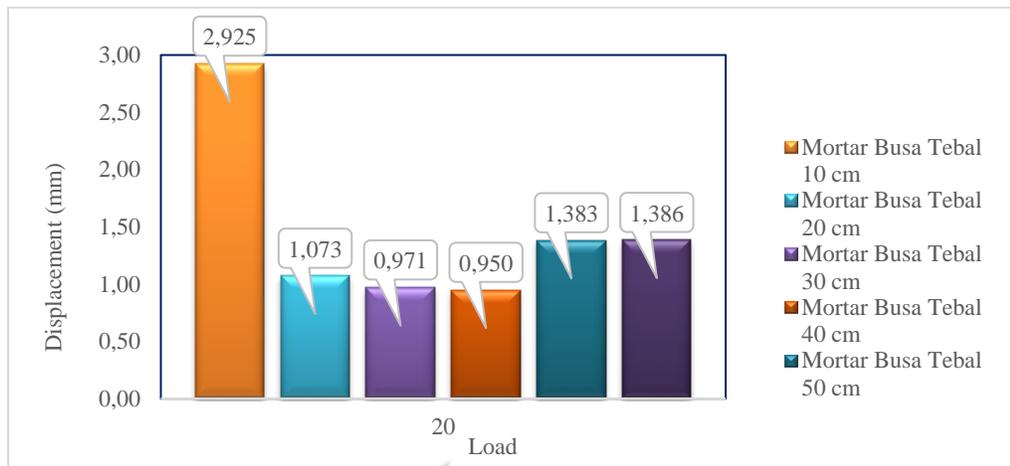
| No | Uraian | Pengujian | <i>Settlement</i> (mm) |
|----|-------------|--|------------------------|
| 1 | Percobaan 1 | Tanah lunak <i>subgrade</i> 60 cm tanpa mortar busa | 26,491 |
| 2 | Percobaan 2 | Tanah lunak <i>subgrade</i> 80 cm tanpa mortar busa | 31,989 |
| 3 | Percobaan 3 | Tanah lunak <i>subgrade</i> 90 cm tanpa mortar busa | 33,008 |
| 4 | Percobaan 4 | Tanah lunak <i>subgrade</i> 100 cm tanpa mortar busa | 35,098 |
| 5 | Percobaan 5 | Tanah lunak <i>subgrade</i> 60 cm, mortar busa tebal 20 cm, kondisi kering | 1,073 |

| No | Uraian | Pengujian | Settlement (mm) |
|----|--------------|--|-----------------|
| 6 | Percobaan 6 | Tanah lunak <i>subgrade</i> 60 cm, mortar busa tebal 20 cm, kondisi muka air tanah dipermukaan <i>subgrade</i> | 0,971 |
| 7 | Percobaan 7 | Tanah lunak <i>subgrade</i> 60 cm, mortar busa tebal 20 cm, kondisi muka air tanah ditengah plat beton | 0,950 |
| 8 | Percobaan 8 | Tanah lunak <i>subgrade</i> 60 cm, mortar busa tebal 30 cm, kondisi kering | 1,099 |
| 9 | Percobaan 9 | Tanah lunak <i>subgrade</i> 60 cm, mortar busa tebal 30 cm, kondisi muka air tanah dipermukaan <i>subgrade</i> | 1,036 |
| 10 | Percobaan 10 | Tanah lunak <i>subgrade</i> 60 cm, mortar busa tebal 30 cm, kondisi muka air tanah ditengah plat beton | 1,022 |
| 11 | Percobaan 11 | Tanah lunak <i>subgrade</i> 60 cm, mortar busa tebal 40 cm, kondisi kering | 1,089 |
| 12 | Percobaan 12 | Tanah lunak <i>subgrade</i> 60 cm, mortar busa tebal 40 cm, kondisi muka air tanah dipermukaan <i>subgrade</i> | 1,024 |
| 13 | Percobaan 13 | Tanah lunak <i>subgrade</i> 60 cm, mortar busa tebal 40 cm, kondisi muka air tanah ditengah plat beton | 0,990 |

Sumber : Hasil Penelitian

Tabel 4.19 di atas menjelaskan bahwa penggunaan mortar busa sebagai perkuatan menyebabkan semakin kecil penurunan yang terjadi. Semakin tinggi muka air tanah maka dapat mengurangi terjadinya penurunan tanah juga.

Analisis numerik *Plaxis* 2D yang dilakukan berdasarkan ketebalan mortar busa dengan variasi, 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, dan 60 cm dapat dilihat pada Gambar 4.49 berikut :

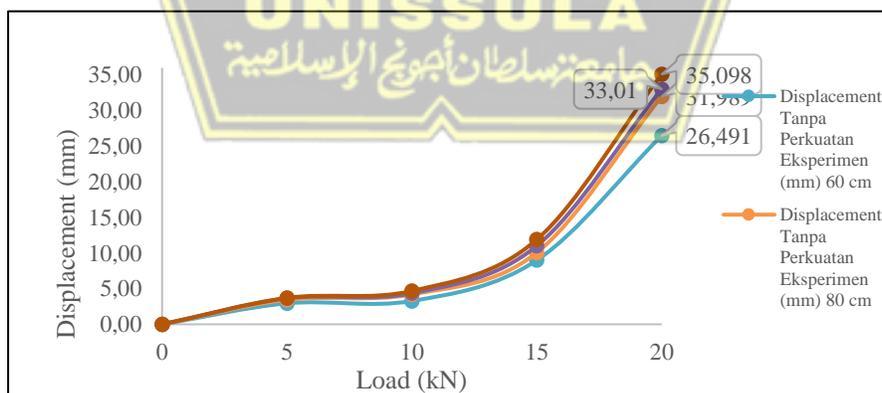


Gambar 4.49: *Settlement* yang Terjadi pada Tanah Lunak Variasi Ketebalan Mortar Busa Berdasarkan Numerik *Plaxis 2D*

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar di atas menjelaskan bahwa penurunan yang terjadi dengan divariasikan ketebalan mortar busa menghasilkan penurunan yang paling rendah pada ketebalan mortar busa 40 cm sebesar 0,950 mm dibandingkan dengan variasi lainnya yaitu 2/3 dari tebal tanah dasar 60 cm.

Sedangkan hasil eksperimen pada timbunan tanah lunak dengan ketebalan 60 cm, 80 cm, 90 cm dan 100 cm tanpa perkuatan mortar busa didapat hasil perbandingan pada Gambar 4.50 berikut ini :



Gambar 4.50: *Settlement* pada Tanah Tanah Lunak Tanpa Perkuatan

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar 4.50 di atas menjelaskan penurunan yang terjadi pada tanah lunak dengan variasi ketebalan dan beban yang diberikan tanpa perkuatan. Penurunan terbesar terjadi pada tebal tanah lunak 100 cm yaitu sebesar 35,098 cm

Berdasarkan penelitian yang dilakukan jika dibandingkan dengan menggunakan perkuatan mortar busa dapat dilihat pada tabel berikut ini :

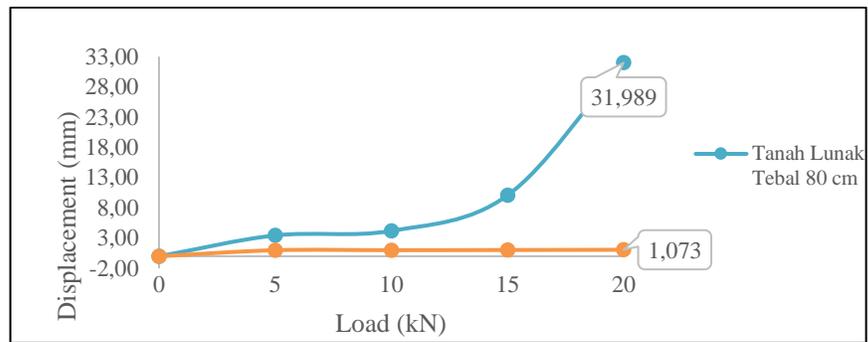
Tabel 4.20: Tabel Perbandingan Eksperimen Tanah Lunak Tanpa dan Dengan Mortar Busa pada Beban 20 kN

| No | Eksperimen | Settlement (mm) | Selisih (mm) | Deviasi (%) |
|----|---------------------------------------|-----------------|--------------|-------------|
| 1. | Tanah lunak tebal 80 cm | 31,989 | 30,916 | 96,65 |
| | Tanah lunak 60 cm + mortar busa 20 cm | 1,073 | | |
| 3. | Tanah lunak tebal 90 cm | 33,008 | 32,037 | 97,06 |
| | Tanah lunak 60 cm + mortar busa 30 cm | 0,971 | | |
| 4. | Tanah lunak tebal 100 cm | 35,098 | 34,148 | 97,29 |
| | Tanah lunak 60 cm + mortar busa 40 cm | 0,950 | | |

Sumber : Hasil Penelitian

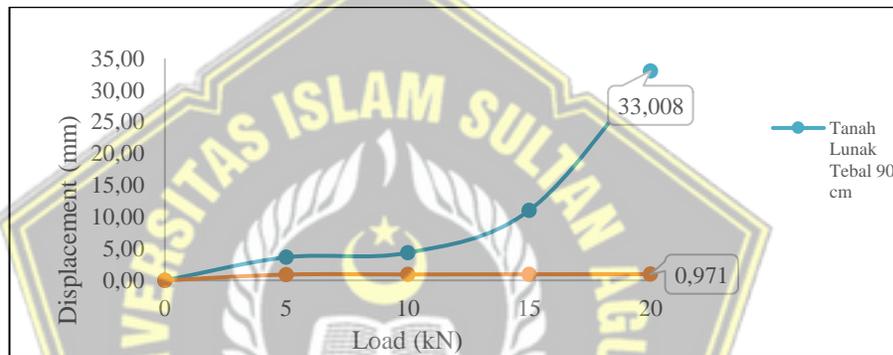
Tabel 4.20 di atas menerangkan dengan ketebalan yang sama penggunaan mortar busa dapat memperkecil terjadinya penurunan dibandingkan tanpa menggunakan mortar busa sebagai perkuatan. Hal ini dapat dibuktikan dengan deviasi yang dihasilkan sebesar 96,65% pada ketebalan 80 cm. Pada penelitian (Wicaksono & Iqbal, 2020) dapat juga dilihat bahwa penggunaan mortar busa dapat mereduksi tekanan yang terjadi sehingga penurunan dapat dikurangi.

Gambar 4.51 berikut merupakan pengujian eksperimen tanah lunak ketebalan 80 cm, 90 cm dan 100 cm dibandingkan dengan timbunan tanah lunak 60 cm dengan perkuatan mortar busa 20 cm, 30 cm dan 40 cm



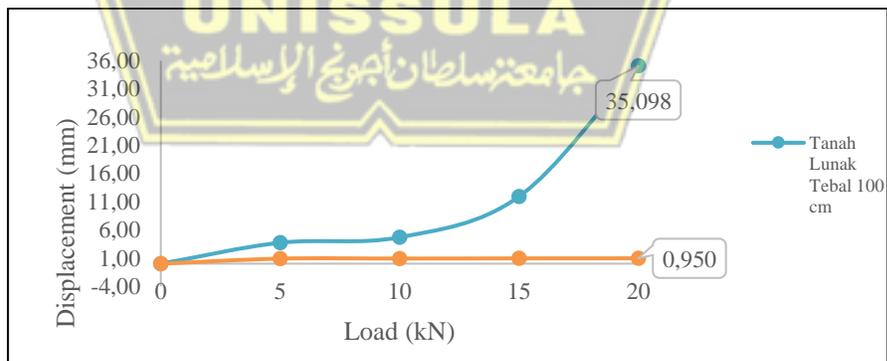
Gambar 4.51: Perbandingan *Settlement* Tanah Lunak 80 cm dengan Mortar Busa 20 cm

Sumber : Hasil Penelitian



Gambar 4.52: Perbandingan *Settlement* Tanah Lunak 90 cm dengan Mortar Busa 30 cm

Sumber : Hasil Penelitian



Gambar 4.53: Perbandingan *Settlement* Tanah Lunak 100 cm dengan Mortar Busa 40 cm

Sumber : Hasil Penelitian

Eksperimen yang dilakukan dengan menggunakan mortar busa dapat mengurangi timbunan, sama halnya dengan penelitian mortar busa yang dilakukan oleh (Wicaksono & Iqbal, 2020) (Chaiyaput et al., 2023) menggunakan mortar busa pada timbunan *soft soil* lapisan jalan.

4.3. 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

4.3.1 Pengujian *Properties* Tanah Dasar

Pengujian tanah yang dilakukan adalah pengujian sifat fisik dan sifat mekanis tanah dasar. Hasil 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 27,58%. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa tanah yang akan dijadikan pada media bak uji memiliki karakteristik tanah lempung kaku yaitu berkisar 21% berdasarkan referensi Mekanika Tanah 1 Braja M Das pada Tabel 2.2.

b. Pengujian berat jenis tanah

Berat jenis tanah yang diperoleh adalah sebesar 2.6109, berdasarkan Tabel 2.6 pada buku Mekanika Tanah 1 Hary Christady Hardiyatmo 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) = 45,89%

Batas Plastis (PL) = 33,25%

Indeks Plastisitas (PI) = 13,64%

Berdasarkan nilai Indeks Plastisitas (PI) jenis tanah yang dijadikan pada media bak uji adalah kategori lempung berlanau dengan plastisitas sedang berdasarkan Tabel 2.3 menurut Jumikis (1962).

d. Pengujian analisa saringan

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 99,61%, sehingga tanah tersebut dikategorikan tanah berbutir halus. Klasifikasi tanah yang diperoleh menunjukkan bahwa tanah tersebut termasuk dalam kategori ML (*Low Plasticity Silt*), yang berarti lanau tidak organik. Berdasarkan sistem klasifikasi yang digunakan oleh *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), dengan nilai batas cair (LL) sebesar 45,89% dan indeks plastisitas (PI) 12,64%, tanah ini tergolong dalam kelompok A-7. Kelompok A-7 dibagi menjadi dua sub kategori, yaitu A-7-5 dan A-7-6. Dengan nilai batas plastis (PL) sebesar 33,25%, yang lebih besar dari 30%, tanah tersebut diklasifikasikan sebagai A-7-5, yang berarti merupakan tanah berlempung. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa sampel tanah yang digunakan dalam pengujian bak sudah memenuhi kriteria untuk dikategorikan sebagai tanah lunak. Mengacu pada hasil analisis saringan, tanah ini dapat dimanfaatkan sebagai *prototype* dalam pengujian bak uji.

2. Pengujian sifat mekanis

a. Uji *Triaxial* UU

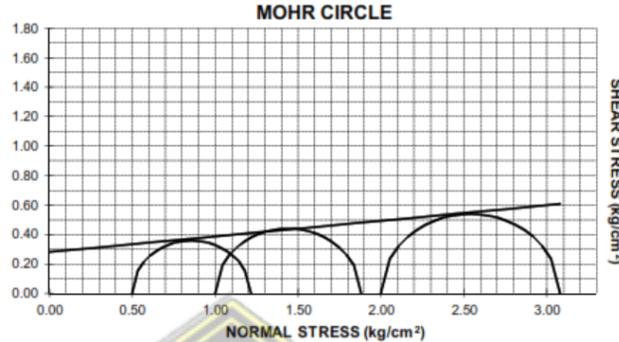
Uji *triaxial* UU dilakukan di laboratorium Mekanika Tanah Teknik Sipil Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru untuk menentukan parameter penting dari tanah dasar lunak. Dari pengujian ini, diperoleh nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Parameter-parameter ini akan digunakan dalam analisis numerik menggunakan aplikasi *Plaxis 2D*

Hasil pengujian yang diperoleh adalah :

$$\text{Kohesi (c)} = 20,59 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Sudut geser } (\varphi) = 6,331^\circ$$

Grafik pengujian *triaxial* UU dapat dilihat pada Gambar 4.54 berikut :



Gambar 4.54: Grafik *Triaxial* UU

Nilai $C_u = 20,59 \text{ kN/cm}^2$ digolongkan tanah lempung dengan konsistensi lunak (Tabel 2.7) yaitu antara $20\text{-}50 \text{ kN/cm}^2$. Uji *triaxial* UU digunakan untuk kondisi jangka pendek, sedangkan CU dan CD untuk jangka panjang. Penelitian ini memakai *triaxial* UU karena sesuai dengan konstruksi cepat. Beban pada tanah menimbulkan tekanan hingga ke dasar, dan jika tegangan geser melebihi kekuatan tanah, keruntuhan terjadi. Tegangan utama terdiri dari mayor (σ_1), menengah (σ_2), dan minor (σ_3). Tegangan pada bidang dengan sudut (φ) terhadap sumbu utama digambarkan oleh lingkaran *Mohr*. Garis selubung pada grafik memotong sumbu tegangan geser menunjukkan kohesi (c), dan kemiringannya mewakili sudut gesek internal (φ). Lingkaran *Mohr* menggambarkan tegangan tanah, sedangkan selubung menunjukkan kekuatan gesernya.

b. Pengujian pemadatan laboratorium (*proctor standart*)

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 :

$$\text{Kadar air optimum } (w_{opt}) = 18,12\%$$

$$\text{Berat isi kering maksimum } (\gamma_{dmaks}) = 1.503 \text{ gr/cc}$$

c. Pengujian *California Bearing Ratio* (CBR)

Pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) di laboratorium menunjukkan nilai sebesar 1,75%, yang berada di bawah ambang batas 6% yang ditetapkan dalam Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Hal ini mengindikasikan bahwa tanah tersebut memiliki daya dukung yang rendah. Berdasarkan analisis sifat fisik dan mekanis, tanah yang diuji diklasifikasikan sebagai tanah lunak. Dengan nilai CBR yang diperoleh, jelas bahwa tanah ini tidak memenuhi syarat untuk digunakan sebagai media *subgrade*.

4.4. Pengujian *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) dan *Sandcone*

Pengujian *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) adalah metode untuk mengevaluasi kekuatan tanah dengan menentukan nilai *California Bearing Ratio* (CBR), sesuai dengan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Dalam penelitian ini, pengujian DCP dilakukan sebelum eksperimen timbunan mortar busa di atas tanah lunak. Hasil dari pengujian ini akan memastikan bahwa tanah yang digunakan adalah jenis tanah lunak dengan kepadatan yang sangat rendah. Pengujian DCP dilakukan pada 3 titik yang berbeda pada tanah dalam bak uji. Hasil pengujian DCP sebagai berikut :

Tabel 4.21: Hasil Pengujian *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP)

| Titik | Hasil (%) |
|-----------|-----------|
| 1 | 1,46 |
| 2 | 2,28 |
| 3 | 2,40 |
| Rata-rata | 2,04 |

Nilai CBR dari pengujian DCP didapat nilai CBR rata-rata untuk 3 titik pengujian sebesar 2,04%, dengan ketentuan $< 6\%$. Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, tanah tersebut tergolong tanah yang memiliki daya dukung yang jelek yaitu kategori tanah lunak. Kepadatan tanah dasar diuji dengan pengujian *sandcone*, kepadatan tanah dalam bak uji dibuat sama dengan kepadatan kondisi tanah asli di lapangan. Hasil pengujian *sandcone* dilihat pada Tabel 4.22 berikut :

Tabel 4.22: Hasil Pengujian *Sandcone*

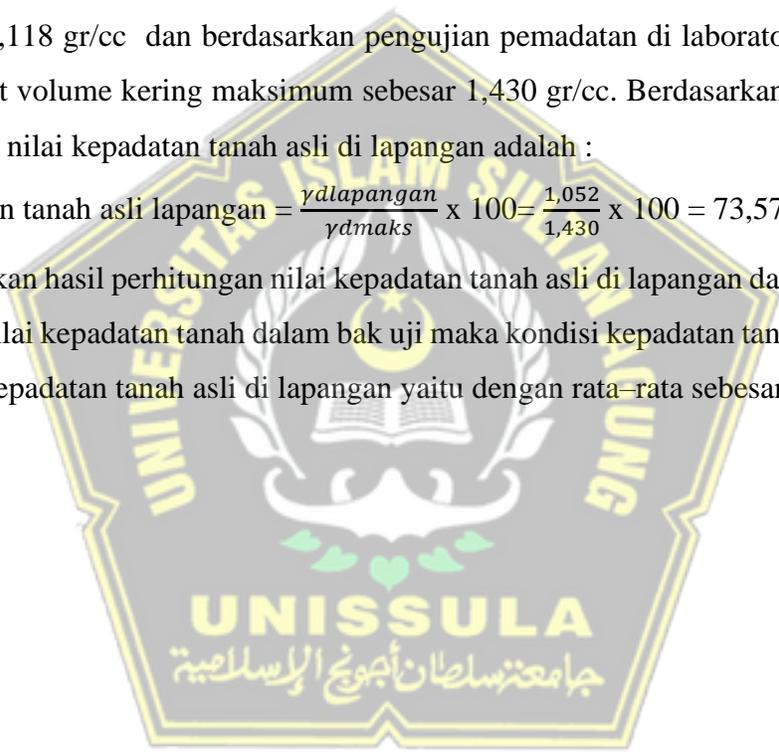
| Titik | Hasil (%) |
|--------------|------------------|
| 1 | 74,39 |
| 2 | 74,40 |
| 3 | 74.36 |
| Rata-rata | 74,38 |

Nilai kepadatan tanah yang ada dalam bak uji rata rata sebesar 74,38 %.

Kadar air asli lapangan diperoleh sebesar 27,58%, sehingga berdasarkan grafik pengujian pemadatan lapangan (*proctor*) maka diperoleh nilai berat volume kering sebesar 1,118 gr/cc dan berdasarkan pengujian pemadatan di laboratorium diperoleh nilai berat volume kering maksimum sebesar 1,430 gr/cc. Berdasarkan data ini, maka diperoleh nilai kepadatan tanah asli di lapangan adalah :

$$\text{Kepadatan tanah asli lapangan} = \frac{\gamma_{\text{lapangan}}}{\gamma_{\text{maks}}} \times 100 = \frac{1,052}{1,430} \times 100 = 73,57 \%$$

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 74,38%.



BAB V

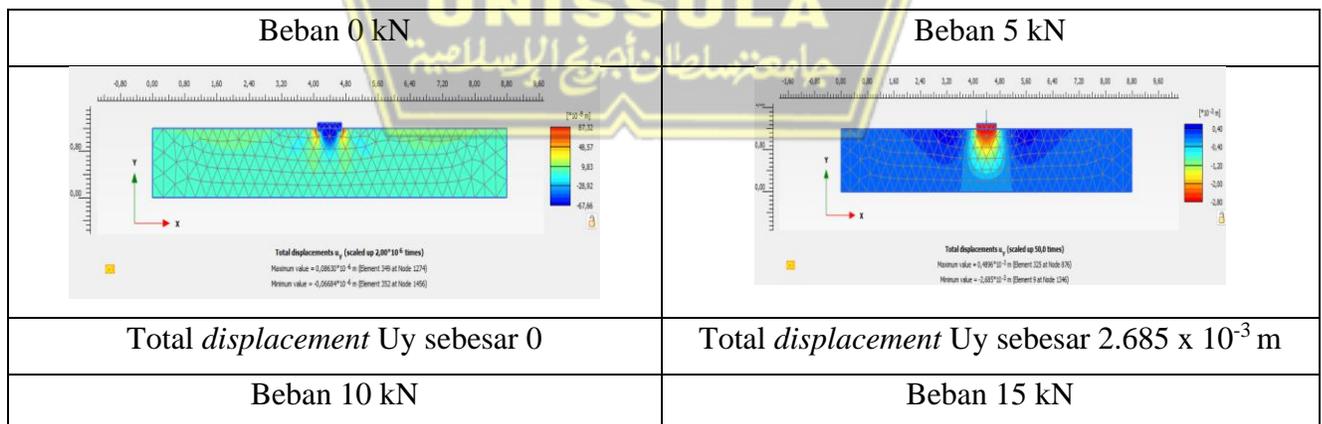
PEMBAHASAN HASIL PENELITIAN

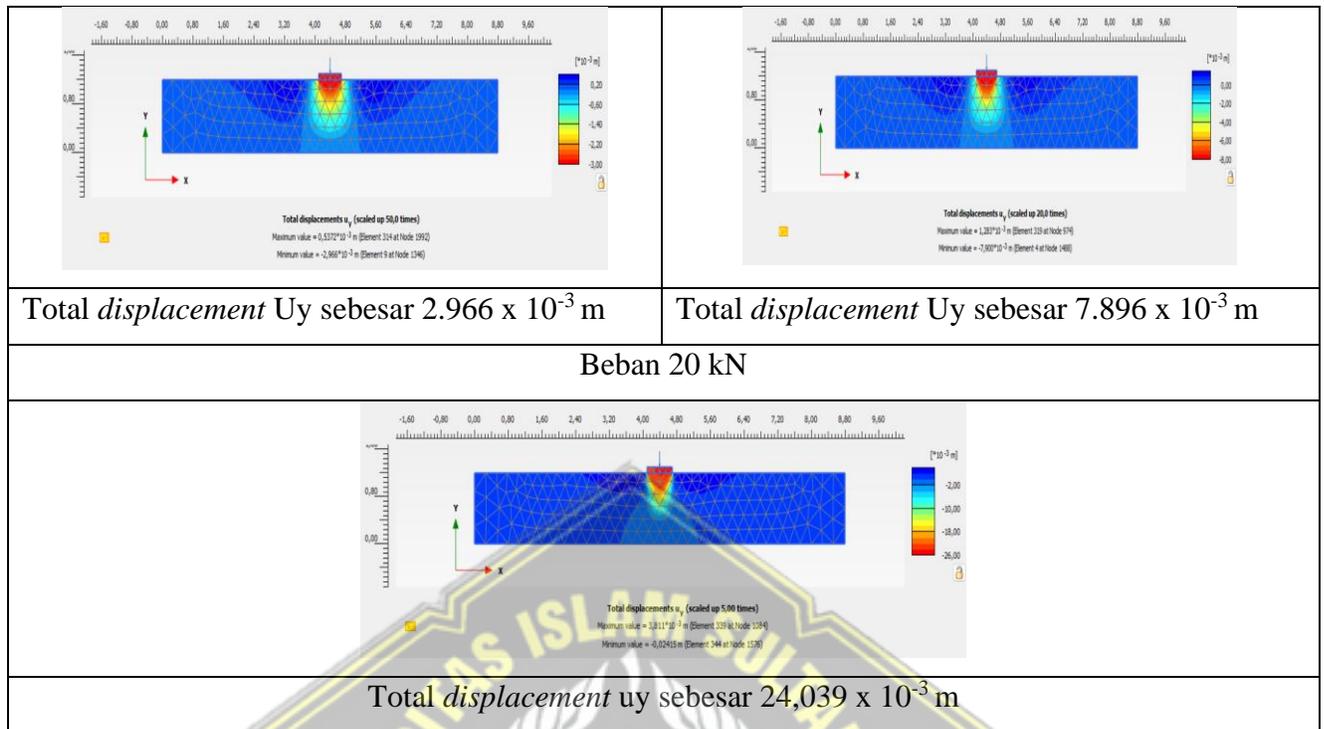
5.1. Pemodelan *Plaxis* 2D Versi 2023

Model tanah dasar dalam pemodelan menggunakan *Plaxis* 2D adalah *Mohr-Coulomb*, yang dipilih berdasarkan hasil uji geser laboratorium, khususnya uji *triaxial Unconsolidated Undrained (UU)*. Ini menghasilkan nilai kuat geser dan sudut geser untuk kondisi tidak terdrainase. Untuk Plat beton K-250 dan mortar busa, model *elastic linear* digunakan karena kedua material ini tergolong kaku dan tidak memiliki permeabilitas. Geometri model tanah dasar mengikuti dimensi bak uji eksperimental, yaitu 220 cm x 50 cm x 115 cm, dengan asumsi batas model elemen pada *Plaxis* 2D ditetapkan sejauh 4 kali lebar dan 2 kali tinggi dimensi tanah dasar, untuk menganalisis bidang gelincir.

5.1.1. Hasil Pemodelan *Plaxis* Tanah Lunak *Subgrade* Tanpa Perkuatan Mortar Busa

Hasil total *displacement* U_y *subgrade* tanpa mortar busa beban 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN dapat dilihat pada Gambar 5.1 berikut :





Gambar 5.1: Total *Displacement* U_y Tanah Dasar Tanpa Mortar Busa

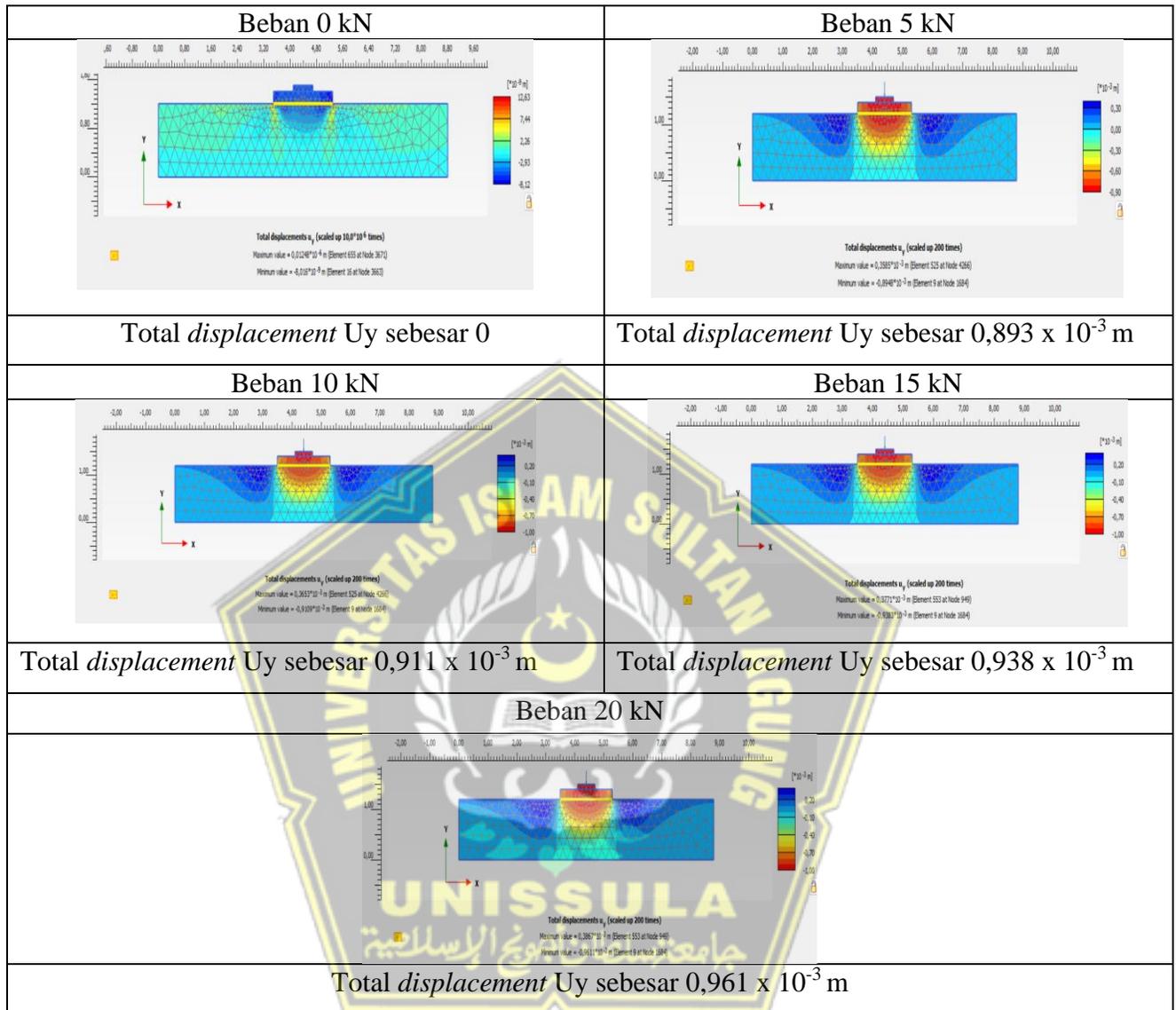
Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar 24.039×10^{-3} m atau sebesar 24.039 mm.

5.1.2. Hasil Pemodelan *Plaxis* 2D Tanah Lunak *Subgrade* dengan Mortar Busa Tanpa Muka Air Tanah (MAT)

a. Mortar busa tebal 20 cm

Hasil total *displacement* U_y *subgrade* tanpa mortar busa beban 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN dapat dilihat pada Gambar 5.2 berikut :



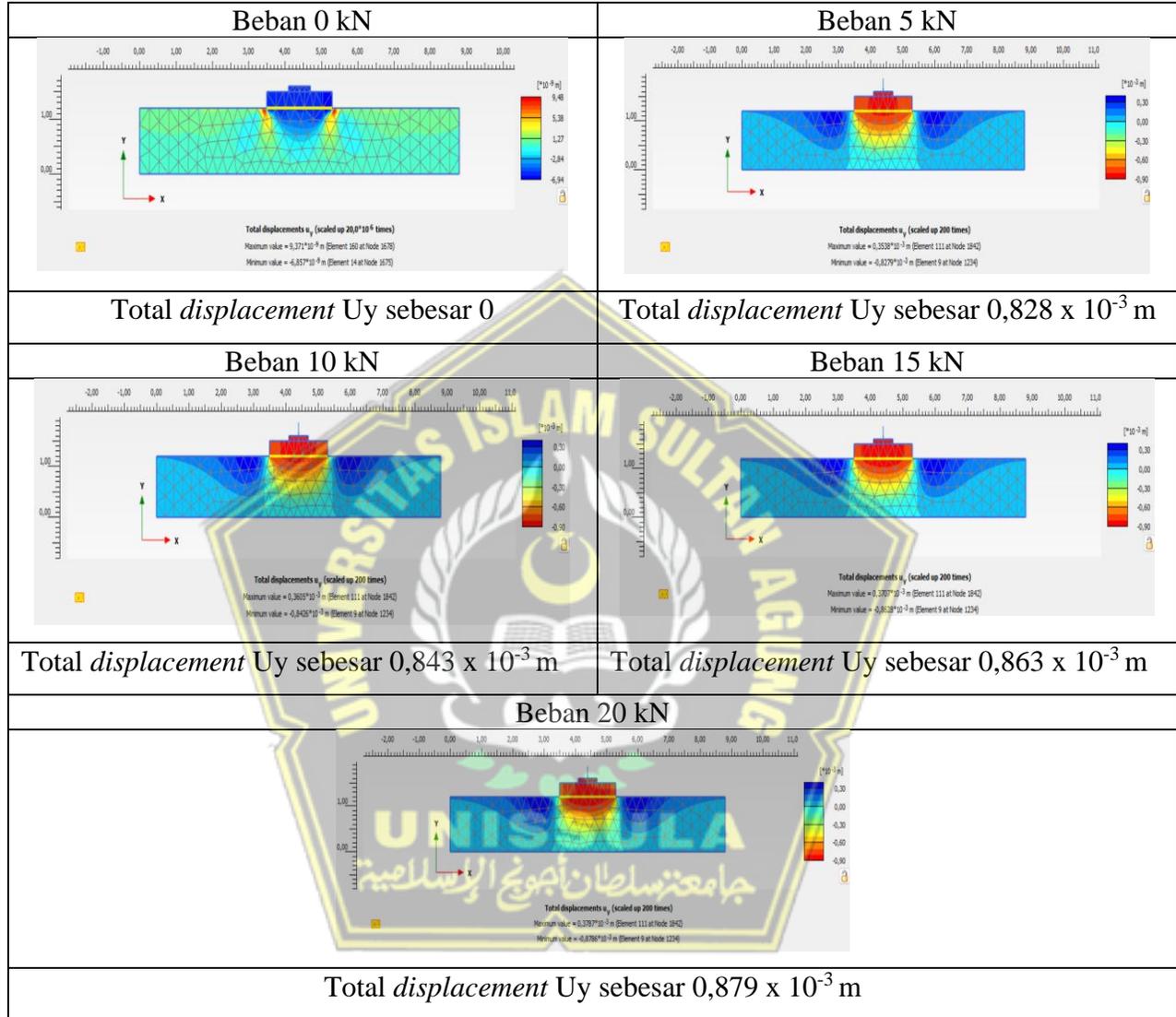
Gambar 5.2: Total Displacement U_y Tanah Dasar dengan Mortar Busa 20 cm

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang didapat menunjukkan penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $0,961 \times 10^{-3}$ m, atau setara dengan 0,961 mm.

b. Mortar busa tebal 30 cm

Hasil total *displacement* u_y subgrade dengan mortar busa tebal 30 cm beban 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN dapat dilihat pada Gambar 5.3 berikut :



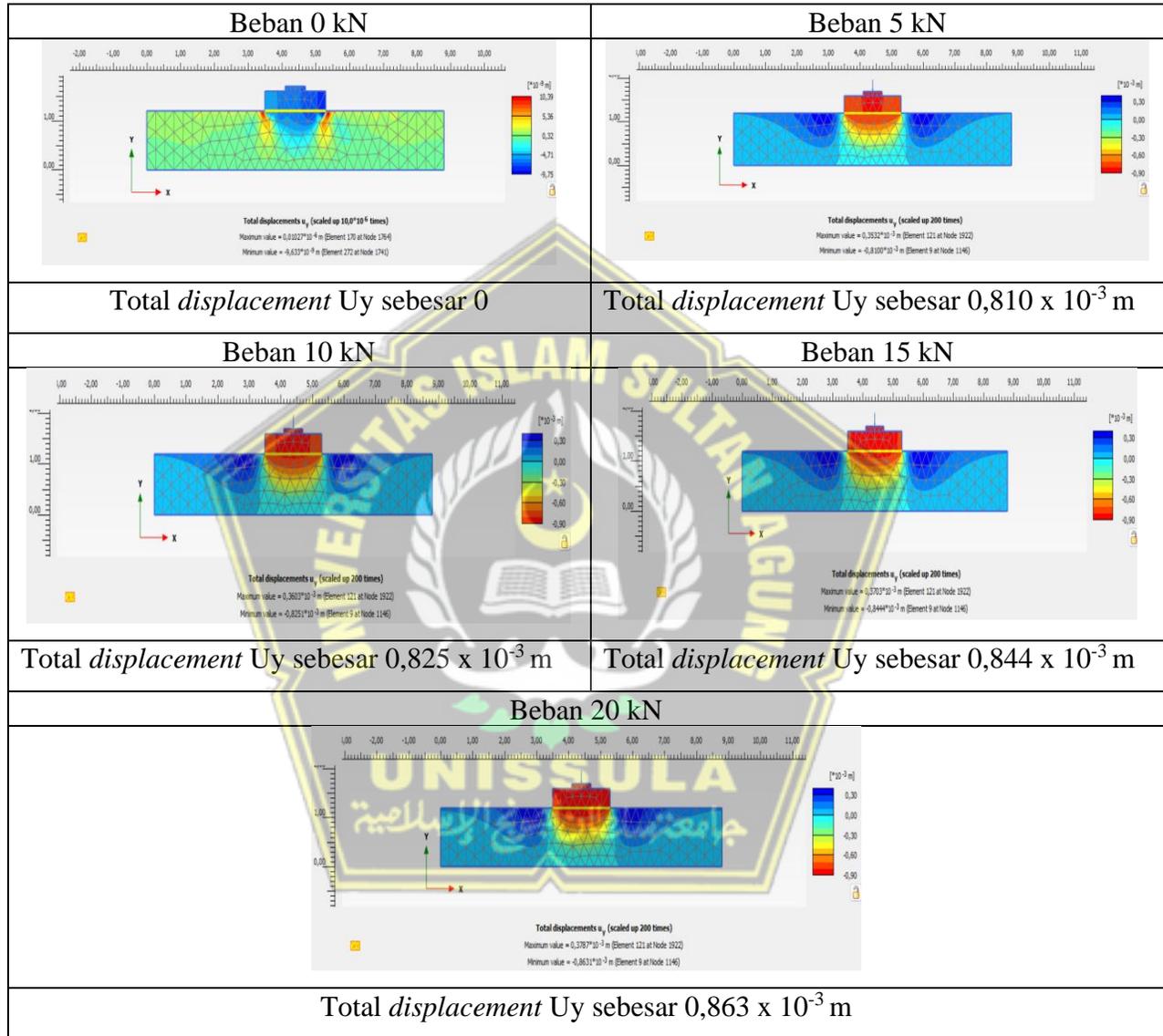
Gambar 5.3: Total *Displacement* U_y Subgrade dengan Mortar Busa Tebal 30 cm

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar 0.879×10^{-3} m atau sebesar 0.879 mm.

c. Mortar busa tebal 40 cm

Hasil total *displacement* U_y tanah lunak *subgrade* dengan mortar busa tebal 40 cm beban 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN dapat dilihat pada Gambar 5.4 berikut



Gambar 5.4: Total *Displacement* U_y Tanah Dasar dengan Mortar Busa Tebal 40 cm

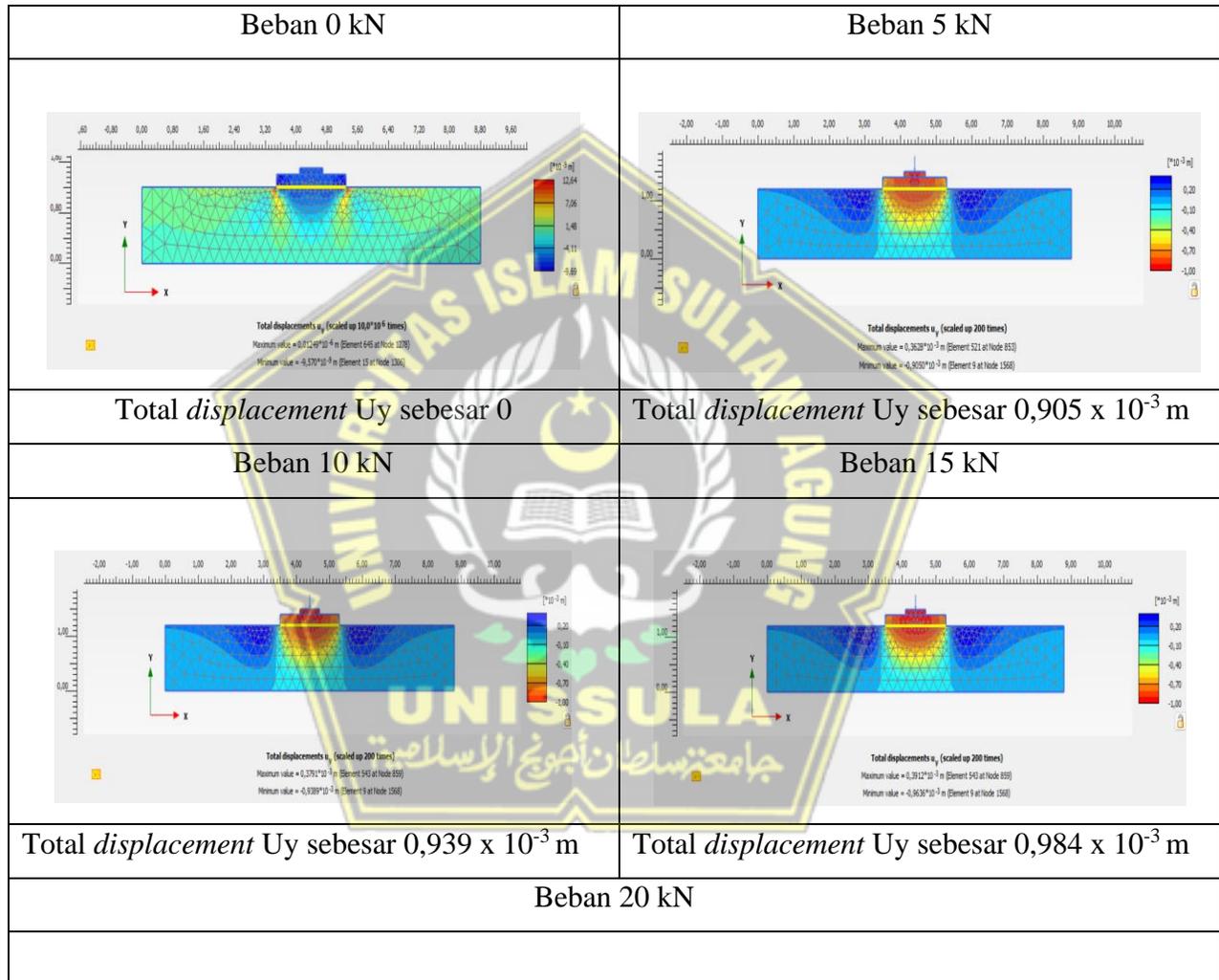
Sumber : Hasil Penelitian

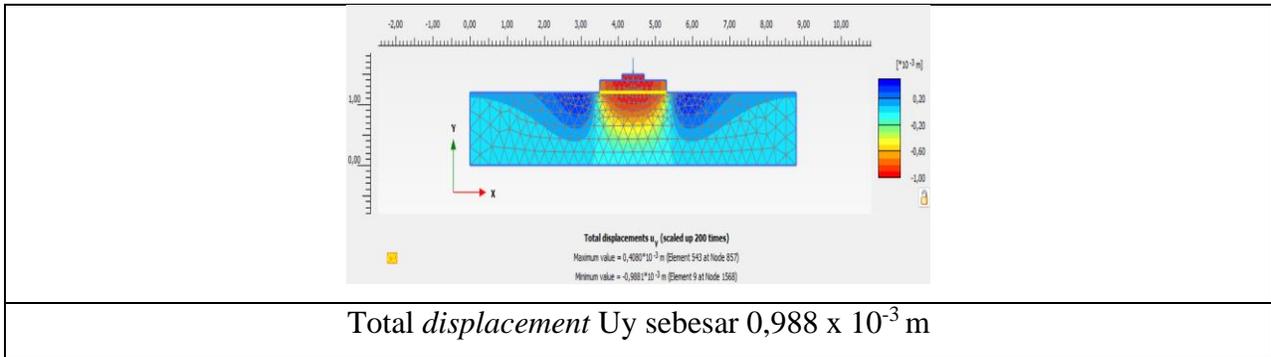
Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $0,863 \times 10^{-3}$ m atau sebesar 0,863 mm.

5.1.3. Hasil Pemodelan *Plaxis Tanah Lunak Subgrade* dengan Mortar Busa Muka Air Tanah (MAT) pada *Subgrade*

a. Mortar busa tebal 20 cm

Hasil total *displacement* U_y tanah lunak *subgrade* dengan mortar busa tebal 20 cm MAT pada *subgrade* beban 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN dapat dilihat pada Gambar 5.5 berikut :





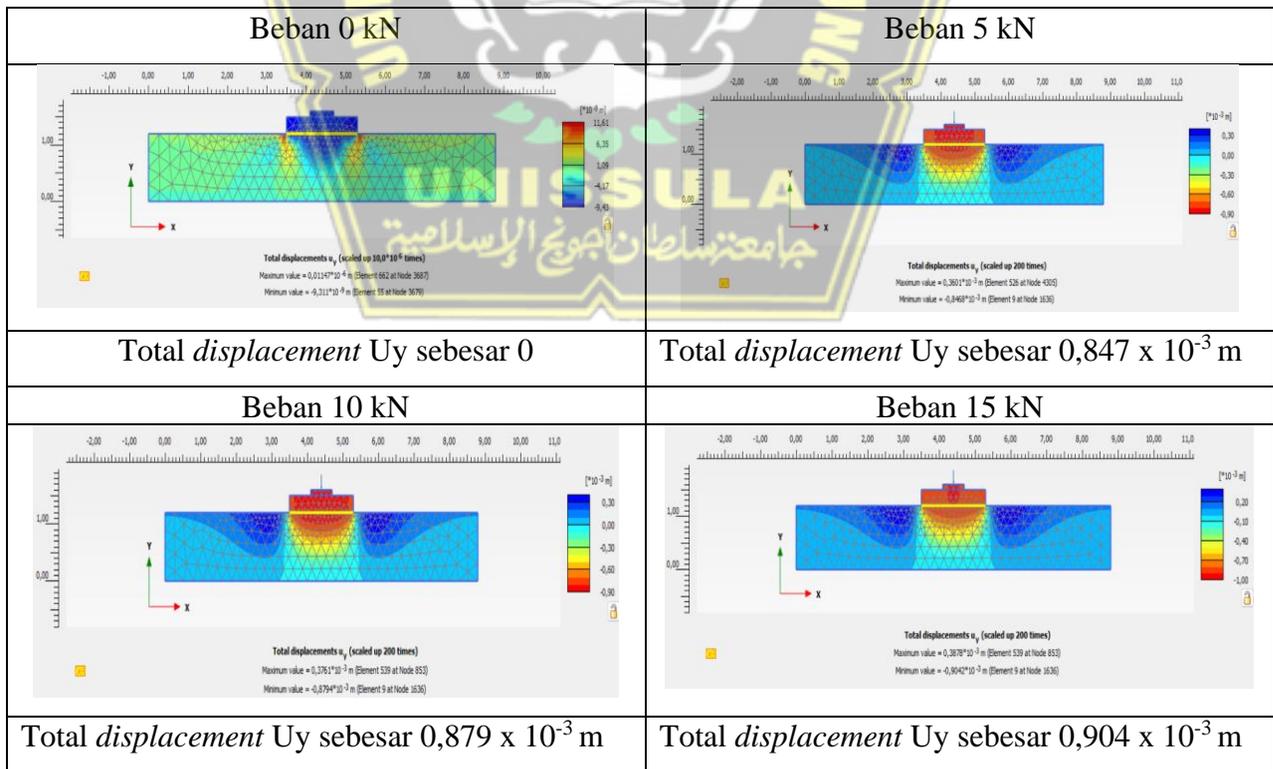
Gambar 5.5: Total Displacement Uy Tanah Dasar dengan Mortar Busa Tebal 20 cm MAT pada Subgrade

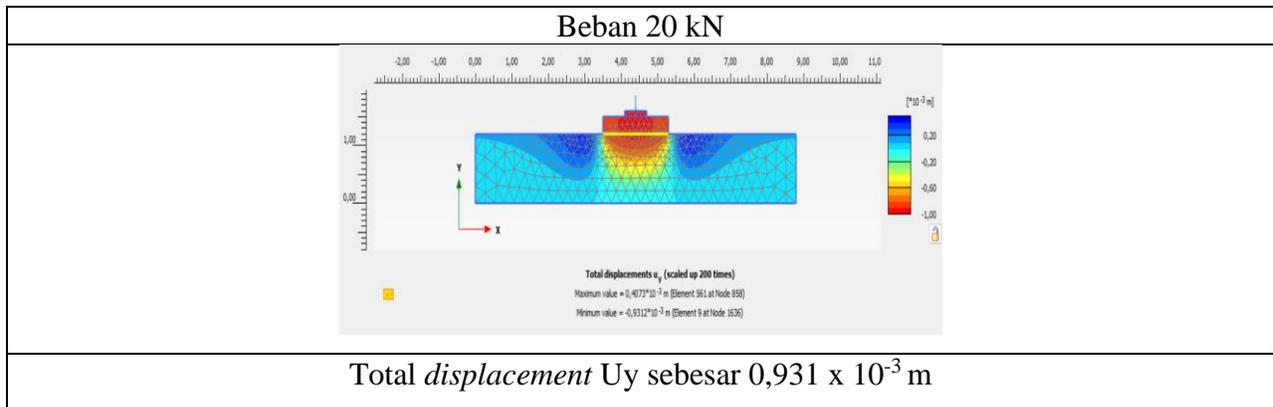
Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $0,988 \times 10^{-3}$ m atau sebesar 0,988 mm.

b. Mortar busa tebal 30 cm

Hasil total displacement Uy tanah lunak subgrade dengan mortar busa tebal 30 cm MAT pada subgrade beban 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN dapat dilihat pada Gambar 5.6 berikut :





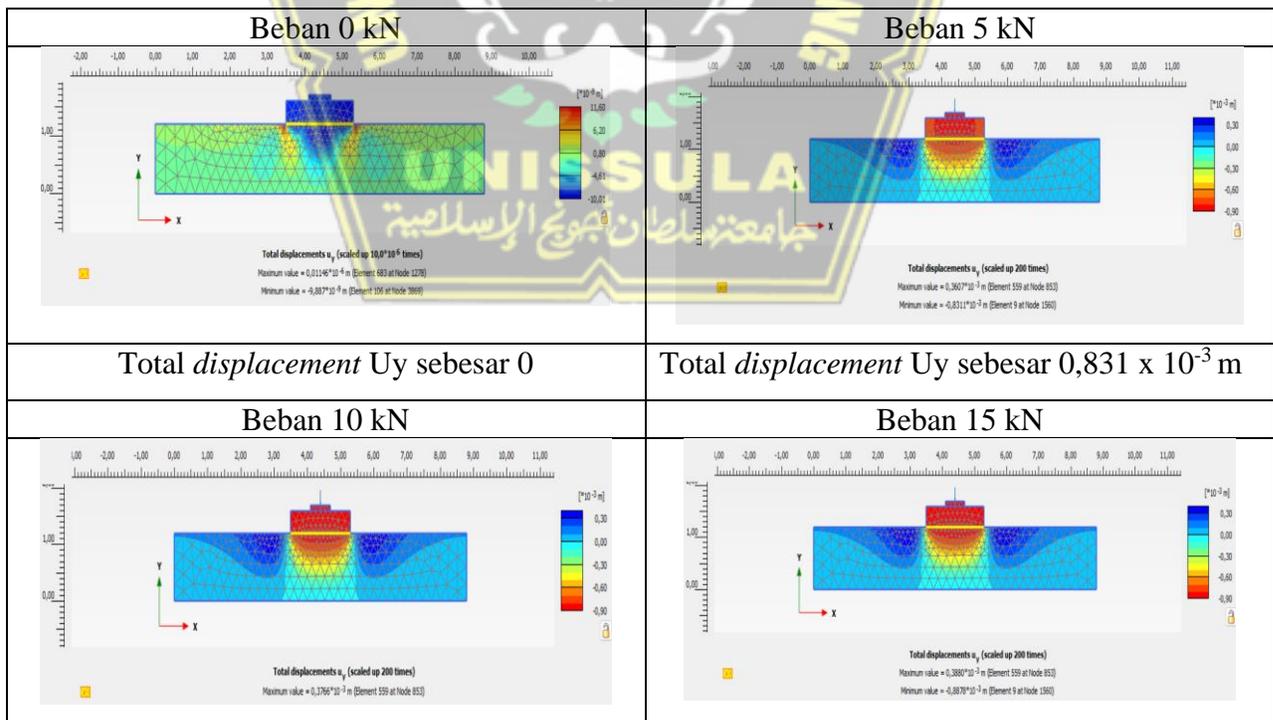
Gambar 5.6: Total *Displacement* U_y Tanah Dasar dengan Mortar Busa Tebal 30 cm MAT pada *Subgrade*

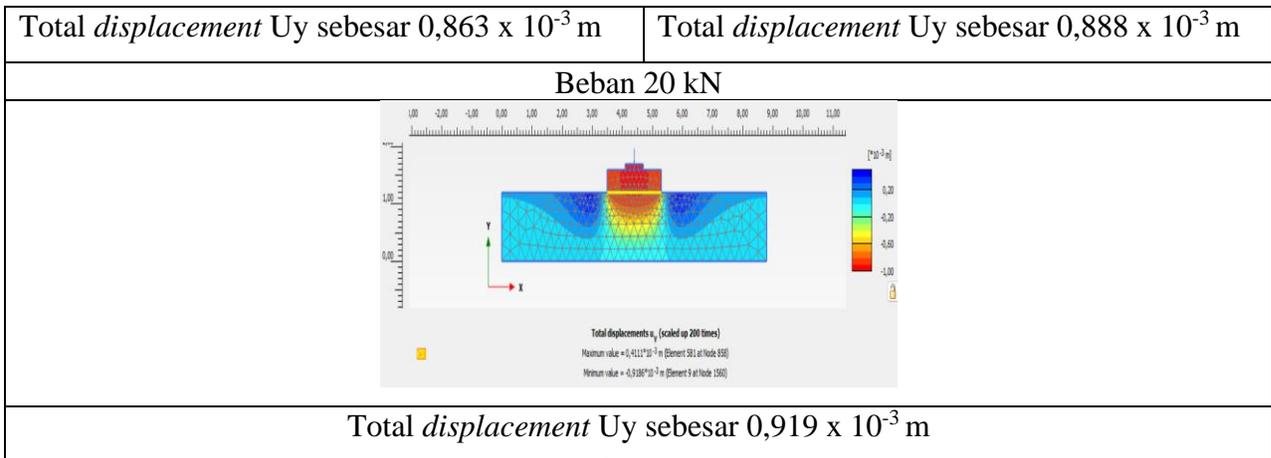
Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $0,931 \times 10^{-3}$ m atau sebesar 0,931 mm.

c. Mortar busa tebal 40 cm

Hasil total *displacement* U_y *subgrade* dengan mortar busa tebal 40 cm MAT pada *subgrade* beban 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN dapat dilihat pada Gambar 5.7 berikut :





Gambar 5.7: Total Displacement Uy Tanah Dasar dengan Mortar Busa Tebal 40 cm

MAT pada Subgrade

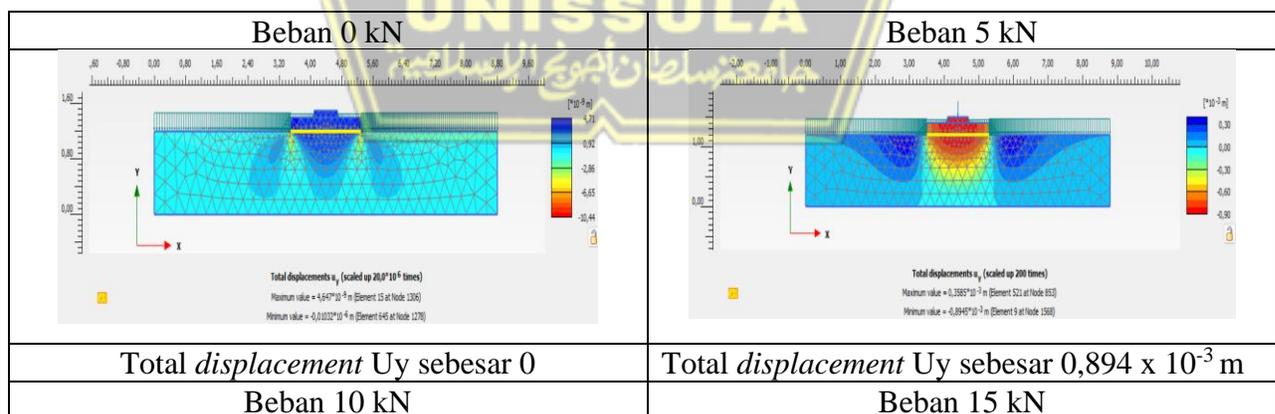
Sumber : Hasil Penelitian

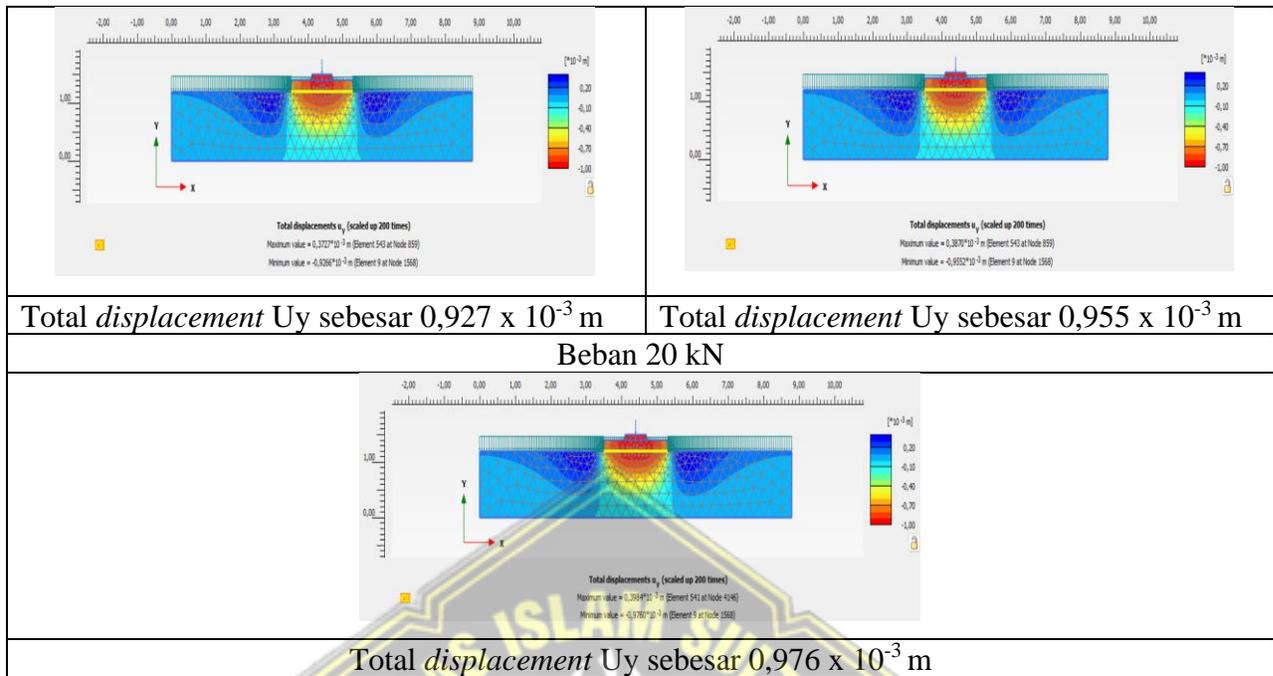
Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $0,919 \times 10^{-3}$ m atau sebesar 0,919 mm.

5.1.4. Hasil Pemodelan Plaxis 2D Subgrade dengan Mortar Busa Muka Air Tanah (MAT) pada Plat Beton

a. Mortar busa tebal 20 cm

Hasil total displacement Uy subgrade dengan mortar busa tebal 20 cm MAT pada Plat beton beban 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN dapat dilihat pada Gambar 5.8 berikut :





Gambar 5.8: Total Displacement U_y Tanah Dasar dengan Mortar Busa Tebal 20 cm

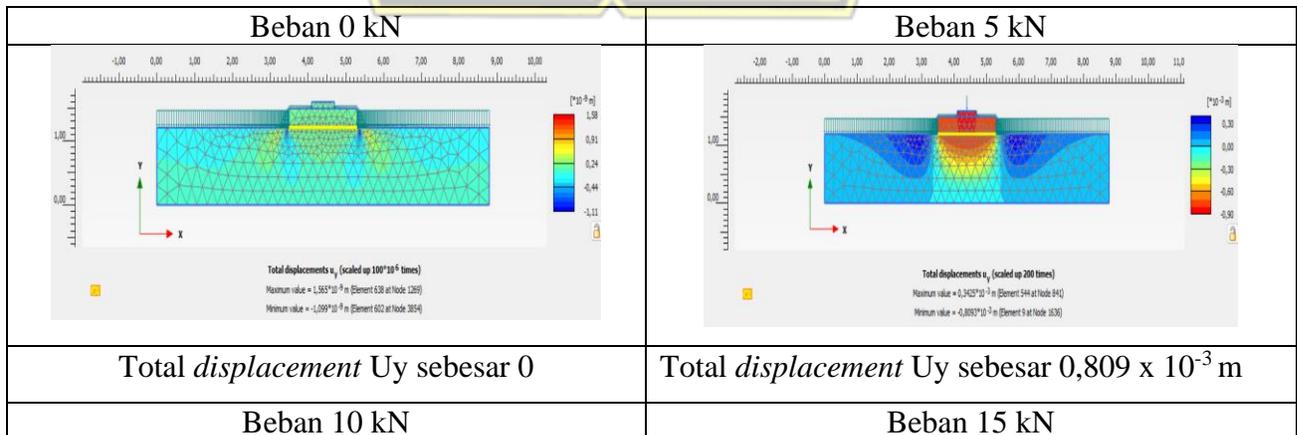
MAT pada Plat Beton

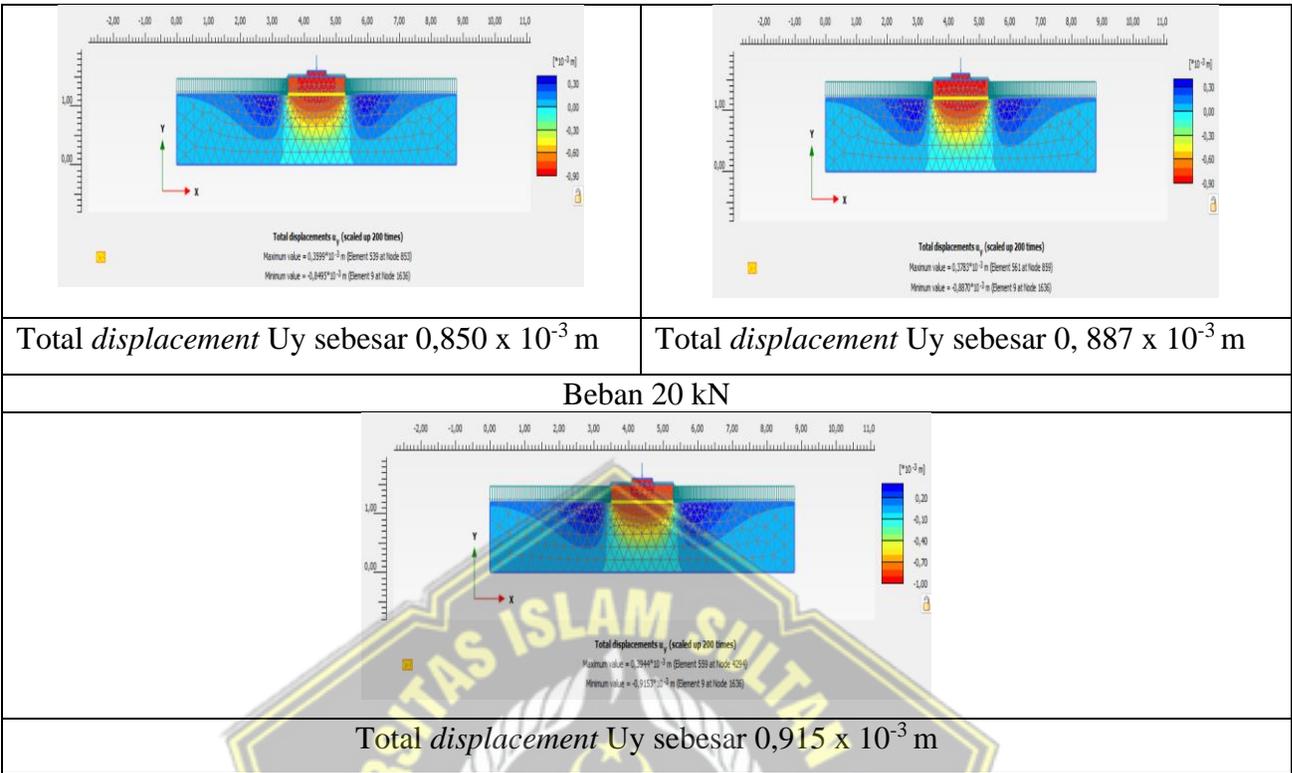
Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $0,976 \times 10^{-3}$ m atau sebesar 0,976 mm.

b. Mortar busa tebal 30 cm

Hasil total displacement U_y subgrade dengan mortar busa tebal 30 cm MAT pada Plat beton beban 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN dapat dilihat pada Gambar 5.9 berikut :



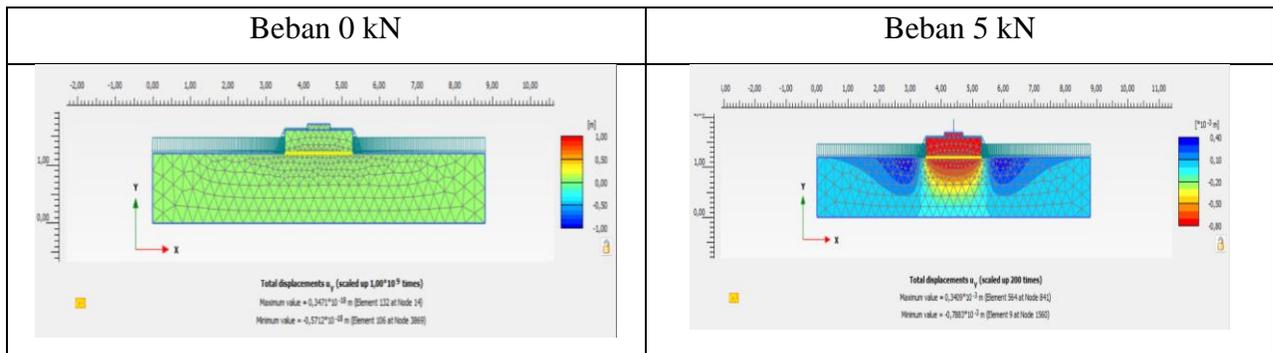


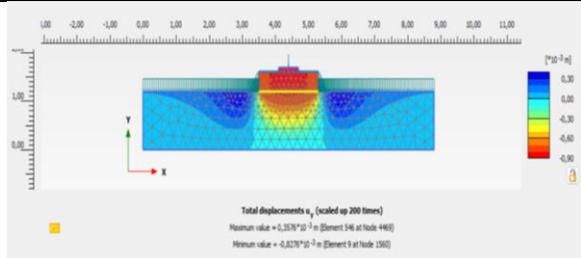
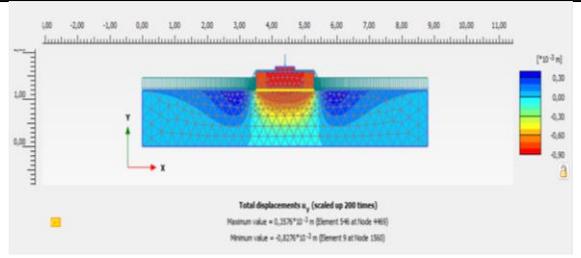
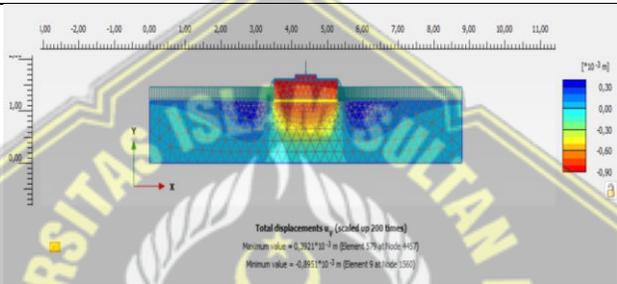
Gambar 5.9: Total Displacement U_y Tanah Dasar dengan Mortar Busa Tebal 30 cm MAT pada Plat Beton
Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $0,915 \times 10^{-3}$ m atau sebesar 0,915 mm.

c. Mortar busa tebal 40 cm

Hasil total displacement U_y subgrade dengan mortar busa tebal 40 cm MAT pada Plat beton beban 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN dapat dilihat pada Gambar 5.10 berikut :



| | |
|---|--|
| Total displacement Uy sebesar 0 | Total displacement Uy sebesar $0,788 \times 10^{-3}$ m |
| Beban 10 kN | Beban 15 kN |
|  |  |
| Total displacement Uy sebesar $0,828 \times 10^{-3}$ m | Total displacement Uy sebesar $0,866 \times 10^{-3}$ m |
| Beban 20 kN | |
|  | |
| Total displacement Uy sebesar $0,895 \times 10^{-3}$ m | |

Gambar 5.10: Total Displacement Uy Tanah Dasar dengan Mortar Busa Tebal 40 cm MAT pada Plat Beton

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil yang diperoleh terjadi penurunan terbesar pada beban maksimum 20 kN sebesar $0,895 \times 10^{-3}$ m atau sebesar 0,895 mm

Rekapitulasi hasil analisis numerik menggunakan aplikasi *Plaxis 2D* dimana nilai penurunan terbesar yaitu pada beban 20 kN, dengan hasil pada Tabel 5.1 berikut :

Tabel 5.1: Rekapitulasi Numerik *Plaxis 2D* Hasil Penurunan Pembebanan 20 kN

| No | Uraian | Kondisi | Settlement (mm) |
|----|-------------|---|-----------------|
| 1 | Percobaan 1 | Tanpa perkuatan | 24,039 |
| 2 | Percobaan 2 | Tanah dengan mortar busa tebal 20 cm | 0,961 |
| 3 | Percobaan 3 | Tanah dengan mortar busa tebal 30 cm | 0,879 |
| 4 | Percobaan 4 | Tanah dengan mortar busa tebal 40 cm | 0,863 |
| 5 | Percobaan 5 | Tanah dengan mortar busa tebal 20 cm MAT pada <i>subgrade</i> | 0,988 |

| | | | |
|----|--------------|---|-------|
| 6 | Percobaan 6 | Tanah dengan mortar busa tebal 30 cm MAT pada <i>subgrade</i> | 0,931 |
| 7 | Percobaan 7 | Tanah dengan mortar busa tebal 40 cm MAT pada <i>subgrade</i> | 0,919 |
| 8 | Percobaan 8 | Tanah dengan mortar busa tebal 20 cm MAT ditengah plat beton | 0,976 |
| 9 | Percobaan 9 | Tanah dengan mortar busa tebal 30 cm MAT ditengah plat beton | 0,915 |
| 10 | Percobaan 10 | Tanah dengan mortar busa tebal 40 cm MAT ditengah plat beton | 0,895 |

Sumber : Hasil Penelitian

5.2. Hasil Analisis Numerik *Plaxis 2D* dan Eksperimen di Laboratorium

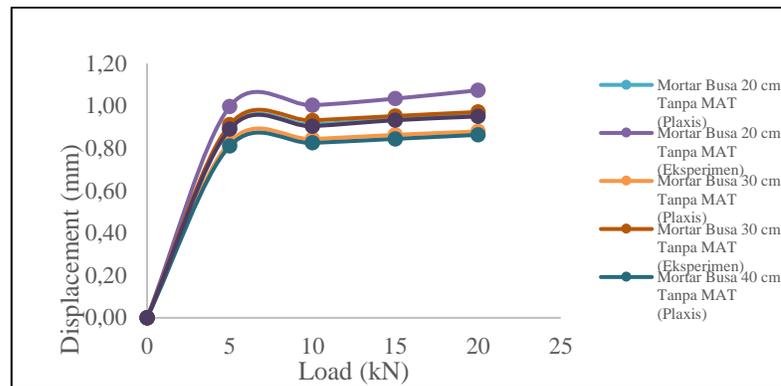
Berdasarkan hasil eksperimen di laboratorium, penurunan tertinggi terjadi pada beban maksimum sebesar 20 kN. Selain itu, analisis numerik menggunakan *Plaxis 2D* juga menunjukkan bahwa nilai penurunan terbesar tercatat pada beban maksimum 20 kN.

Tabel 5.2: Hasil Analisis Eksperimen dengan *Plaxis 2D Subgrade* dengan Mortar Busa Tanpa MAT

| Beban (kN) | DISPLACEMENT U_y | | | | | |
|------------|--|--------------------------------|--|--------------------------------|--|--------------------------------|
| | Mortar Busa 20 cm (<i>Plaxis 2D</i>) | Mortar Busa 20 cm (Eksperimen) | Mortar Busa 30 cm (<i>Plaxis 2D</i>) | Mortar Busa 30 cm (Eksperimen) | Mortar Busa 40 cm (<i>Plaxis 2D</i>) | Mortar Busa 40 cm (Eksperimen) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0,893 | 0,997 | 0,828 | 0,911 | 0,810 | 0,890 |
| 10 | 0,911 | 1,003 | 0,843 | 0,931 | 0,825 | 0,904 |
| 15 | 0,938 | 1,034 | 0,863 | 0,952 | 0,844 | 0,932 |
| 20 | 0,961 | 1,073 | 0,879 | 0,971 | 0,863 | 0,950 |

Sumber : Hasil Penelitian

Penurunan terbesar terjadi pada beban maksimum 20 kN. Gambar 5.11 berikut menampilkan hasil penurunan analisis eksperimen dan numerik *Plaxis 2D* dengan mortar busa tanpa MAT.



Gambar 5.11: Grafik *Subgrade* dengan Mortar Busa Tanpa MAT

Sumber : Hasil Penelitian

Pengamatan dari Tabel 5.2 dan Gambar 5.11 yang disajikan menunjukkan bahwa semakin tebal lapisan mortar busa, semakin kecil penurunan yang terjadi, baik berdasarkan hasil eksperimen maupun analisis numerik. Pada beban maksimum 20 kN, deviasi penurunan antara variasi ketebalan 20 cm dan 30 cm tercatat sebesar 9,51% secara eksperimental dan 8,53% secara numerik. Sementara itu, deviasi penurunan antara ketebalan 30 cm dan 40 cm menunjukkan angka 2,16% untuk eksperimen dan 1,82% untuk analisis numerik. Dengan demikian, penggunaan lapisan mortar busa sebagai penguat terbukti efektif dalam mengurangi penurunan yang terjadi. (Chaiyaput et al., 2023)(Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, 2015a)

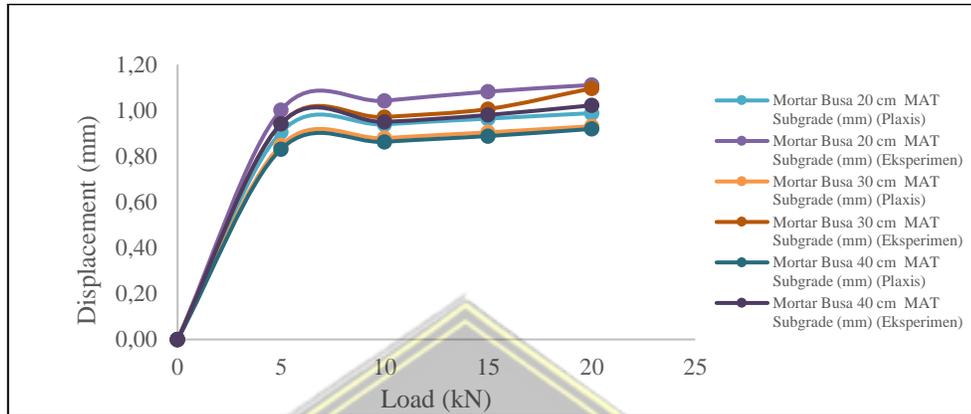
Rekapan hasil analisis eksperimen di laboratorium dengan numerik *Plaxis 2D* untuk *subgrade* mortar busa MAT di permukaan *subgrade* pada Tabel 5.3 berikut :

Tabel 5.3: Hasil Analisis Eksperimen dengan *Plaxis 2D Subgrade* dengan Mortar Busa MAT di Permukaan *Subgrade*

| Beban (kN) | DISPLACEMENT Uy | | | | | |
|------------|--|--------------------------------|--|--------------------------------|--|--------------------------------|
| | Mortar Busa 20 cm (<i>Plaxis 2D</i>) | Mortar Busa 20 cm (Eksperimen) | Mortar Busa 30 cm (<i>Plaxis 2D</i>) | Mortar Busa 30 cm (Eksperimen) | Mortar Busa 40 cm (<i>Plaxis 2D</i>) | Mortar Busa 40 cm (Eksperimen) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0,905 | 1,002 | 0,847 | 0,942 | 0,831 | 0,942 |
| 10 | 0,939 | 1,042 | 0,879 | 0,971 | 0,863 | 0,950 |
| 15 | 0,964 | 1,082 | 0,904 | 1,006 | 0,888 | 0,980 |
| 20 | 0,988 | 1,099 | 0,931 | 1,036 | 0,919 | 1,022 |

Sumber : Hasil Penelitian

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



Gambar 5.12: Grafik Mortar Busa dengan MAT di *Subgrade*

Sumber : Hasil Penelitian

Dari tabel dan gambar di atas menunjukkan semakin tebal mortar busa semakin kecil penurunan yang terjadi baik secara eksperimental maupun numerikal. Pada beban maksimal 20 kN persentase deviasi penurunan dari variasi tebal 20 cm dengan 30 cm pada eksperimental sebesar 1,35% dan pada numerikal sebesar 5,77%. Sementara Persentase deviasi penurunan dari variasi tebal 30 cm dengan 40 cm pada eksperimental sebesar 6,75% dan pada numerikal sebesar 1,29%. Jika dibandingkan antara eksperimen dan numerik pada beban maksimal 20 kN pada ketebalan mortar busa 40 cm MAT pada *subgrade*, didapat deviasi sebesar 10,08%.

Rekapan hasil analisis eksperimen di laboratorium dengan numerik *Plaxis 2D* untuk *subgrade* dengan mortar busa MAT di Plat beton disajikan Tabel 5.4 berikut :

Tabel 5.4: Hasil Analisis Eksperimen *Plaxis* 2D Mortar Busa dengan MAT di Plat Beton

| Beban (kN) | DISPLACEMENT U_y | | | | | |
|------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| | Mortar Busa 20 cm (<i>Plaxis</i>) | Mortar Busa 20 cm (Eksperimen) | Mortar Busa 30 cm (<i>Plaxis</i>) | Mortar Busa 30 cm (Eksperimen) | Mortar Busa 40 cm (<i>Plaxis</i>) | Mortar Busa 40 cm (Eksperimen) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0,894 | 0,985 | 0,809 | 0,951 | 0,788 | 0,888 |
| 10 | 0,927 | 1,024 | 0,850 | 0,983 | 0,828 | 0,910 |
| 15 | 0,955 | 1,075 | 0,887 | 0,989 | 0,866 | 0,954 |
| 20 | 0,976 | 1,089 | 0,915 | 1,024 | 0,895 | 0,990 |

Sumber : Hasil Penelitian

Penurunan terbesar terjadi pada beban maksimum 20 kN. Gambar 5.13 berikut menampilkan hasil penurunan analisis eksperimen dengan *Plaxis* 2D dengan mortar busa MAT di Plat beton.



Gambar 5.13: Grafik Mortar Busa dengan MAT di Plat Beton

Sumber : Hasil Penelitian

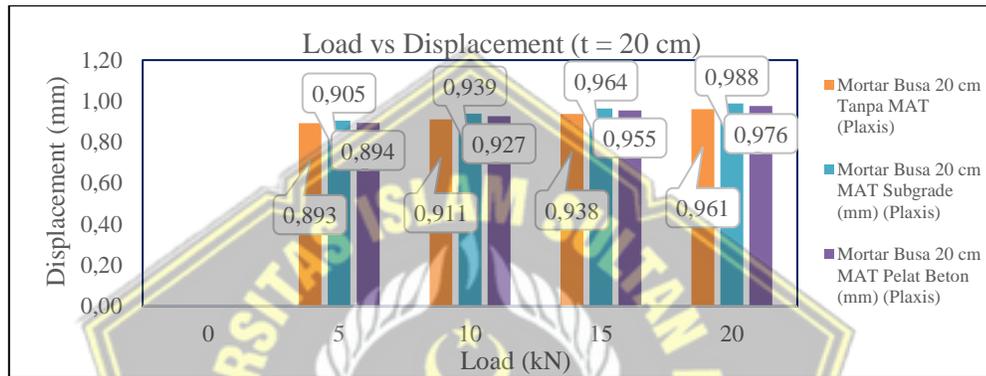
Dari tabel dan gambar di atas menunjukkan semakin tebal mortar busa semakin kecil penurunan yang terjadi baik secara eksperimental maupun numerikal. Pada beban maksimal 20 kN persentase deviasi penurunan dari variasi tebal 20 cm dengan 30 cm pada eksperimental sebesar 9,51% dan pada numerikal sebesar 6,25%. Sementara Persentase deviasi penurunan dari variasi tebal 30 cm dengan 40 cm pada eksperimental sebesar 10,15% dan pada numerikal sebesar 2,18%. Oleh sebab itu penggunaan lapisan mortar busa sebagai perkuatan dianggap dapat mengurangi penurunan. Jika dibandingkan antara eksperimen dan numerik pada beban maksimal 20 kN pada ketebalan mortar busa 40 cm MAT di Plat beton, didapat deviasi sebesar

9,6%. (Chaiyaput et al., 2023) (Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, 2015a)

5.3. Hasil Analisis Uji Eksperimen

Hasil yang didapat berdasrakan analisis numerik *Plaxis 2D* dengan kondisi kering tnpa Mat, MAT pada *subgrade* dan MAT pada Plat beton dapat dilihat pada Gambar berikut :

1. Mortar Busa Tebal 20 cm

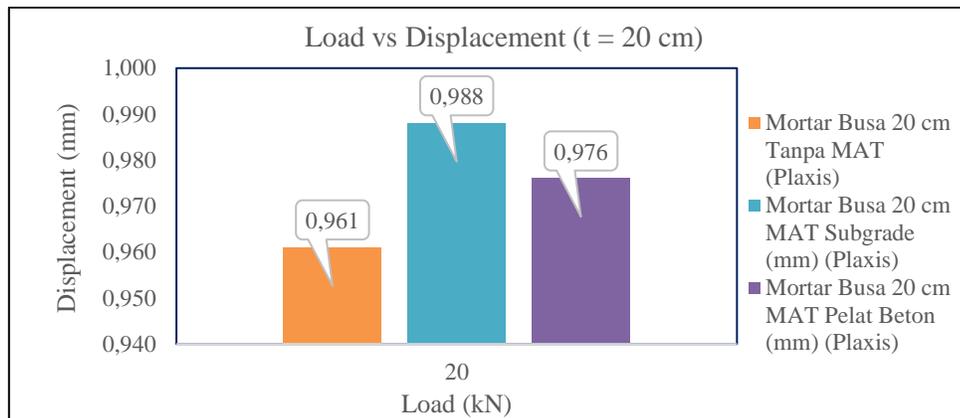


Gambar 5.14: Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 20 cm (Hasil *Plaxis 2D*)

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan Gambar 5.14 di atas, muka air tanah berperan penting dalam mengurangi penurunan tanah melalui gaya apung (*uplift*) yang dihasilkan oleh mortar busa yang terendam air. Timbunan mortar busa dengan ketebalan 20 cm tanpa adanya muka air tanah menunjukkan penurunan yang lebih kecil dibandingkan dengan timbunan yang sama tetapi dengan muka air tanah. Ketika dibandingkan, penurunan tanah pada mortar busa setebal 20 cm dengan muka air tanah di Plat beton ternyata lebih kecil dibandingkan dengan timbunan mortar busa setebal 20 cm yang terletak di *subgrade*. Penurunan maksimum terjadi pada beban maksimum 20 kN berdasarkan analisis menggunakan *Plaxis 2D*

Hasil penurunan tanah berdasarkan beban maksimum akibat variasi Muka Air Tanah disajikan Gambar 5.15 berikut :

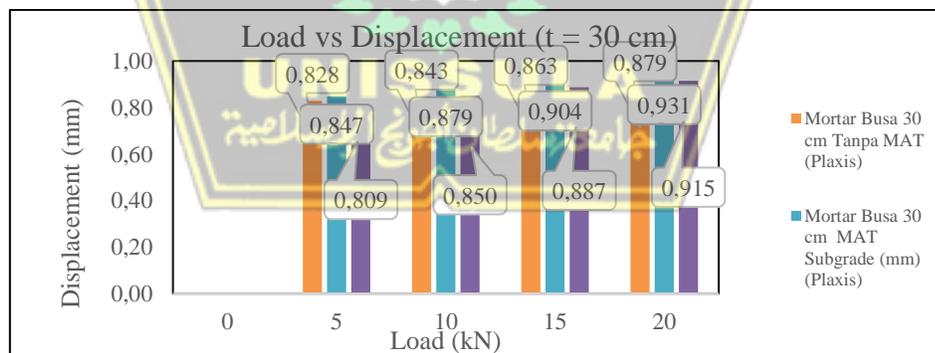


Gambar 5.15: Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 20 cm pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil *Plaxis* 2D)

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan gambar di atas, penurunan terkecil pada kondisi mortar busa setebal 20 cm tanpa Muka Air Tanah tercatat sebesar 0,961 mm. Sementara itu, pada kondisi timbunan mortar busa setebal 20 cm yang terpengaruh oleh Muka Air Tanah, penurunan akibat beban 20 kN tercatat sebesar 0,976 mm. Nilai ini lebih kecil dibandingkan dengan penurunan timbunan mortar busa setebal 20 cm pada Muka Air Tanah di *subgrade*, yang mencapai 0,988 mm

2. Mortar Busa Tebal 30 cm



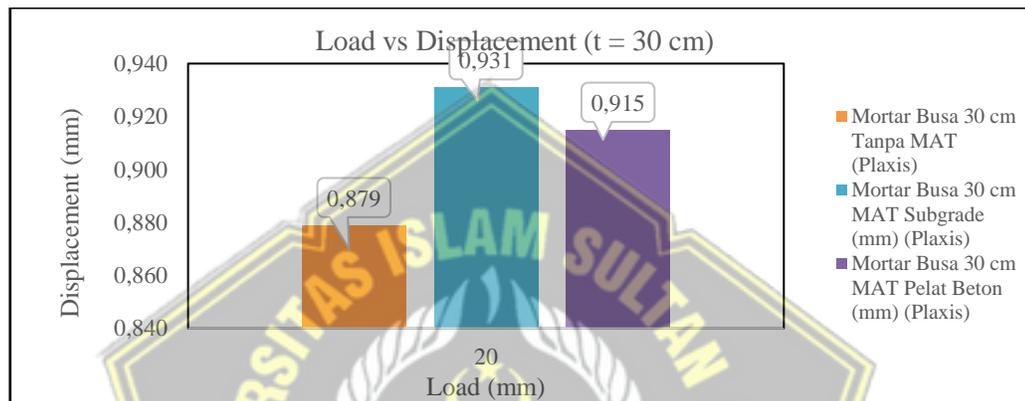
Gambar 5.16: Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 30 cm (Hasil *Plaxis* 2D)

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan Gambar 5.16 di atas, Muka Air Tanah berpengaruh memperkecil terjadinya penurunan tanah melalui gaya apung (*uplift*) oleh mortar busa yang terendam air. Timbunan dengan mortar busa tebal 30 cm tanpa Muka Air Tanah penurunannya

lebih kecil dibandingkan dengan mortar busa tebal 30 cm dengan Muka Air Tanah. Apabila dibandingkan dengan timbunan dengan mortar busa tebal 30 cm akibat Muka Air Tanah, nilai penurunan tanah pada mortar busa tebal 30 cm Muka Air Tanah di Plat beton lebih kecil dari timbunan mortar busa tebal 30 Muka Air Tanah di *subgrade*. Penurunan maksimum terjadi pada beban maksimum 20 kN pada analisis *Plaxis 2D*.

Hasil penurunan tanah berdasarkan beban maksimum akibat variasi Muka Air Tanah disajikan Gambar 5.17 berikut :

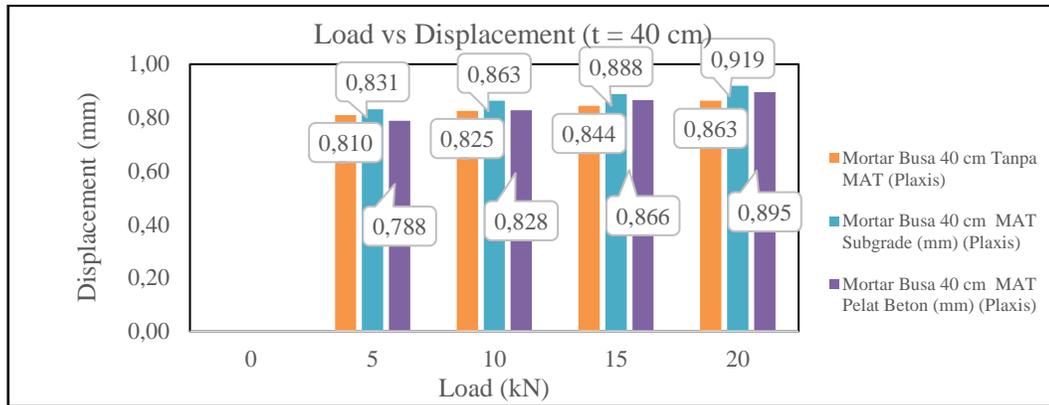


Gambar 5.17: Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 30 cm pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil *Plaxis 2D*)

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan Gambar 5.17 di atas, penurunan terkecil pada kondisi mortar busa tebal 30 cm tanpa Muka Air Tanah sebesar 0.879 mm. Pada kondisi timbunan mortar busa tebal 30 cm akibat Muka Air Tanah, timbunan dengan mortar busa tebal 30 cm kondisi Muka Air Tanah pada Plat beton, nilai penurunannya akibat beban 20 kN lebih kecil sebesar 0.915 mm dibandingkan timbunan mortar busa tebal 30 cm kondisi Muka Air Tanah pada *subgrade* sebesar 0.931 mm.

3. Mortar Busa Tebal 40 cm

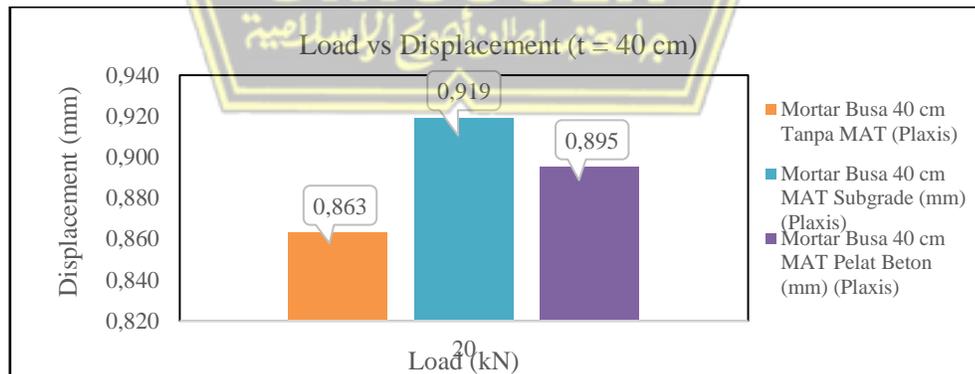


Gambar 5.18: Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 40 cm (Hasil *Plaxis* 2D)

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan Gambar 5.18 di atas, Muka Air Tanah berpengaruh memperkecil terjadinya penurunan tanah melalui gaya apung (*uplift*) oleh mortar busa yang terendam air. Timbunan dengan mortar busa tebal 40 cm tanpa Muka Air Tanah penurunannya lebih kecil dibandingkan dengan mortar busa tebal 40 cm dengan Muka Air Tanah. Apabila dibandingkan dengan timbunan dengan mortar busa tebal 40 cm akibat Muka Air Tanah, nilai penurunan tanah pada mortar busa tebal 40 cm Muka Air Tanah di Plat beton lebih kecil dari timbunan mortar busa tebal 40 Muka Air Tanah di *subgrade*. Penurunan maksimum terjadi pada beban maksimum 20 kN pada analisis *Plaxis* 2D.

Hasil penurunan tanah berdasarkan beban maksimum akibat variasi Muka Air Tanah disajikan Gambar 5.19 berikut :



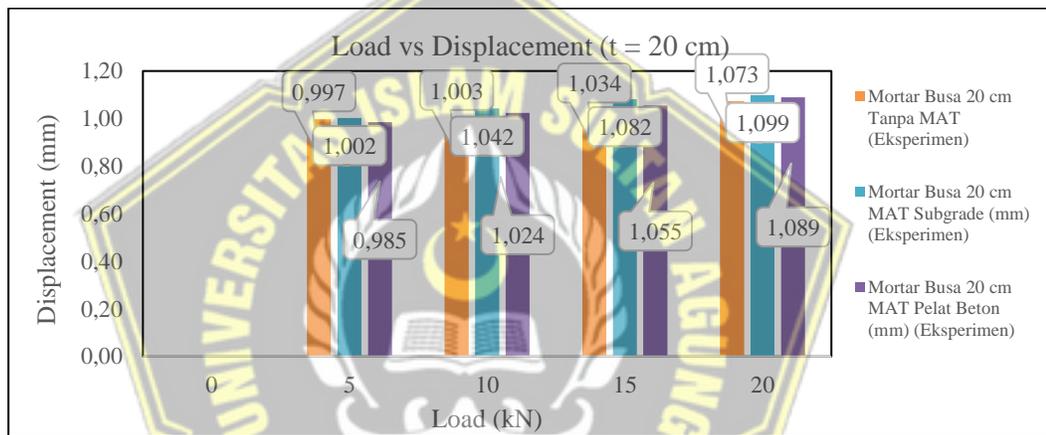
Gambar 5.19: Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 40 cm pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil *Plaxis* 2D)

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan Gambar di atas, penurunan terkecil pada kondisi mortar busa tebal 40 cm tanpa Muka Air Tanah sebesar 0.863 mm. Pada kondisi timbunan mortar busa tebal 40 cm akibat Muka Air Tanah, timbunan dengan mortar busa tebal 40 cm kondisi Muka Air Tanah pada Plat beton, nilai penurunannya akibat beban 20 kN lebih kecil sebesar 0.895 mm dibandingkan timbunan mortar busa tebal 40 cm kondisi Muka Air Tanah pada *subgrade* sebesar 0.919 mm.

Hasil eksperimental di laboratorium menunjukkan kinerja tidak jauh berbeda dengan hasil *Plaxis 2D*. Untuk lebih jelasnya disajikan pada Gambar 5.20 berikut :

1. Mortar Busa tebal 20 cm

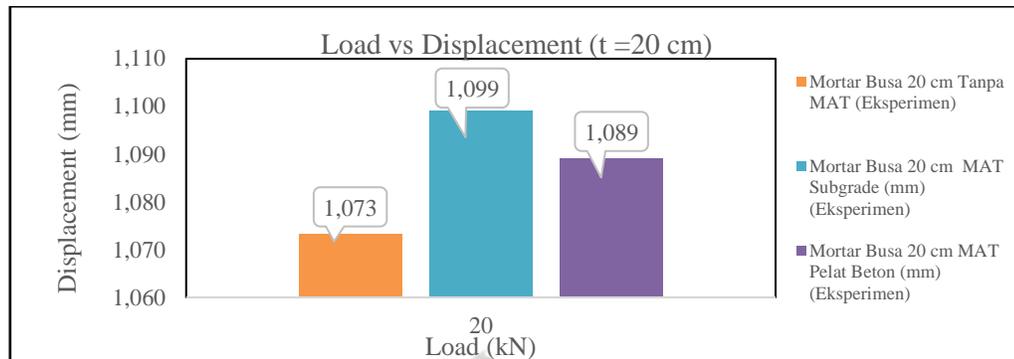


Gambar 5.20: Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 20 cm (Hasil Eksperimen Laboratorium)

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan Gambar 5.20 di atas, Muka air tanah berpengaruh signifikan terhadap penurunan tanah yang terjadi pada timbunan mortar busa tebal 20 cm. Tanpa adanya muka air tanah, penurunan yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan kondisi di mana muka air tanah ada. Analisis menunjukkan bahwa penurunan tanah pada Plat beton dengan mortar busa tetap lebih kecil dibandingkan dengan *subgrade* saat terpengaruh muka air tanah. Penurunan maksimum terjadi pada beban 20 kN dalam eksperimen laboratorium, menunjukkan bahwa pengaruh gaya apung (*uplift*) dari muka air tanah dapat mengurangi penurunan yang dihasilkan oleh mortar busa

yang terendam air. Hasil penurunan tanah berdasarkan beban maksimum akibat variasi Muka Air Tanah disajikan Gambar 5.21 berikut :

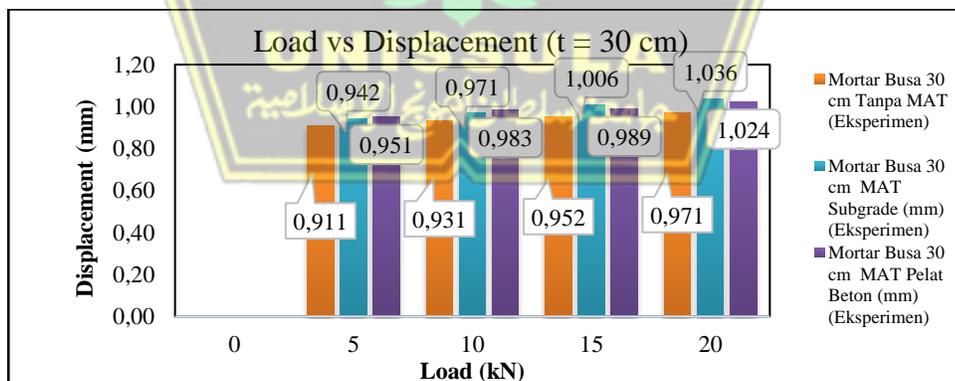


Gambar 5.21: Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 20 cm pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil Eksperimen Laboratorium)

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan Gambar 5.21 di atas, penurunan terkecil pada kondisi mortar busa tebal 20 cm tanpa Muka Air Tanah sebesar 1.073 mm. Pada kondisi timbunan mortar busa tebal 20 cm akibat Muka Air Tanah, timbunan dengan mortar busa tebal 20 cm kondisi Muka Air Tanah pada Plat beton, nilai penurunannya akibat beban 20 kN sebesar 1.089 mm lebih kecil dibandingkan timbunan mortar busa tebal 20 cm kondisi Muka Air Tanah pada *subgrade* nilainya sebesar 1,099 mm.

2. Mortar Busa Tebal 30 cm

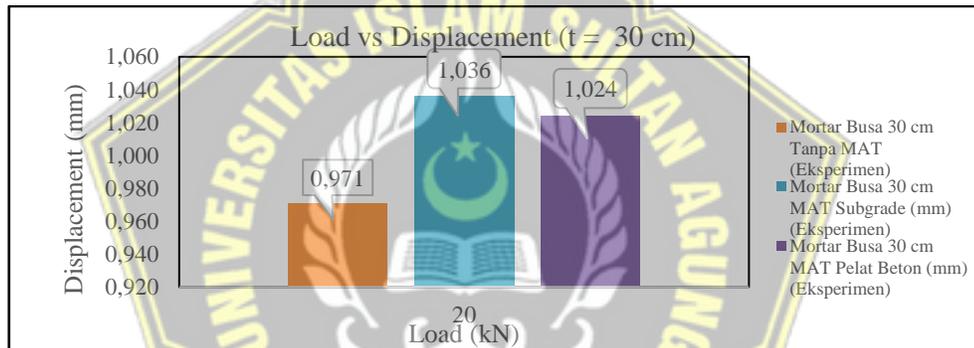


Gambar 5.22: Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 30 cm (Hasil Eksperimen Laboratorium)

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan Gambar 5.22 di atas, Muka Air Tanah berpengaruh memperkecil terjadinya penurunan tanah melalui gaya apung (*uplift*) oleh mortar busa yang terendam air. Timbunan dengan mortar busa tebal 30 cm tanpa Muka Air Tanah penurunannya lebih kecil dibandingkan dengan mortar busa tebal 30 cm dengan Muka Air Tanah. Apabila dibandingkan dengan timbunan dengan mortar busa tebal 30 cm akibat Muka Air Tanah, nilai penurunan tanah pada mortar busa tebal 30 cm Muka Air Tanah di Plat beton lebih kecil dari timbunan mortar busa tebal 30 cm Muka Air Tanah di *subgrade*. Penurunan maksimum terjadi pada beban maksimum 20 kN pada analisis eksperimen di laboratorium.

Hasil penurunan tanah berdasarkan beban maksimum akibat variasi Muka Air Tanah disajikan Gambar 5.23 berikut :

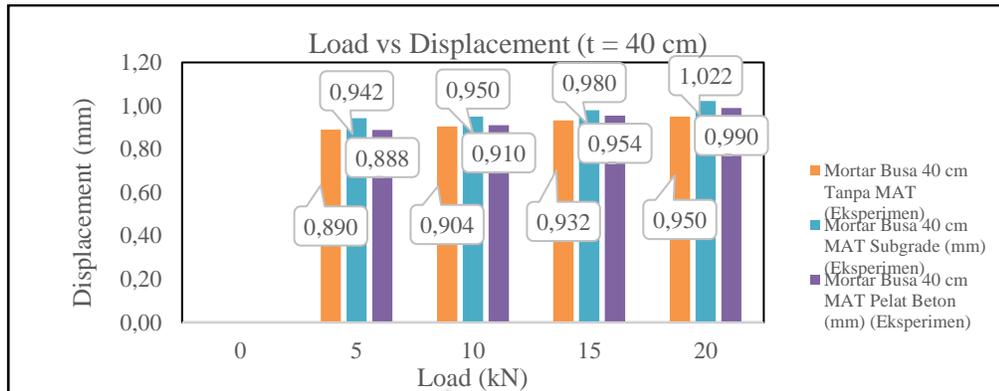


Gambar 5.23: Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 30 cm pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil Eksperimen Laboratorium)

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan Gambar 5.23 di atas, penurunan terkecil pada kondisi mortar busa tebal 30 cm tanpa Muka Air Tanah sebesar 0,971 mm. Pada kondisi timbunan mortar busa tebal 30 cm akibat Muka Air Tanah, timbunan dengan mortar busa tebal 30 cm kondisi Muka Air Tanah pada Plat beton, nilai penurunannya akibat beban 20 kN sebesar 1,024 mm lebih kecil dibandingkan timbunan mortar busa tebal 20 cm kondisi Muka Air Tanah pada *subgrade* nilainya sebesar 1,036 mm.

3. Mortar Busa Tebal 40 cm

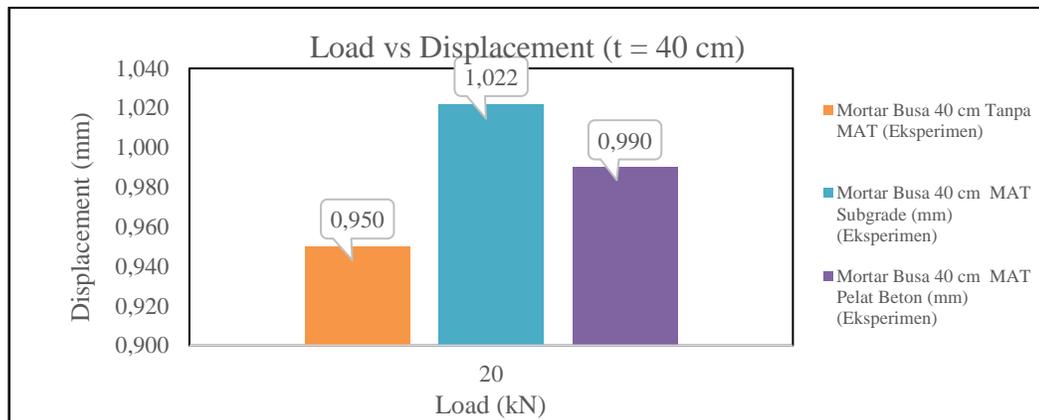


Gambar 5.24: Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 40 cm (Hasil Eksperimen Laboratorium)

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan Gambar 5.24 di atas, Muka Air Tanah berpengaruh memperkecil terjadinya penurunan tanah melalui gaya apung (*uplift*) oleh mortar busa yang terendam air. Timbunan dengan mortar busa tebal 40 cm tanpa Muka Air Tanah penurunannya lebih kecil dibandingkan dengan mortar busa tebal 40 cm dengan Muka Air Tanah. Apabila dibandingkan dengan timbunan dengan mortar busa tebal 40 cm akibat Muka Air Tanah, nilai penurunan tanah pada mortar busa tebal 40 cm Muka Air Tanah di Plat beton lebih kecil dari timbunan mortar busa tebal 40 cm Muka Air Tanah di *subgrade*. Penurunan maksimum terjadi pada beban maksimum 20 kN pada analisis eksperimen di laboratorium.

Hasil penurunan tanah berdasarkan beban maksimum akibat variasi Muka Air Tanah disajikan Gambar 5.25 berikut :



Gambar 5.25: Penurunan dengan Mortar Busa Tebal 40 cm pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil Eksperimen Laboratorium)

Sumber : Hasil Penelitian

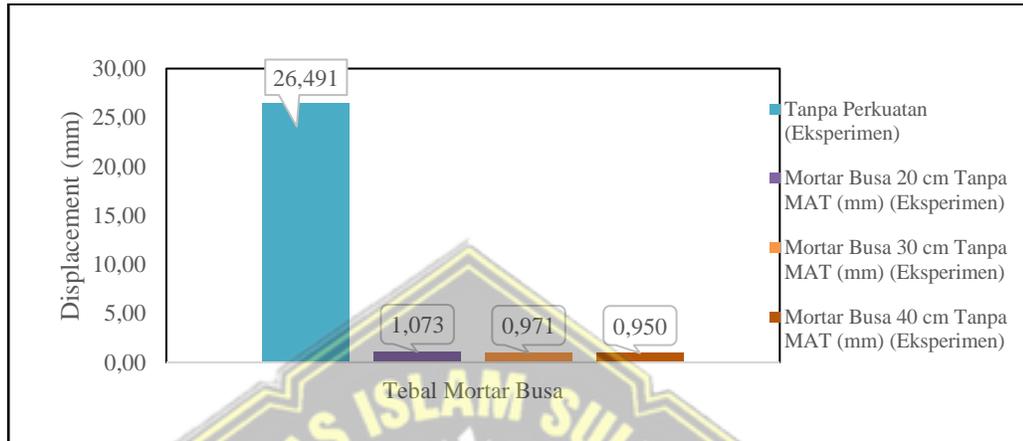
Berdasarkan Gambar di atas, penurunan terkecil pada kondisi mortar busa tebal 40 cm tanpa Muka Air Tanah sebesar 0,950 mm. Pada kondisi timbunan mortar busa tebal 40 cm akibat Muka Air Tanah, timbunan dengan mortar busa tebal 40 cm kondisi Muka Air Tanah pada Plat beton, nilai penurunannya akibat beban 20 kN sebesar 0,990 mm lebih kecil dibandingkan timbunan mortar busa tebal 40 cm kondisi Muka Air Tanah pada *subgrade* nilainya sebesar 1,022 mm.

Muka Air Tanah mempengaruhi timbunan dengan mortar busa. Timbunan mortar busa akibat level Muka Air Tanah menunjukkan semakin tinggi level Muka Air Tanah yang merendam mortar busa maka semakin kecil penurunan yang terjadi. Hal ini memberikan gambaran bahwa semakin tinggi Muka Air Tanah yang merendam mortar busa maka dapat meminimalisir terjadinya penurunan tanah. Daya dukung *subgrade* yang terjadi dapat mereduksi gaya berat yang diberikan.

Gambar berikut menampilkan terjadinya peningkatan penurunan akibat beban yang diberikan dengan variasi tebal mortar busa dan variasi Muka Air Tanah. Penurunan terbesar terjadi pada pengujian eksperimental di laboratorium pada kondisi timbunan tanpa mortar busa.

1. Kondisi Variasi Tebal Mortar Busa Tanpa Muka Air Tanah

Kondisi ini menampilkan penurunan *subgrade* yang terjadi akibat timbunan mortar busa dengan variasi tebal terhadap beban yang diberikan. Disajikan pada Gambar 5.26 berikut :



Gambar 5.26: Penurunan dengan Variasi Tebal Mortar Busa Tanpa MAT pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil Eksperimen Laboratorium)

Sumber : Hasil Penelitian

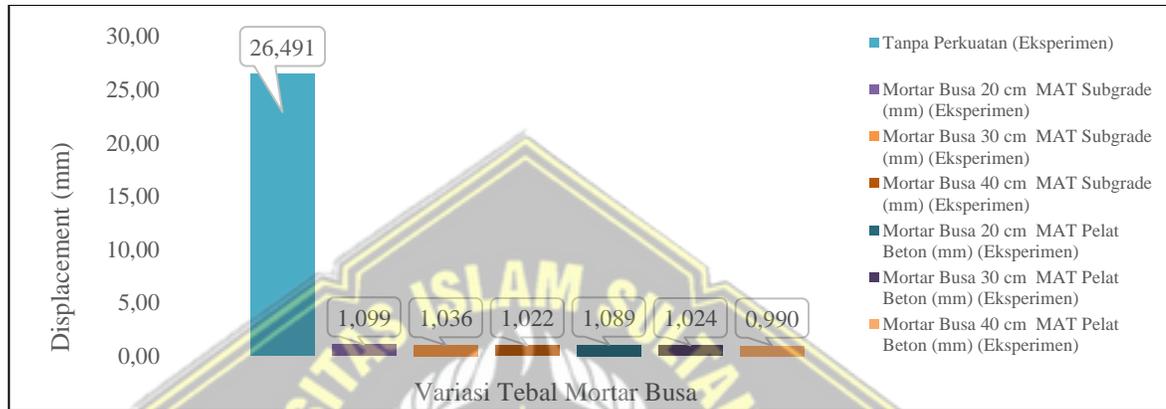
Besarnya persentase yang didapat pada *subgrade* tanpa perkuatan dibandingkan dengan adanya perkuatan mortar busa tebal 20 cm, 30 cm dan 40 cm berturut-turut adalah 95,94%, 96,33% dan 96,41%. Tebal mortar busa berpengaruh terhadap nilai penurunan tanah, berdasarkan eksperimen dan validasi dengan numerik *Plaxis* 2D hasilnya semakin tebal mortar busa yang digunakan penurunan tanah yang terjadi akan semakin kecil. Timbunan dengan mortar busa memperkecil terjadinya penurunan tanah. Timbunan tanpa menggunakan mortar busa mengakibatkan penurunan yang besar pada beban maksimum 20 kN sebesar 26,491 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 mortar busa pada tanah lunak berdasarkan tebal mortar busa pada penurunan tanah yaitu terjadi penurunan tanah paling kecil pada mortar busa dengan tebal 40 cm. Mortar busa dapat dijadikan sebagai

pengganti timbunan, karena berdasarkan hasil eksperimen di laboratorium dapat memperkecil nilai penurunan tanah.

2. Kondisi Variasi Tebal Mortar Busa dengan Muka Air Tanah

Kondisi ini menampilkan penurunan *subgrade* yang terjadi akibat timbunan mortar busa dengan variasi tebal terhadap beban yang diberikan dan variasi level Muka Air Tanah. Disajikan pada Gambar 5.27 berikut :

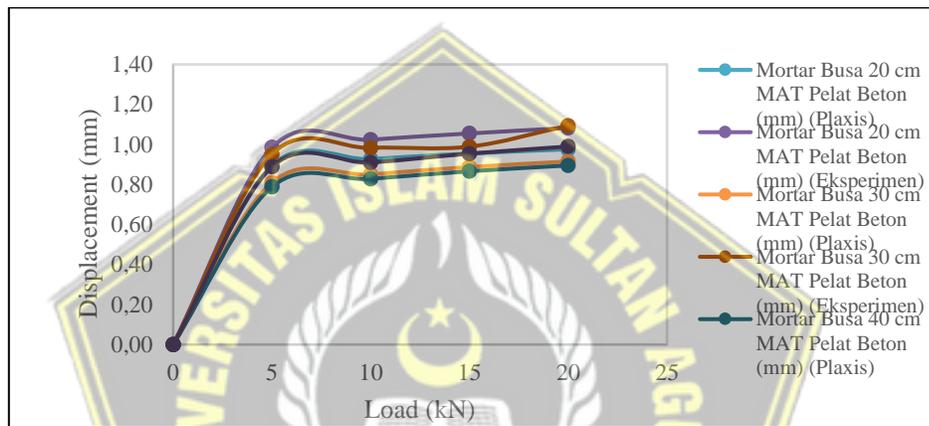


Gambar 5.27: Penurunan dengan Variasi Tebal Mortar Busa dengan MAT pada Beban Maksimum 20 kN (Hasil Eksperimen di Laboratorium)

Sumber : Hasil Penelitian

Persentase penurunan yang terjadi pada timbunan tanpa mortar busa dibandingkan dengan timbunan mortar busa menunjukkan hasil yang signifikan. Untuk timbunan mortar busa dengan ketebalan 20 cm pada *subgrade*, penurunan tercatat sebesar 95,806%, sedangkan untuk ketebalan 30 cm adalah 95,862%, dan untuk ketebalan 40 cm mencapai 96,142%. Di sisi lain, pada Plat beton, persentase penurunan untuk ketebalan 20 cm adalah 95,912%, ketebalan 30 cm sebesar 95,946%, dan ketebalan 40 cm mencatatkan angka tertinggi yaitu 96,263%. Kondisi elevasi muka air tanah memiliki dampak yang jelas terhadap penurunan tanah. Peningkatan level muka air tanah atau kondisi di mana mortar busa terendam air menyebabkan penurunan tanah menjadi lebih kecil. Hal ini disebabkan oleh pengaruh muka air yang meningkatkan daya dukung *subgrade* ketika menggunakan mortar busa. Dari data yang ada, terlihat bahwa semakin tebal mortar busa dan semakin tinggi level muka air tanah, maka penurunan tanah akan semakin berkurang. Gaya gravitasi berperan dalam memberikan

tekanan pada partikel air yang kemudian menekan partikel di bawahnya, menciptakan tekanan yang lebih besar di dasar air dibandingkan dengan tekanan di atasnya. Akibatnya, mortar busa mengalami tekanan hidrostatis. Mortar busa dengan ketebalan 40 cm memiliki volume yang lebih besar dibandingkan dengan ketebalan 30 cm dan 20 cm, sehingga total gaya ke bawah menjadi lebih besar daripada gaya ke atas akibat beban hidrostatis. Untuk perbandingan anatara analisis eksperimen di laboratorium dengan analisis *Plaxis* 2D timbunan dengan mortar busa tanpa Muka Air Tanah dilihat pada Gambar 5.28 berikut :



Gambar 5.28: Penurunan Timbunan dengan Mortar Busa Tanpa MAT (Hasil Pengujian Eksperimen di Labortaorium dan *Plaxis* 2D

Sumber : Hasil Penelitian

Penggunaan mortar busa sebagai material timbunan dapat mengurangi risiko penurunan tanah. Penelitian menunjukkan bahwa penurunan tanah paling minimal terjadi pada timbunan dengan ketebalan mortar busa 40 cm. Untuk memvalidasi hasil eksperimen yang dilakukan di laboratorium, digunakan perangkat lunak *Plaxis* 2D versi 2023. Hasil analisis menunjukkan bahwa penurunan tanah yang terjadi, berdasarkan variasi beban dan ketebalan mortar busa yang digunakan sebagai pengganti timbunan tanpa MAT, deviasi terjadi sekitar $\pm 10\%$.

5.3.1. Hubungan Tebal Mortar Busa dengan Gaya Angkat (*Hydrostatic Uplift*)

Perhitungan gaya angkat (*uplift*) berdasarkan eksperimen di laboratorium berat Plat 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 Plat 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 Plat beton berdasarkan Hukum Newton 2 yaitu :

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

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

1. Muka Air Tanah Pada *Subgrade*

a. Mortar busa tebal 20 cm tinggi MAT 60 cm (*MAT subgrade*) (Beban 5 kN)

Tebal mortar busa : 20 cm = 0,2 m

Panjang mortar busa : 180 cm = 1,8 m

Lebar mortar busa : 40 cm = 0,4 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 :

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

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

$$\begin{aligned}W_{\text{mortar busa}} : \text{Berat mortar busa} &= p \times l \times h \times \gamma_{\text{mortar busa}} \\ &= 1,8 \text{ m} \times 0,4 \times 0,2 \text{ m} \times 0,8 \text{ kN/m}^3 \\ &= 0,1152 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

Stotal : Penurunan total = 1,002 x 10⁻³

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

$$\begin{aligned} W_{\text{air}} : \text{Berat air} &= \frac{1}{2} (h + S_{\text{total}}) \left(\frac{sh}{sv}\right) (h + S_{\text{total}}) \times \gamma_{\text{air}} \\ &= \frac{1}{2} (0,6 + 1,002 \times 10^{-3}) (1/1)(0,6 + 1,002 \times 10^{-3}) \times 9,81 \\ &= 0,3005 \times 1 \times 0,601 \times 9,81 \\ &= 1,7717 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

O_{REQ} : Beban tambahan yang diperlukan struktur timbunan mortar busa agar memenuhi faktor aman.

$$\begin{aligned} O_{\text{REQ}} &= [1,2 (\gamma_w \times (h + S_{\text{total}}) \times Bw)] - [(W_{\text{mortar busa}} + W_{\text{air}} + W'_{\text{air}})] \\ &= [1,2 (9,81 \text{ kN/m}^3 \times (0,6 \text{ m} + 1,002 \times 10^{-3} \text{ m}) \times 2,2 \text{ m})] - [(0, \\ &\quad 1152 \text{ kN/m} + 1,7717 \text{ kN/m} + 1,7717 \text{ kN})] \\ &= 15,5650 \text{ kN/m} - 3,6586 \text{ kN/m} \\ &= 11,9064 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Tekanan air menimbulkan gaya angkat pada dasar timbunan sebesar :

$$\begin{aligned} S_u &= \gamma_w \times Bw \times (h' + S_{\text{total}}) \\ &= 9,81 \text{ kN/m}^3 \times 2,2 \text{ m} \times (0,6 \text{ m} + 1,002 \times 10^{-3} \text{ m}) \\ &= 12,9708 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_n &= \text{Total gaya normal yang bekerja} \\ &= W_{\text{mortar busa}} + W_{\text{air}} + W'_{\text{air}} + O_{\text{REQ}} \\ &= 0,1152 \text{ kN/m} + 1,7717 \text{ kN/m} + 1,7717 \text{ kN/m} + 11,9064 \text{ kN/m} \\ &= 15,5650 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} F_k &= \frac{S_N}{S_U} \\ &= \frac{15,5650}{12,9708} \\ &= 1,19 \end{aligned}$$

Dengan hasil faktor keamanan pada beban 5 kN di atas, untuk beban selanjutnya akan disajikan dalam Tabel 5.5 dibawah ini :

Tabel 5.5: Faktor Keamanan Mortar Busa 20 cm Akibat MAT *Subgrade*

| No | Beban (kN/m) | Sn (Gaya Total Yang Bekerja) (kN/m) | Su (Gaya Angkat) (kN/m) | FK (Sn/Su) | Syarat FK |
|----|--------------|-------------------------------------|-------------------------|------------|-----------|
| 1 | 0 | 15,5323 | 12,9492 | 1,2 | 1,2 |
| 2 | 5 | 15,5650 | 12,9708 | 1,2 | |
| 3 | 10 | 15,5650 | 12,9717 | 1,2 | |
| 4 | 15 | 15,5671 | 12,9726 | 1,2 | |
| 5 | 20 | 15,5675 | 12,9729 | 1,2 | |

Sumber : Hasil Penelitian

Diperoleh nilai Faktor Keamanan 1,2 pada masing-masing beban 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN pada tebal mortar busa 20 cm yang disebabkan oleh gaya angkat air. Hal ini dianggap aman sesuai dengan persyaratan Faktor keamanan = 1,2. (Lastiasih & Mochtar, 2022a).

- b. Mortar busa tebal 30 cm MAT 60 cm (MAT *subgrade*) (Beban 5 kN)

Tebal mortar busa : 30 cm = 0,3 m

Panjang mortar busa : 180 cm = 1,8 m

Massa jenis air : 9,81 kN/m³

Ketinggian air : 60 cm = 0,6 m

Pada kasus tinggi air di kedua sisi timbunan memiliki tinggi yang sama, persamaan faktor keamanan menjadi :

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

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

$$\begin{aligned} W_{mortar\ busa} : \text{Berat mortar busa} &= p \times l \times h \times \gamma_{mortar\ busa} \\ &= 1,80\text{ m} \times 0,4 \times 0,3\text{ m} \times 0,8\text{ kN/m}^3 \\ &= 0,1728\text{ kN/m} \end{aligned}$$

Stotal : Penurunan total = 0,942 x 10⁻³ m

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

$$\begin{aligned} W_{\text{air}} : \text{Berat air} &= \frac{1}{2} (h + S_{\text{total}}) \left(\frac{sh}{sv}\right) (h + S_{\text{total}}) \times \gamma_{\text{air}} \\ &= \frac{1}{2} (0,6 + 0,942 \times 10^{-3}) (1/1)(0,6 + 0,942 \times 10^{-3}) \times 9,81 \\ &= 0,3005 \times 1 \times 0,6009 \times 9,81 \\ &= 0,7712 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

O_{REQ} : Beban tambahan yang diperlukan struktur timbunan mortar busa agar memenuhi faktor aman.

$$\begin{aligned} O_{\text{REQ}} &= [1,2 (\gamma_w \times (h + S_{\text{total}}) \times Bw)] - [(W_{\text{mortar busa}} + W_{\text{air}} + W'_{\text{air}})] \\ &= [1,2 (9,81 \text{ kN/m}^3 \times (0,6 \text{ m} + 0,942 \times 10^{-3} \text{ m}) \times 2,2 \text{ m})] - [(0,1728 \text{ kN/m} + 0,7712 \text{ kN/m} + 0,7712 \text{ kN})] \\ &= 15,5634 \text{ kN/m} - 1,7152 \text{ kN/m} \\ &= 13,8482 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Tekanan air menimbulkan gaya angkat pada dasar timbunan sebesar :

$$\begin{aligned} S_u &= \gamma_w \times Bw \times (h' + S_{\text{total}}) \\ &= 9,81 \text{ kN/m}^3 \times 2,2 \text{ m} \times (0,6 \text{ m} + 0,942 \times 10^{-3} \text{ m}) \\ &= 12,9695 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_n &= \text{Total gaya normal yang bekerja} \\ &= W_{\text{mortar busa}} + W_{\text{air}} + W'_{\text{air}} + O_{\text{REQ}} \\ &= 0,1728 \text{ kN/m} + 0,7712 \text{ kN/m} + 0,7712 \text{ kN/m} + 13,8482 \text{ kN/m} \\ &= 15,5634 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} F_k &= \frac{SN}{SU} \\ &= \frac{15,5634}{12,9695} \\ &= 1,2 \end{aligned}$$

Dengan hasil faktor keamanan pada beban 5 kN di atas, untuk beban selanjutnya akan disajikan dalam Tabel 5.6 dibawah ini :

Tabel 5.6: Faktor Keamanan Mortar Busa 30 cm Akibat MAT *Subgrade*

| No | Beban (kN/m) | Sn (Gaya Total Yang Bekerja) (kN/m) | Su (Gaya Angkat) (kN/m) | FK (Sn/Su) | Syarat FK |
|----|--------------|-------------------------------------|-------------------------|------------|-----------|
| 1 | 0 | 15,5390 | 12,9695 | 1,2 | 1,2 |
| 2 | 5 | 15,5634 | 12,9695 | 1,2 | |
| 3 | 10 | 15,5642 | 12,9702 | 1,2 | |
| 4 | 15 | 15,5651 | 12,9709 | 1,2 | |
| 5 | 20 | 15,5659 | 12,9716 | 1,2 | |

Sumber : Hasil Penelitian

Diperoleh nilai Faktor Keamanan 1,2 pada masing- masing beban 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN pada tebal mortar busa 30 cm yang disebabkan oleh gaya angkat air. hal ini dianggap aman sesuai dengan persyaratan Faktor kermanan = 1,2. (Lastiasih & Mochtar, 2022a).

c. Mortar busa tebal 40 cm MAT 60 cm (MAT *subgrade*) (Beban 5 kN)

Tebal mortar busa : 40 cm = 0,4 m

Panjang mortar busa : 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 :

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

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

$W_{mortar\ busa}$: Berat mortar busa = p x l x h x γ mortar busa

$$= 1,80\text{ m} \times 0,4 \times 0,4\text{ m} \times 0,8\text{ kN/m}^3$$

$$= 0,2304\text{ kN/m}$$

S_{total} : Penurunan total = 0,942 x 10⁻³ m

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

$$\begin{aligned} W_{\text{air}} : \text{Berat air} &= \frac{1}{2} (h + S_{\text{total}}) \left(\frac{sh}{sv}\right) (h + S_{\text{total}}) \times \gamma_{\text{air}} \\ &= \frac{1}{2} (0,6 + 0,942 \times 10^{-3}) (1/1)(0,6 + 0,942 \times 10^{-3}) \times 9,81 \\ &= 0,3005 \times 1 \times 0,6009 \times 9,81 \\ &= 1,7715 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

O_{REQ} : Beban tambahan yang diperlukan struktur timbunan mortar busa agar memenuhi faktor aman.

$$\begin{aligned} O_{\text{REQ}} &= [1,2 (\gamma_w \times (h + S_{\text{total}}) \times B_w)] - [(W_{\text{mortar busa}} + W_{\text{air}} + W'_{\text{air}})] \\ &= [1,2 (9,81 \text{ kN/m}^3 \times (0,6 \text{ m} + 0,942 \times 10^{-3} \text{ m}) \times 2,2 \text{ m})] - [(0,2304 \text{ kN/m} + 1,7715 \text{ kN/m} + 1,7715 \text{ kN})] \\ &= 15,5634 \text{ kN/m} - 3,7734 \text{ kN/m} \\ &= 11,7900 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Tekanan air menimbulkan gaya angkat pada dasar timbunan sebesar :

$$\begin{aligned} S_u &= \gamma_w \times B_w \times (h' + S_{\text{total}}) \\ &= 9,81 \text{ kN/m}^3 \times 2,2 \text{ m} \times (0,6 \text{ m} + 0,942 \times 10^{-3} \text{ m}) \\ &= 12,9690 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_n &= \text{Total gaya normal yang bekerja} \\ &= W_{\text{mortar busa}} + W_{\text{air}} + W'_{\text{air}} + O_{\text{REQ}} \\ &= 0,2304 \text{ kN/m} + 1,7715 \text{ kN/m} + 1,7715 \text{ kN/m} + 11,7900 \text{ kN/m} \\ &= 15,5634 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} F_k &= \frac{S_n}{S_u} \\ &= \frac{15,5634}{12,9690} = 1,2 \end{aligned}$$

Dengan hasil faktor keamanan pada beban 5 kN di atas, untuk beban selanjutnya akan disajikan dalam Tabel 5.7 dibawah ini :

Tabel 5.7: Faktor Keamanan Mortar Busa 40 cm Akibat MAT *Subgrade*

| No | Beban (kN/m) | Sn (Gaya Total Yang Bekerja) (kN/m) | Su (Gaya Angkat) (kN/m) | FK (Sn/Su) | Syarat FK |
|----|--------------|-------------------------------------|-------------------------|------------|-----------|
| 1 | 0 | 15,5346 | 12,9492 | 1,2 | 1,2 |
| 2 | 5 | 15,5634 | 12,9690 | 1,2 | |
| 3 | 10 | 15,5638 | 12,9697 | 1,2 | |
| 4 | 15 | 15,5644 | 12,9713 | 1,2 | |
| 5 | 20 | 15,5655 | 12,9720 | 1,2 | |

Sumber : Hasil Penelitian

Diperoleh nilai Faktor Keamanan 1,2 pada masing-masing beban 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN pada tebal mortar busa 40 cm yang disebabkan oleh gaya angkat air. Hal ini dianggap aman sesuai dengan persyaratan Faktor keamanan = 1,2. (Lastiasih & Mochtar, 2022a).

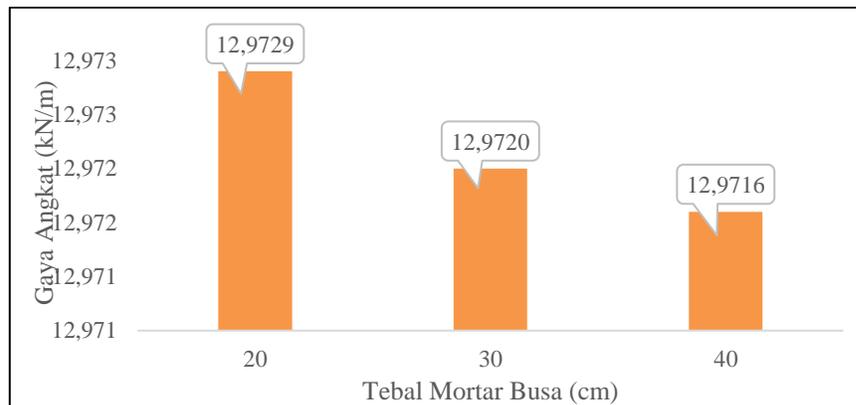
Hasil Faktor Keamanan (FK) akibat gaya angkat (*Hidrostatic Uplift*) dengan muka air tanah pada *subgrade* disajikan pada Tabel 5.8 berikut :

Tabel 5.8: Hasil Nilai Faktor Aman Timbunan Mortar Busa Akibat Gaya Angkat dengan Muka Air Tanah pada *Subgrade*

| No | Tebal mortar busa (cm) | Sn (Gaya Total Yang Bekerja) (kN/m) | Su (Gaya Angkat) (kN/m) | FK (Sn/Su) |
|----|------------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------|
| 1 | 20 | 15,5675 | 12,9729 | 1,2 |
| 2 | 30 | 15,5659 | 12,9720 | 1,2 |
| 3 | 40 | 15,5655 | 12,9716 | 1,2 |

Sumber : Hasil Penelitian

Tabel 5.8 diatas menjelaskan nilai Faktor Keamanan akibat gaya angkat dengan MAT *subgrade* berdasarkan variasi ketebalan mortar busa adalah 1,2. Artinya adalah ketebalan mortar busa masih dalam batas toleransi. (Lastiasih & Mochtar, 2022a). Hubungan gaya angkat dengan tebal mortar busa pada kondisi muka air tanah pada *subgrade* disajikan pada Gambar 5.29 berikut :

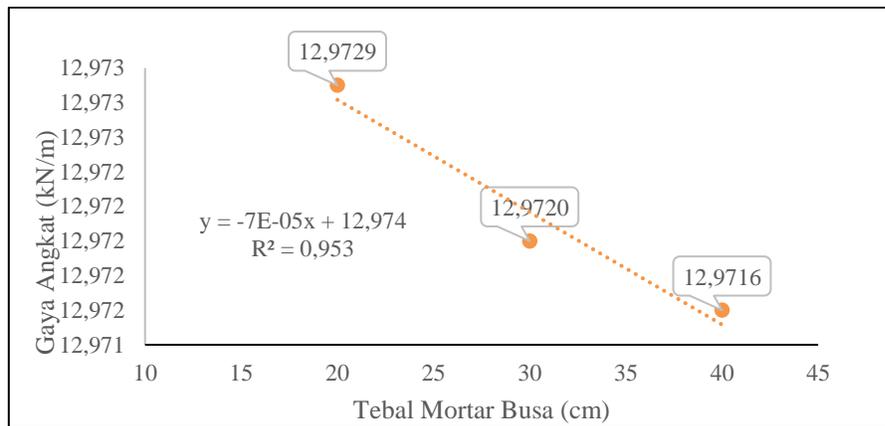


Gambar 5.29: Nilai Gaya Angkat Akibat Tebal Mortar Busa Kondisi MAT
Subgrade

Sumber : Hasil Penelitian

Penggunaan mortar busa dalam konstruksi menunjukkan bahwa semakin tebal lapisan mortar, semakin rendah gaya angkat yang dihasilkan. Ketebalan mortar busa berpengaruh signifikan terhadap gaya angkat, dan peningkatan muka air tanah juga meningkatkan daya dukung *subgrade*. Dengan ketebalan mortar yang lebih besar dan muka air yang lebih tinggi, penurunan tanah menjadi lebih minimal. Gaya gravitasi menyebabkan berat air memberikan tekanan pada partikel di bawahnya, menghasilkan interaksi tekanan yang lebih besar di dasar air dibandingkan di atas, sehingga mortar busa mengalami tekanan hidrostatik. Mortar busa setebal 40 cm memiliki volume yang lebih besar dibandingkan dengan ketebalan 30 cm dan 20 cm, sehingga total gaya ke bawah melebihi gaya ke atas akibat beban hidrostatik. (Lat et al., 2019)

Berdasarkan data gaya angkat yang diperoleh selanjutnya dapat dibuat grafik pengaruh tebal mortar busa terhadap gaya angkat akibat Muka Air Tanah pada *subgrade* disajikan Gambar 5.30 berikut :



Gambar 5.30: Pengaruh Tebal Mortar Busa terhadap Gaya Angkat Kondisi MAT pada *Subgrade*

Sumber : Hasil Penelitian

Pada Gambar 5.30 menunjukkan regresi linier dengan tiga data utama hasil analisis rumus tekanan hidrostatis menggunakan mortar busa. Berdasarkan *trend* grafik tersebut dapat dirumuskan bahwa pengaruh tebal mortar busa terhadap gaya angkat dapat ditulis dengan Persamaan berikut :

$$\begin{aligned}
 y &= -7E-05x + 12,974 \\
 Su &= -7E-05h_{mortar\ busa} + 12,974
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Dimana :

Su : Gaya angkat (kN/m)

$h_{mortar\ busa}$: Tebal mortar busa (cm)

Tingkat akurasi regresi linear berdasarkan koefisien determinasi $R^2 = 0,953$, berdasarkan Tabel 2.18 nilainya $> 0,75$ maka akurasi model regresi kategori baik.

2. Muka Air Tanah pada Plat Beton

- a. Mortar busa tebal 20 cm tinggi MAT 85 cm (MAT pada Plat beton) (Beban 5 kN)

Tebal mortar busa : 20 cm = 0,2 m

Panjang mortar busa : 180 cm = 1,8 m

Massa jenis air : 9,81 kN/m³

Ketinggian air : 85 cm = 0,85 m

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

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

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

$$\begin{aligned} W_{mortar\ busa} : \text{ Berat mortar busa} &= p \times l \times h \times \gamma_{mortar\ busa} \\ &= 1,80 \text{ m} \times 0,4 \times 0,2 \text{ m} \times 0,8 \text{ kN/m}^3 \\ &= 0,1152 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$S_{total} : \text{ Penurunan total} = 0,988 \times 10^{-3} \text{ m}$$

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

$$\begin{aligned} W_{air} : \text{ Berat air} &= \frac{1}{2} (h + S_{total}) \left(\frac{sh}{sv} \right) (h + S_{total}) \times \gamma_{air} \\ &= \frac{1}{2} (0,85 + 0,988 \times 10^{-3} \text{ m}) (1/1) (0,85 + 0,988 \times 10^{-3} \text{ m}) \times 9,81 \\ &= 0,425494 \times 0,850988 \times 9,81 \\ &= 3,2552106 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

O_{REQ} : Beban tambahan yang diperlukan struktur timbunan mortar busa agar memenuhi faktor aman

$$\begin{aligned} O_{REQ} &= [1,2 (\gamma_w \times (h + S_{total}) \times B_w)] - [(W_{mortar\ busa} + W_{air} + W'_{air})] \\ &= [1,2 (9,81 \text{ kN/m}^3 \times (0,85 \text{ m} + 0,988 \times 10^{-3} \text{ m}) \times 2,2 \text{ m})] - [(0,1152 \text{ kN/m} + 3,2552106 \text{ kN/m} + 3,2552106 \text{ kN})] \\ &= 22,0392 \text{ kN/m} - 6,6256 \text{ kN/m} \\ &= 15,4135 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Tekanan air menimbulkan gaya angkat pada dasar timbunan sebesar :

$$\begin{aligned} S_u &= \gamma_w \times B_w \times (h' + S_{total}) \\ &= 9,81 \text{ kN/m}^3 \times 2,2 \text{ m} \times (0,85 \text{ m} + 0,988 \times 10^{-3} \text{ m}) \\ &= 18,36602 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_n &= \text{Total gaya normal yang bekerja} \\ &= W_{mortar\ busa} + W_{air} + W'_{air} + O_{REQ} \end{aligned}$$

$$= 0,1152 \text{ kN/m} + 3,2552106 \text{ kN/m} + 3,2552106 \text{ kN/m} + 15,4135 \text{ kN/m}$$

$$= 22,0391 \text{ kN/m}$$

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

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

$$= \frac{22,0391}{18,36602} = 1,2$$

Dengan hasil faktor keamanan pada beban 5 kN di atas, untuk beban selanjutnya akan disajikan dalam Tabel 5.9 dibawah ini :

Tabel 5.9: Faktor Keamanan Mortar Busa 20 cm Akibat MAT Plat Beton

| No | Beban (kN/m) | Sn (Gaya Total Yang Bekerja)(kN/m) | Su (Gaya Angkat) (kN/m) | FK (Sn/Su) | Syarat FK |
|----|--------------|------------------------------------|-------------------------|------------|-----------|
| 1 | 0 | 22,0136 | 18,3447 | 1,2 | 1,2 |
| 2 | 5 | 22,0391 | 18,36602 | 1,2 | |
| 3 | 10 | 22,04016 | 18,36680 | 1,2 | |
| 4 | 15 | 22,04136 | 18,36788 | 1,2 | |
| 5 | 20 | 22,0418 | 18,36820 | 1,2 | |

Sumber : Hasil Penelitian

Diperoleh nilai Faktor Keamanan 1,2 pada masing- masing beban 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN pada tebal mortar busa 20 cm yang disebabkan oleh gaya angkat air. hal ini dianggap aman sesuai dengan persyaratan Faktor kermanan = 1,2. (Lastiasih & Mochtar, 2022a).

b. Mortar busa tebal 30 cm MAT 95 cm (MAT Plat beton) (Beban 5 kN)

Tebal mortar busa : 30 cm = 0,3 m

Panjang mortar busa : 180 cm = 1,8 m

Massa jenis air : 9,81 kN/m³

Ketinggian air : 95 cm = 0,95 m

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

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

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

$$\begin{aligned} W_{mortar\ busa} : \text{Berat mortar busa} &= p \times l \times h \times \gamma_{mortar\ busa} \\ &= 1,80 \times 0,4 \times 0,3 \times 0,8 \\ &= 0,1728 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$S_{total} : \text{Penurunan total} = 0,951 \times 10^{-3} \text{ m}$$

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

(karena model eksperimen berbentuk persegi panjang sehingga perbandingannya menjadi 1 : 1)

$$\begin{aligned} W_{air} : \text{Berat air} &= \frac{1}{2} (h + S_{total}) \left(\frac{sh}{sv} \right) (h + S_{total}) \times \gamma_{air} \\ &= \frac{1}{2} (0,95 + 0,951 \times 10^{-3}) (1/1) (0,95 + 0,951 \times 10^{-3}) \times 9,81 \\ &= 0,4754755 \times 0,950951 \times 9,81 \\ &= 4,43563 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

O_{REQ} : Beban tambahan yang diperlukan struktur timbunan mortar busa agar memenuhi faktor aman.

$$\begin{aligned} O_{REQ} &= [1,2 (\gamma_w \times (h + S_{total}) \times B_w)] - [(W_{mortar\ busa} + W_{air} + W'_{air})] \\ &= [1,2 (9,81 \text{ kN/m}^3 \times (0,95 \text{ m} + 0,951 \times 10^{-3} \text{ m}) \times 2,2 \text{ m})] - \\ &\quad [(0,1728 \text{ kN/m} + 4,43563 \text{ kN/m} + 4,43563 \text{ kN})] \\ &= 24,62811 \text{ kN/m} - 9,04406 \text{ kN/m} \\ &= 15,58405 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Tekanan air menimbulkan gaya angkat pada dasar timbunan sebesar :

$$\begin{aligned} S_u &= \gamma_w \times B_w \times (h' + S_{total}) \\ &= 9,81 \text{ kN/m}^3 \times 2,2 \text{ m} \times (0,95 \text{ m} + 0,951 \times 10^{-3} \text{ m}) \\ &= 20,52342 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_n &= \text{Total gaya normal yang bekerja} \\ &= W_{mortar\ busa} + W_{air} + W'_{air} + O_{REQ} \\ &= 0,1728 \text{ kN/m} + 4,43563 \text{ kN/m} + 4,43563 \text{ kN/m} + 15,58405 \text{ kN/m} \\ &= 24,62811 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

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

$$F_k = \frac{S_n}{S_u}$$

$$= \frac{24,62811}{20,52342} = 1,2$$

Dengan hasil faktor keamanan pada beban 5 kN di atas, untuk beban selanjutnya akan disajikan dalam Tabel 5.10 dibawah ini :

Tabel 5.10: Faktor Keamanan Mortar Busa 30 cm Akibat MAT Plat Beton

| No | Beban (kN/m) | Sn (Gaya Total Yang Bekerja) (kN/m) | Su (Gaya Angkat) (kN/m) | FK (Sn/Su) | Syarat FK |
|----|--------------|-------------------------------------|-------------------------|------------|-----------|
| 1 | 0 | 24,60351 | 20,5029 | 1,2 | 1,2 |
| 2 | 5 | 24,62811 | 20,52342 | 1,2 | |
| 3 | 10 | 24,62894 | 20,52412 | 1,2 | |
| 4 | 15 | 24,62909 | 20,52424 | 1,2 | |
| 5 | 20 | 24,62999 | 20,52499 | 1,2 | |

Sumber : Hasil Penelitian

Diperoleh nilai Faktor Keamanan 1,2 pada masing- masing beban 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN pada tebal mortar busa 30 cm yang disebabkan oleh gaya angkat air. hal ini dianggap aman sesuai dengan persyaratan Faktor kermanan = 1,2. (Lastiasih & Mochtar, 2022a).

- c. Mortar busa tebal 40 cm tinggi MAT 105 cm (MAT Plat beton) (Beban 5 kN)

Tebal mortar busa: 40 cm = 0,4 m

Panjang mortar busa : 180 cm = 1,8 m

Massa jenis air : 9,81 kN/m³

Ketinggian air : 105 cm = 1,05 m

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

$$F_k = \frac{S_n}{S_u}$$

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

$W_{mortar\ busa}$: Berat mortar busa = p x l x h x $\gamma_{mortar\ busa}$

$$= 1,80\text{ m} \times 0,4 \times 0,4\text{ m} \times 0,8\text{ kN/m}^3$$

$$= 0,2304 \text{ kN/m}$$

$$S_{\text{total}} : \text{Penurunan total} = 0,888 \times 10^{-3} \text{ m}$$

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

$$\begin{aligned} W_{\text{air}} : \text{Berat air} &= \frac{1}{2} (h + S_{\text{total}}) \left(\frac{sh}{sv} \right) (h + S_{\text{total}}) \times \gamma_{\text{air}} \\ &= \frac{1}{2} (1,05 + 0,888 \times 10^{-3}) (1/1)(1,05 + 0,888 \times 10^{-3}) \times 9,81 \\ &= 0,525444 \times 1,050888 \times 9,81 \\ &= 5,41691 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

O_{REQ} : Beban tambahan yang diperlukan struktur timbunan mortar busa agar memenuhi faktor aman.

$$\begin{aligned} O_{\text{REQ}} &= [1,2 (\gamma_w \times (h + S_{\text{total}}) \times B_w)] - [(W_{\text{mortar busa}} + W_{\text{air}} + W'_{\text{air}})] \\ &= [1,2 (9,81 \text{ kN/m}^3 \times (1,05 \text{ m} + 0,888 \times 10^{-3} \text{ m}) \times 2,2 \text{ m})] - [(0,2304 \text{ kN/m} \\ &\quad + 5,41691 \text{ kN/m} + 5,41691 \text{ kN})] \\ &= 27,21632 \text{ kN/m} - 11,06422 \text{ kN/m} \\ &= 16,1521 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Tekanan air menimbulkan gaya angkat pada dasar timbunan sebesar :

$$\begin{aligned} S_u &= \gamma_w \times B_w \times (h' + S_{\text{total}}) \\ &= 9,81 \text{ kN/m}^3 \times 2,2 \text{ m} \times (1,05 \text{ m} + 0,888 \times 10^{-3} \text{ m}) \\ &= 22,68026 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_n &= \text{Total gaya normal yang bekerja} \\ &= W_{\text{mortar busa}} + W_{\text{air}} + W'_{\text{air}} + O_{\text{REQ}} \\ &= 0,2304 \text{ kN/m} + 5,41691 \text{ kN/m} + 5,41691 \text{ kN/m} + 16,1521 \text{ kN/m} \\ &= 27,21632 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} F_k &= \frac{S_n}{S_u} \\ &= \frac{27,21632}{22,68026} = 1,2 \end{aligned}$$

Dengan hasil faktor keamanan pada beban 5 kN di atas, untuk beban selanjutnya akan disajikan dalam Tabel 5.11 dibawah ini :

Tabel 5.11: Faktor Keamanan Mortar Busa 40 cm Akibat MAT Plat Beton

| No | Beban (kN/m) | Sn (Gaya Total Yang Bekerja) (kN/m) | Su (Gaya Angkat) (kN/m) | FK (Sn/Su) | Syarat FK |
|----|--------------|-------------------------------------|-------------------------|------------|-----------|
| 1 | 0 | 27,19332 | 22,6611 | 1,2 | 1,2 |
| 2 | 5 | 27,21632 | 22,68026 | 1,2 | |
| 3 | 10 | 27,21668 | 22,68074 | 1,2 | |
| 4 | 15 | 27,21803 | 22,68169 | 1,2 | |
| 5 | 20 | 27,21896 | 22,68237 | 1,2 | |

Sumber : Hasil Penelitian

Diperoleh nilai Faktor Keamanan 1,2 pada masing-masing beban 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN pada tebal mortar busa 30 cm yang disebabkan oleh gaya angkat air. Hal ini dianggap aman sesuai dengan persyaratan Faktor keamanan = 1,2. (Lastiasih & Mochtar, 2022a).

Hasil Faktor Keamanan (FK) akibat gaya angkat (*Hydrostatic Uplift*) dengan muka air tanah pada Plat beton disajikan pada Tabel 5.12 berikut :

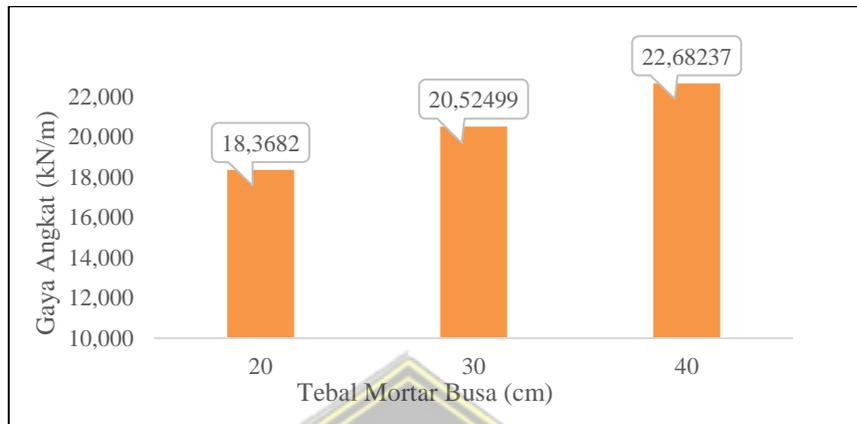
Tabel 5.12: Hasil Nilai Faktor Aman Timbunan Mortar Busa Akibat Gaya Angkat dengan Muka Air Tanah pada Plat Beton

| No | Tebal Mortar Busa (cm) | Sn (Gaya Total yang Bekerja) (kN/m) | Su (Gaya Angkat) (kN/m) | FK (Sn/Su) |
|----|------------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------|
| 1 | 20 | 22,0418 | 18,36820 | 1,2 |
| 2 | 30 | 24,62999 | 20,52499 | 1,2 |
| 3 | 40 | 27,21896 | 22,68237 | 1,2 |

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan Tabel 5.12 di atas untuk Faktor Keamanan (FK) akibat gaya angkat dengan muka air tanah pada *subgrade*, untuk semua variasi tebal mortar busa yang digunakan memenuhi Faktor Keamanan (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 et al., 2004).

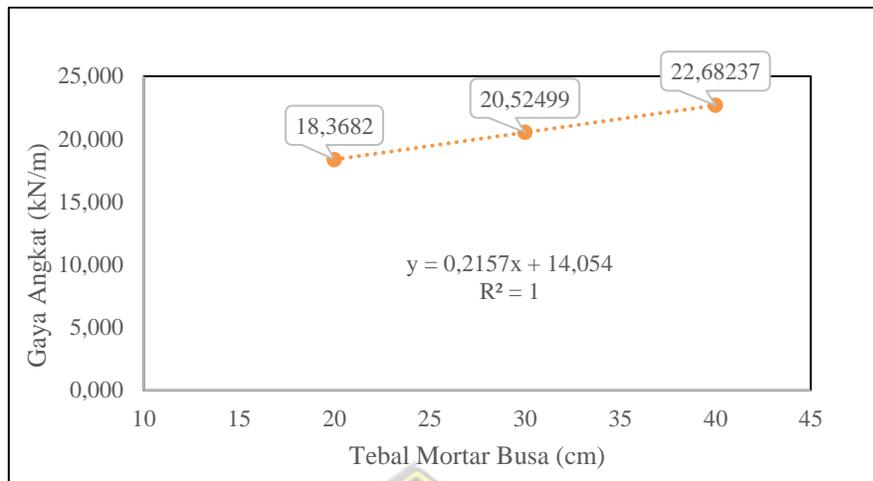
Hubungan gaya angkat dengan tebal mortar busa pada kondisi Muka Air Tanah pada Plat beton disajikan pada Gambar 5.31 berikut :



Gambar 5.31: Nilai Gaya Angkat Akibat Tebal Mortar Busa Kondisi MAT di Plat Beton

Sumber : Hasil Penelitian

Dari Gambar 5.31 di atas dapat dilihat terjadi kenaikan gaya angkat pada mortar busa terjadi seiring dengan peningkatan ketebalan mortar. Ketebalan yang lebih besar ditambah dengan tingginya MAT menambah nilai gaya angkat, menunjukkan adanya pengaruh muka air tanah dapat meningkatkan daya dukung *subgrade*. Mortar busa dengan ketebalan 40 cm memiliki volume yang lebih besar daripada yang 30 cm dan 20 cm, sehingga total gaya ke bawah menjadi lebih besar daripada gaya ke atas akibat beban hidrostatis. Berdasarkan data gaya angkat yang diperoleh selanjutnya dapat dibuat grafik pengaruh tebal mortar busa terhadap gaya angkat akibat Muka Air Tanah pada Plat beton disajikan Gambar 5.32 berikut :



Gambar 5.32: Pengaruh Tebal Mortar Busa terhadap Gaya Angkat Kondisi MAT pada Plat Beton

Sumber : Hasil Penelitian

Kurva pada Gambar 5.32 merupakan regresi linier dengan tiga data utama hasil analisis rumus tekanan hidrostatis menggunakan mortar busa. Berdasarkan *trend* grafik tersebut dapat dirumuskan bahwa pengaruh tebal mortar busa terhadap gaya angkat dapat ditulis dengan Persamaan berikut :

$$\begin{aligned}
 y &= 0,2157x + 14,054 \\
 Su &= 0,2157h_{mortar\ busa} + 14,054
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

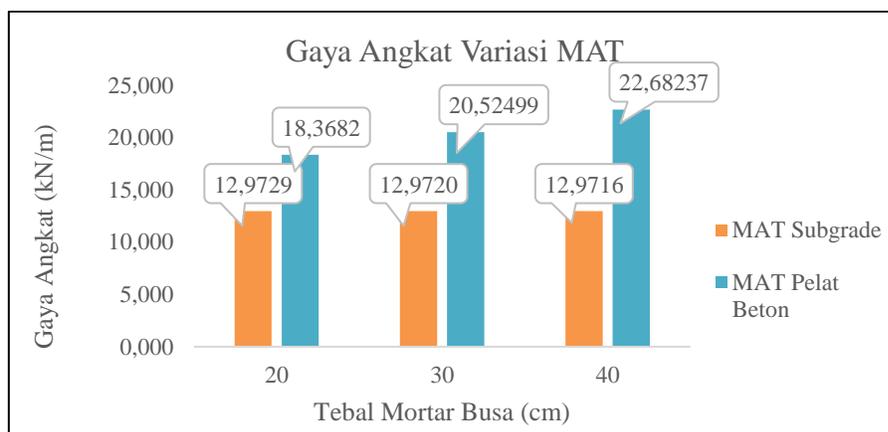
Dimana :

Su : Gaya angkat (kN/m)

$h_{mortar\ busa}$: Tebal mortar busa (cm)

Tingkat akurasi regresi linear berdasarkan koefisien determinasi $R^2 = 1$, berdasarkan Tabel 2.18 nilainya $> 0,75$ maka akurasi model regresi kategori sangat baik.

Nilai gaya angkat akibat level Muka Air Tanah (MAT) dan variasi tebal mortar busa disajikan pada Gambar 5.33 berikut :



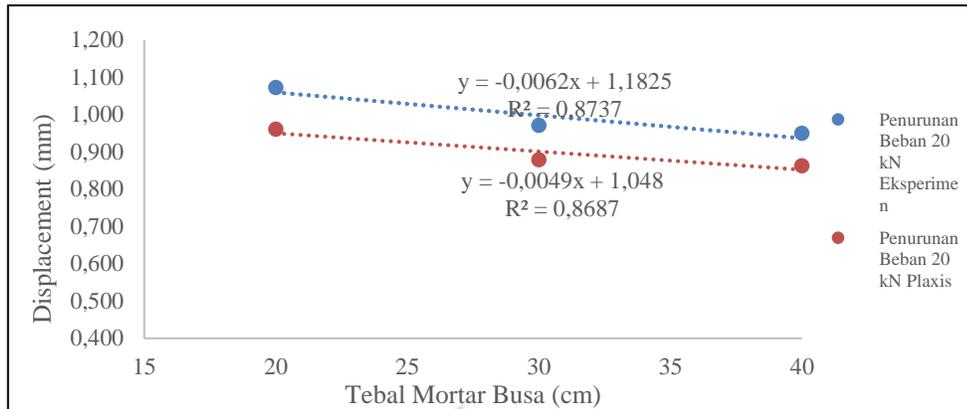
Gambar 5.33: Nilai Gaya Angkat Akibat Level MAT Terhadap Tebal Mortar Busa

Sumber : Hasil Penelitian

Ketinggian level Muka Air Tanah (MAT) memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai gaya angkat yang dihasilkan. Ketika level MAT meningkat, gaya angkat yang dihasilkan juga cenderung meningkat. Penggunaan mortar busa sebagai material timbunan di atas tanah lunak yang terendam air akan menghasilkan tekanan hidrostatis. Mortar busa memiliki berat jenis yang sangat ringan, sehingga tekanan hidrostatis yang dihadapi oleh material tersebut, ketika terendam, dapat melawan berat struktur dan beban yang ada, menciptakan kondisi apung yang stabil. Ketebalan mortar busa yang ditambahkan sebagai timbunan di atas tanah lunak dapat meningkatkan daya dukung dari konstruksi apung yang berada di permukaan air. Hal ini terjadi karena mortar busa mampu menahan tekanan air vertikal dan horizontal dengan lebih efektif. Dengan demikian, penggunaan mortar busa dalam kondisi terendam air dapat memberikan stabilitas tambahan pada struktur apung yang dibangun di atas tanah lunak. (Hendriksen, 2011).

5.4. Perbandingan Penurunan Tanah dengan Timbunan Mortar Busa Pengujian Eksperimen di Laboratorium dan Numerik *Plaxis 2D*

Pengujian yang menunjukkan bahwa semakin tebal mortar busa diterapkan sebagai timbunan di tanah lunak, penurunan yang terjadi akan semakin berkurang. Penurunan maksimum terjadi pada semua variasi ketebalan tanah lunak, yaitu pada beban 20 kN. Kondisi ini dapat dilihat pada Gambar 5.34 berikut.



Gambar 5.34: Pengaruh Variasi Tebal Mortar Busa Tanpa MAT terhadap Penurunan Timbunan Akibat Beban 20 kN (Hasil Eksperimen di Laboratorium dan Numerik *Plaxis 2D*)

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil pengujian eksperimen dan validasi numerik menggunakan aplikasi *Plaxis 2D* pada timbunan mortar busa tanpa Muka Air Tanah (MAT), dengan beban maksimum sebesar 20 kN, ditemukan bahwa terdapat hubungan antara ketebalan mortar busa dan penurunan tanah akibat beban tersebut. Dari *trend* grafik yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa pengaruh ketebalan mortar busa terhadap penurunan tanah akibat beban maksimum 20 kN tanpa MAT dapat dirumuskan dengan persamaan berikut :

$$y = -0,0062x + 1,1825$$

$$S = -0,00062 \cdot h_{mortar\ busa} + 1,1825 \quad (5.3)$$

Dimana : $y = S$ = Penurunan tanah
 $x = h_{mortar\ busa}$ = Tebal mortar busa

Trend grafik di atas dapat dirumuskan pengaruh tebal mortar busa terhadap penurunan tanah akibat beban maksimum 20 kN tanpa MAT hasil analisis numerik *Plaxis 2D*, dapat ditulis dengan persamaan berikut:

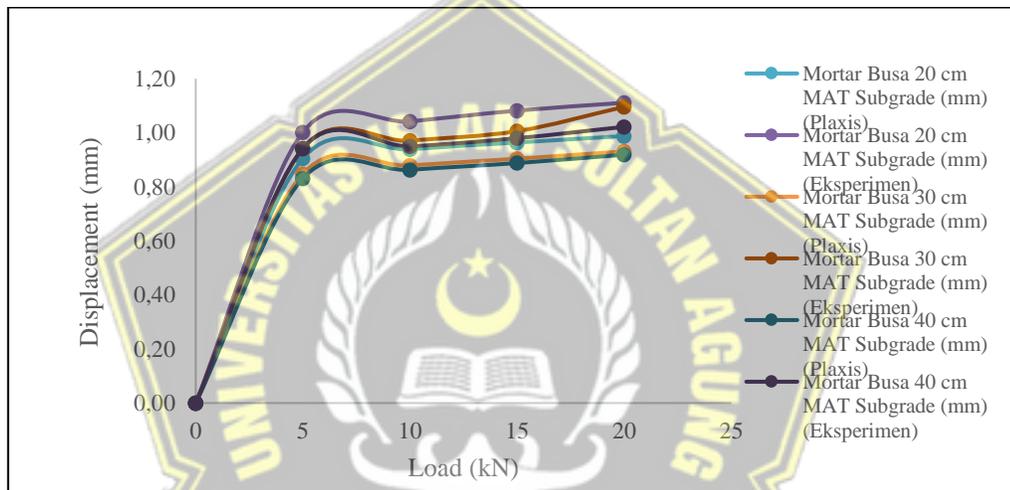
$$y = -0,0049x + 1,048$$

$$S = -0,0049 \cdot h_{mortar\ busa} + 1,048 \quad (5.4)$$

Dimana : $y = S$ = penurunan tanah
 $x = h_{mortar\ busa}$ = tebal mortar busa

Tingkat akurasi regresi linear berdasarkan nilai determinasi $R^2 = 0,8687$, berdasarkan Tabel 2.18 nilainya $> 0,75$ sehingga akurasi model regresi kategori sangat baik.

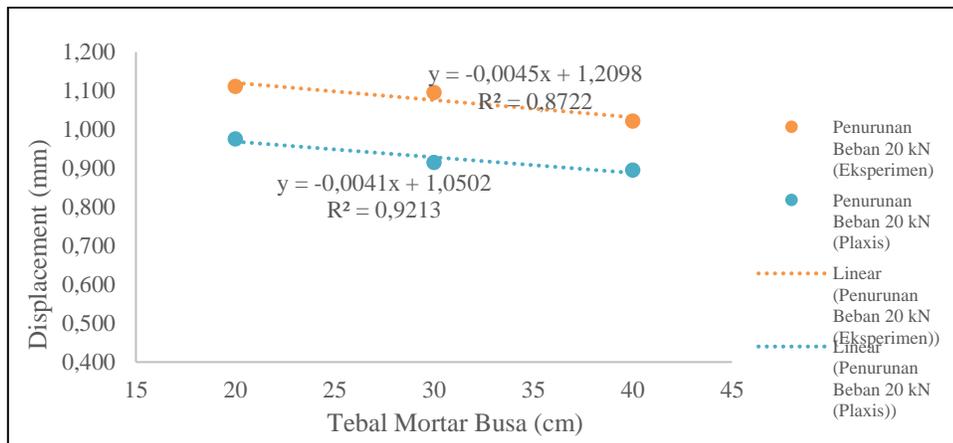
Nilai penurunan timbunan dengan mortar busa MAT pada *subgrade* dan numerik *Plaxis 2D* seperti yang disajikan Gambar 5.35 berikut :



Gambar 5.35: Hasil Penurunan Timbunan dengan Mortar Busa MAT pada *Subgrade* (Hasil Eksperimen di Laboratorium dan Numerik *Plaxis 2D*)

Sumber : Hasil Penelitian

Kondisi ini menampilkan semakin tebal mortar busa dengan MAT pada *subgrade* yang digunakan sebagai timbunan pada tanah lunak, penurunan yang terjadi akan semakin kecil. Penurunan maksimum terjadi pada semua variasi tebal mortar busa yaitu pada beban 20 kN. Kondisi ini disajikan pada Gambar 5.36 berikut :



Gambar 5.36: Pengaruh Variasi Tebal Mortar Busa MAT *Subgrade* terhadap Penurunan Timbunan Akibat Beban 20 kN (Hasil Eksperimen di Laboratorium dan Numerik *Plaxis* 2D)

Sumber : Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil pengujian eksperimen dan validasi numerik menggunakan aplikasi *Plaxis* 2D pada timbunan yang menggunakan mortar busa di Muka Air Tanah (MAT) pada *subgrade*, dengan beban maksimum sebesar 20 kN, dapat disimpulkan bahwa terdapat hubungan antara ketebalan mortar busa dan penurunan tanah yang terjadi akibat beban tersebut. Dari analisis grafik yang diperoleh, dapat dirumuskan pengaruh ketebalan mortar busa terhadap penurunan tanah akibat beban maksimum 20 kN pada MAT di *subgrade*, yang dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut :

$$y = -0,0045x + 1,2098$$

$$S = -0,0045 \cdot h_{\text{mortar busa}} + 1,2098 \quad (5.5)$$

Dimana : $y = S$ = Penurunan tanah
 $x = h_{\text{mortar busa}}$ = Tebal mortar busa

Tingkat akurasi regresi linear berdasarkan nilai determinasi $R^2 = 0,8722$ berdasarkan Tabel 2.18 nilainya $> 0,75$ akurasi model regresi kategori sangat baik.

Trend grafik di atas dapat dirumuskan pengaruh tebal mortar busa terhadap penurunan tanah akibat beban maksimum 20 kN MAT *subgrade* hasil analisis numerik *Plaxis* 2D, dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$y = -0,0041x + 1,0502$$

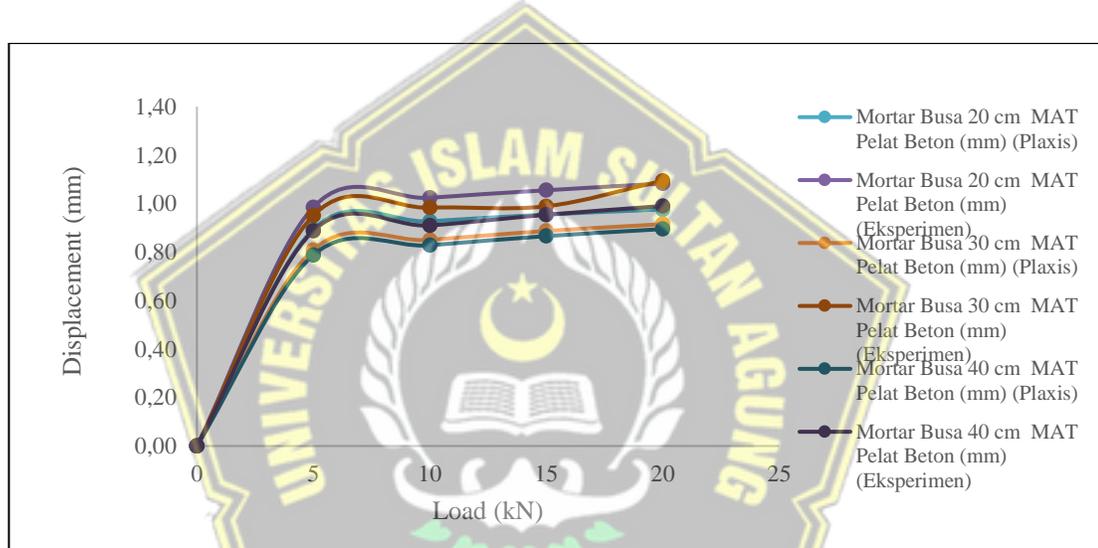
$$S = -0,0041 \cdot h_{mortar\ busa} + 1,0502 \quad (5.6)$$

Dimana : $y = S$ = penurunan tanah

$x = h_{mortar\ busa}$ = tebal mortar busa

Tingkat akurasi regresi linear berdasarkan nilai determinasi $R^2 = 0,9213$, berdasarkan Tabel 2.18 nilainya $> 0,75$ sehingga akurasi model regresi kategori sangat baik.

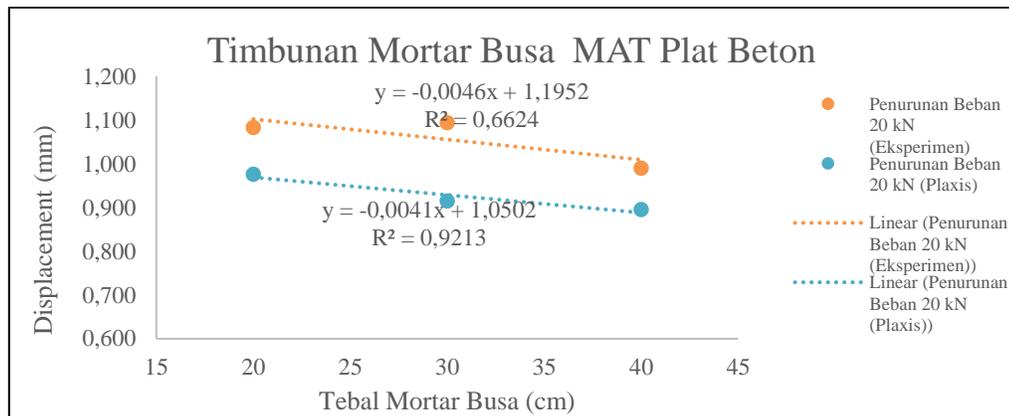
Nilai penurunan timbunan dengan mortar busa mortar busa MAT pada Plat beton dan numerik *Plaxis 2D* seperti yang disajikan Gambar berikut :



Gambar 5.37: Hasil Penurunan Timbunan dengan Mortar Busa MAT pada Plat Beton (Hasil Eksperimen di Laboratorium dan Numerik *Plaxis 2D*)

Sumber : Hasil Penelitian

Kondisi ini menampilkan semakin tebal mortar busa dengan MAT pada Plat beton yang digunakan sebagai timbunan pada tanah lunak, penurunan yang terjadi akan semakin kecil. Penurunan maksimum terjadi pada semua variasi tebal mortar busa yaitu pada beban 20 kN. Kondisi ini disajikan pada Gambar berikut :



Gambar 5.38: Pengaruh Variasi Tebal Mortar Busa MAT Plat Beton terhadap Penurunan Timbunan Akibat Beban 20 kN (Hasil Eksperimen di Laboratorium dan Numerik *Plaxis* 2D)

Sumber : Hasil Penelitian

Pengujian eksperimen dan validasi numerik menggunakan aplikasi *Plaxis* 2D pada timbunan dengan mortar busa Muka Air Tanah (MAT) pada Plat beton menunjukkan bahwa pada beban maksimum 20 kN, terdapat hubungan yang signifikan antara ketebalan mortar busa dan penurunan tanah. Berdasarkan *trend* grafik yang diperoleh, dapat dirumuskan pengaruh ketebalan mortar busa terhadap penurunan tanah akibat beban maksimum 20 kN MAT pada Plat beton, yang dapat dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$y = -0,0046x + 1,1952$$

$$S = -0,0046 \cdot h_{mortar\ busa} + 1,1952 \quad (5.7)$$

Dimana : $y = S$ = Penurunan tanah

$x = h_{mortar\ busa}$ = Tebal mortar busa

Tingkat akurasi *regresi linear* berdasarkan nilai determinasi $R^2 = 0,6624$, berdasarkan Tabel 2.18 nilainya 0.56 – 0.75 akurasi model regresi kategori baik.

Trend grafik di atas dapat dirumuskan pengaruh tebal mortar busa terhadap penurunan tanah akibat beban maksimum 20 kN MAT Plat beton hasil analisis numerik *Plaxis* 2D, dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$y = -0,0041x + 1,0502$$

$$S = -0,0041 \cdot h_{mortal\ busa} + 1,0502 \quad (5.8)$$

Dimana : $y = S$ = Penurunan tanah
 $x = h_{mortal\ busa}$ = Tebal mortar busa

Tingkat akurasi regresi linear berdasarkan nilai determinasi $R^2 = 0,9213$, menurut Tabel 2.18 nilainya $> 0,75$ sehingga akurasi model regresi kategori sangat baik.

Berdasarkan analisis penurunan hasil eksperimen di laboratorium dan simulasi numerik menggunakan *Plaxis 2D*, ditemukan bahwa pada kondisi tanpa adanya muka air tanah, semakin tebal mortar busa yang diterapkan, maka penurunan tanah yang terjadi akan semakin kecil. Sebaliknya, pada kondisi di mana terdapat muka air tanah, penurunan yang terjadi akan semakin besar seiring dengan meningkatnya level muka air tanah. Hasil penurunan yang diperoleh dari semua kondisi percobaan tetap memenuhi batas toleransi penurunan timbunan tanah sesuai dengan kriteria yang ditetapkan oleh Pusat Litbang Transportasi (2001), yaitu kurang dari 20 mm untuk jalan kelas I, sebagaimana tercantum dalam Tabel 2.15.

5.5. Daya Dukung Tanah Dasar dengan Timbunan Mortar Busa

Keruntuhan daya dukung terjadi ketika beban yang diterapkan pada tanah dasar melebihi kapasitas dukung yang dimiliki oleh tanah tersebut, yang berhubungan dengan kekuatan geser tanah dasar. Untuk menghitung kapasitas dukung tanah, dapat digunakan teori daya dukung yang dikemukakan oleh Terzhagi, sebagai berikut :

$$q_u = Su \cdot N_c + \gamma b \cdot D_f$$

Perhitungan daya dukung tanah dasar dengan timbunan mortar busa berdasarkan variasi tebal mortar busa :

1. Mortar busa tebal 20 cm (Tanpa MAT)

S_u : 20,59 kN/m²

Φ : 6,331

γb : 17,84

D_f : 0,6 m (kedalaman timbunan)

Nc : Diperoleh dari interpolasi data pada Tabel 2.25

Nc : φ (X1) : 6 Nc (Y1) : 6,81

φ (X2) : 7 Nc (Y2) : 7,16

φ (X) : 6,331 Nc : Y

Rumus interpolasi :

$$Y = Y1 + \left[\frac{(X-X1)}{(X2-X1)} \right] (Y2 - Y1)$$

$$Y = 6,81 + \left[\frac{(6,331-6)}{(7-6)} \right] (7,16 - 6,81)$$

$$Y = 6,81 + 0,631 \cdot 0,35$$

$$Y = 7,03$$

Sehingga nilai Nc diperoleh sebesar 7,03.

$$\begin{aligned} q_u &= S_u \cdot N_c + \gamma_b \cdot D_f \\ q_u &= 20,59 \times 7,03 + 17,84 \times 0,6 \\ &= 155,45 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Untuk mendapatkan nilai Faktor Keamanan (FK) maka :

$$FK = \frac{q_u}{q_a}$$

$q_a = S_n =$ tegangan normal yang diberikan timbunan pada permukaan tanah pada kedalaman 0 yang mampu dipikul oleh tanah.

Tanah dasar pada eksperimen ini memikul mortar busa dan Plat beton, sehingga:

$$\begin{aligned} S_n \text{ mortar busa} &= \gamma \text{ mortar busa} \times T \text{ mortar busa} \\ &= 0,8 \text{ kN/m}^3 \times 0,2 \text{ m} \\ &= 0,16 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_n \text{ Plat beton} &= \gamma \text{ Plat beton} \times T \text{ Plat beton} \\ &= 24 \text{ kN/m}^3 \times 0,1 \text{ m} \\ &= 2,4 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Analisis tegangan yang terjadi dalam massa tanah (S_n) akibat beban titik (P) di permukaan berdasarkan teori Boussinesq (1885) maka dapat ditentukan :

$$\Delta \sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_B$$

Q = Beban yang diberikan (0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN, 20 kN)

$$Z = \text{kedalaman yang ditinjau (permukaan tanah dasar)} : 0,3 \text{ m}$$

$$I_B = \text{Faktor pengaruh untuk beban titik (berdasarkan Gambar 2.15)}$$

$$= 0,48$$

Tegangan pada tanah yang terjadi akibat beban 5 kN adalah :

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_B$$

$$= \frac{5 \text{ kN}}{(0,3 \text{ m})^2} 0,48$$

$$= 26,67 \text{ kN/m}^2$$

Tegangan total yang terjadi di atas tanah dasar akibat timbunan mortar busa tebal 20 cm dengan beban 5 kN :

$$q_a = S_n = S_n \text{ mortar busa} + S_n \text{ Plat beton} + S_n \text{ beban titik}$$

$$= 0,16 \text{ kN/m}^2 + 2,4 \text{ kN/m}^2 + 26,67 \text{ kN/m}^2$$

$$= 29,23 \text{ kN/m}^2$$

Sehingga Faktor Keamanan (FK) timbunan mortar busa tebal 20 cm tanpa MAT pada beban 5 kN adalah

$$FK = \frac{qu}{q_a} > 1,4$$

$$FK = \frac{155,45 \text{ kN/m}^2}{29,23 \text{ kN/m}^2}$$

$$= 5,3182 > 1,4$$

Untuk hasil perhitungan beban selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 5.13 berikut:

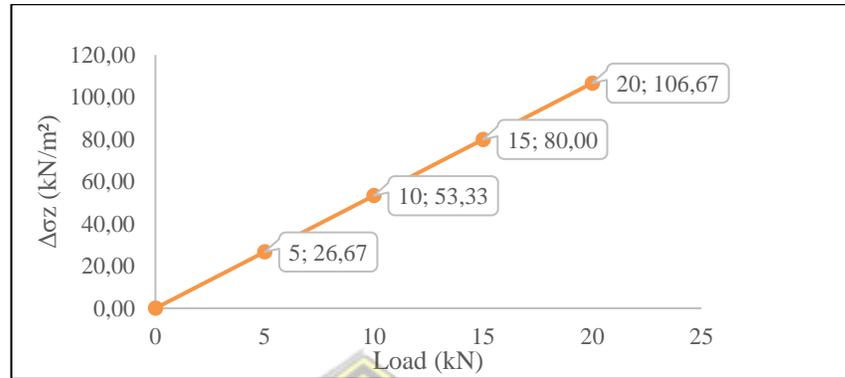
Tabel 5.13: Tegangan Akibat Beban Titik ($z = 0,3 \text{ m}$)

| 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 | 26,67 | 29,23 | 5,32 |
| 10 | 0 | 0 | 0,44 | 53,33 | 55,89 | 2,78 |
| 15 | 0 | 0 | 0,44 | 80,00 | 82,56 | 1,88 |
| 20 | 0 | 0 | 0,44 | 106,67 | 109,23 | 1,42 |

Sumber : Hasil Penelitian

Faktor aman yang terjadi pada beban maksimum 20 kN sebesar 1,42, nilai yang diperoleh besar dari Faktor Keamanan (FK) yang disyaratkan yaitu 1,2. Gambar 5.39 berikut menampilkan hubungan antara beban yang diberikan dan tegangan

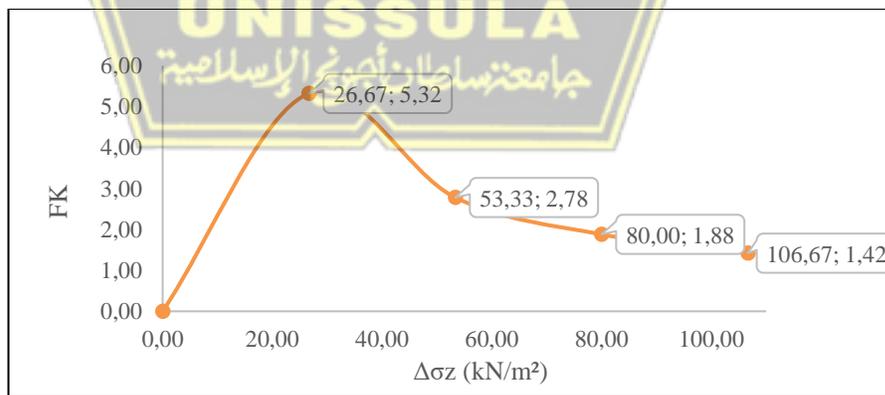
akibat beban titik pada tanah dasar akibat timbunan dengan mortar busa tebal 20 cm :



Gambar 5.39: Tegangan Akibat Beban Titik pada Tanah Dasar Akibat Timbunan Mortar Busa Tebal 20 cm

Sumber : Hasil Penelitian

Tegangan maksimum yang dihasilkan akibat beban maksimum sebesar 20 kN pada timbunan menggunakan mortar busa setebal 20 cm tercatat sebesar 106,67 kN/m². Grafik menunjukkan bahwa peningkatan beban berbanding lurus dengan peningkatan tegangan yang diterima oleh tanah dasar. Daya dukung tanah dasar terkait dengan faktor aman, yang mencerminkan kemampuan tanah dalam menahan beban di atasnya. Hubungan antara tegangan pada tanah dasar dan Faktor Keamanan (FK) akibat timbunan mortar busa ditampilkan dibawah ini :



Gambar 5.40: Hubungan Tegangan pada Tanah Dasar dengan Faktor Keamanan (FK) Akibat Timbunan Mortar Busa Tebal 20 cm

Sumber : Hasil Penelitian

Peningkatan tegangan yang diterima oleh tanah dasar berbanding terbalik dengan nilai Faktor Keamanan (FK). Dalam hal ini, tegangan maksimum akibat timbunan dengan mortar busa setebal 20 cm tercatat sebesar 100,67 kN/m², menghasilkan faktor keamanan 1,42. Nilai FK ini melebihi batas minimum yang disyaratkan, yaitu 1,4 untuk jalan kelas I menurut pedoman Kimpraswil No Pt T-10-2002-B Panduan Geoteknik 4 mengenai timbunan tanah lunak. Dengan demikian, faktor keamanan yang diperoleh masih memenuhi standar yang ditetapkan.

2. Mortar busa tebal 30 cm (Tanpa MAT)

Su : 20,59 kN/m²

Φ : 6,331

γ_b : 17,84

D_f : 0,6 m (kedalaman timbunan)

N_c : Diperoleh dari interpolasi data pada Tabel 2.25

N_c : φ (X₁) : 6 N_c (Y₁) : 6,81

φ (X₂) : 7 N_c (Y₂) : 7,16

φ (X) : 6,331 N_c : Y

Rumus interpolasi :

$$Y = Y_1 + \left[\frac{(X - X_1)}{(X_2 - X_1)} \right] (Y_2 - Y_1)$$

$$Y = 6,81 + \left[\frac{(6,331 - 6)}{(7 - 6)} \right] (7,16 - 6,81)$$

$$Y = 6,81 + 0,631 \cdot 0,35$$

$$Y = 7,03$$

Sehingga nilai N_c diperoleh sebesar 7,03.

q_u = Su.N_c + γ_b.D_f

q_u = 20,59 x 7,03 + 17,84 x 0,6

= 155,45 kN/m²

Untuk mendapatkan nilai Faktor Keamanan (FK) maka :

$$FK = \frac{qu}{qa}$$

$qa = S_n$ = tegangan normal yang diberikan timbunan pada permukaan tanah pada kedalaman 0 yang mampu dipikul oleh tanah.

Tanah dasar pada eksperimen ini memikul mortar busa dan Plat beton, sehingga:

$$\begin{aligned} S_n \text{ mortar busa} &= \gamma \text{ mortar busa} \times T \text{ mortar busa} \\ &= 0,8 \text{ kN/m}^3 \times 0,3 \text{ m} \\ &= 0,24 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_n \text{ Plat beton} &= \gamma \text{ Plat beton} \times T \text{ Plat beton} \\ &= 24 \text{ kN/m}^3 \times 0,1 \text{ m} \\ &= 2,4 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Analisis tegangan yang terjadi dalam massa tanah (S_n) akibat beban titik (P) di permukaan berdasarkan teori Boussinesq (1885) maka dapat ditentukan :

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_B$$

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 2.18) = 0,48

Tegangan pada tanah yang terjadi akibat beban 5 kN adalah :

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_z &= \frac{Q}{z^2} I_B \\ &= \frac{5 \text{ kN}}{(0,4 \text{ m})^2} 0,48 \\ &= 15 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Tegangan total yang terjadi di atas tanah dasar akibat timbunan mortar busa tebal 20 cm beban 5 kN adalah :

$$\begin{aligned} qa = S_n &= S_n \text{ mortar busa} + S_n \text{ Plat beton} + S_n \text{ beban titik} \\ &= 0,24 \text{ kN/m}^2 + 2,4 \text{ kN/m}^2 + 15 \text{ kN/m}^2 \\ &= 17,64 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Sehingga Faktor Keamanan (FK) timbunan mortar busa tebal 20 cm beban 5 kN tanpa MAT adalah

$$FK = \frac{qu}{qa} > 1,4$$

$$FK = \frac{155,45 \text{ kN/m}^2}{17,64 \text{ kN/m}^2}$$

$$= 8,8 > 1,4$$

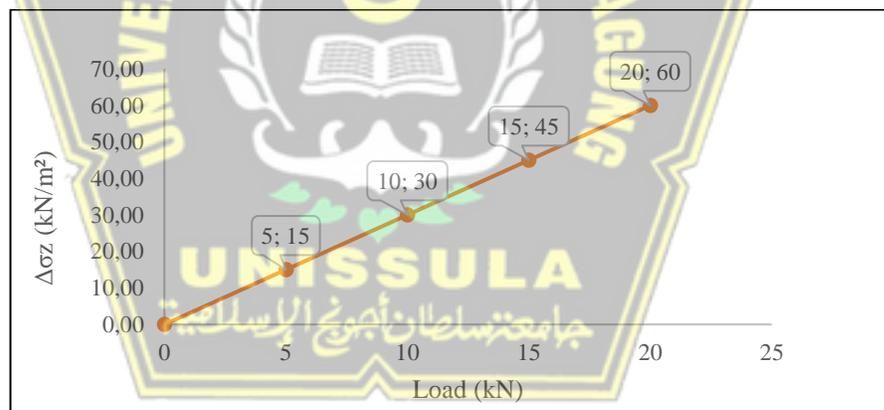
Untuk hasil perhitungan beban selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 5.14 berikut:

Tabel 5.14: 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 | 17,64 | 8,81 |
| 10 | 0 | 0 | 0,44 | 30 | 32,64 | 4,76 |
| 15 | 0 | 0 | 0,44 | 45 | 47,64 | 3,26 |
| 20 | 0 | 0 | 0,44 | 60 | 62,64 | 2,48 |

Sumber : Hasil Penelitian

Faktor aman yang terjadi pada beban maksimum 20 kN sebesar 2,48, nilai yang diperoleh besar dari Faktor Keamanan (FK) yang disyaratkan yaitu 1,4. Gambar 5.41 berikut menampilkan hubungan antara beban yang diberikan dan tegangan akibat beban titik pada tanah dasar akibat timbunan dengan mortar busa tebal 30 cm :

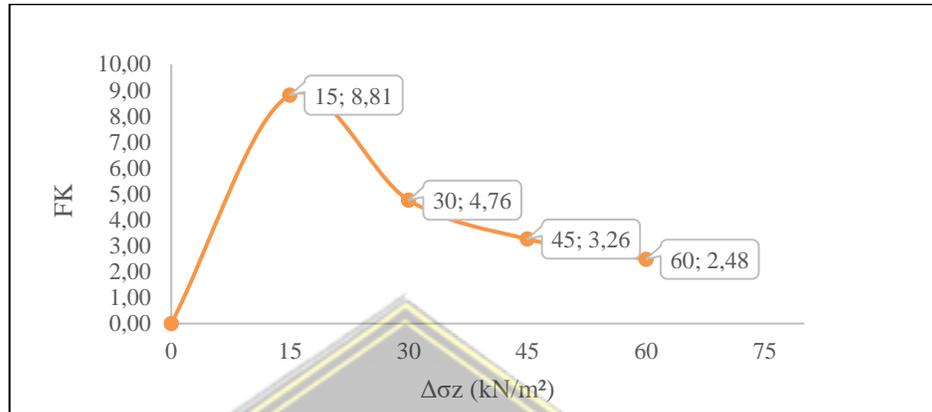


Gambar 5.41: Tegangan Akibat Beban Titik ada Tanah Dasar Akibat Timbunan Mortar Busa Tebal 30 cm

Sumber : Hasil Penelitian

Tegangan maksimum yang dihasilkan akibat beban maksimum sebesar 20 kN pada timbunan menggunakan mortar busa setebal 30 cm tercatat sebesar 60 kN/m². Grafik menunjukkan bahwa peningkatan beban berbanding lurus dengan peningkatan tegangan yang diterima oleh tanah dasar. Daya dukung tanah dasar terkait dengan faktor aman, yang mencerminkan kemampuan tanah dalam

menahan beban di atasnya. Hubungan antara tegangan pada tanah dasar dan faktor aman akibat timbunan mortar busa ditampilkan dalam grafik yang relevan sebagai berikut :



Gambar 5.42: Hubungan Tegangan pada Tanah Dasar dengan Faktor Keamanan (FK) Akibat Timbunan Mortar Busa Tebal 30 cm

Sumber : Hasil Penelitian

Peningkatan tegangan yang diterima oleh tanah dasar berbanding terbalik dengan nilai Faktor Keamanan (FK). Dalam hal ini, tegangan maksimum akibat timbunan dengan mortar busa setebal 30 cm tercatat sebesar 60 kN/m², menghasilkan faktor keamanan 2,48. Nilai FK ini melebihi batas minimum yang disyaratkan, yaitu 1,4 untuk jalan kelas I menurut pedoman Kimpraswil No Pt T-10-2002-B Panduan Geoteknik 4 mengenai timbunan tanah lunak. Dengan demikian, faktor keamanan yang diperoleh masih memenuhi standar yang ditetapkan.

3. Mortar busa tebal 40 cm (Tanpa MAT)

Su : 20,59 kN/m²

Φ : 6,331

γ_b : 17,84

Df : 0,6 m (kedalaman timbunan)

Nc : Diperoleh dari interpolasi data pada Tabel 2.25

Nc : φ (X1) : 6 Nc (Y1) : 6,81

φ (X2) : 7 Nc (Y2) : 7,16

$$\phi(X) : 6,331 \quad N_c : Y$$

Rumus interpolasi :

$$Y = Y_1 + \left[\frac{(X-X_1)}{(X_2-X_1)} \right] (Y_2 - Y_1)$$

$$Y = 6,81 + \left[\frac{(6,331-6)}{(7-6)} \right] (7,16 - 6,81)$$

$$Y = 6,81 + 0,631 \cdot 0,35$$

$$Y = 7,03$$

Sehingga nilai N_c diperoleh sebesar 7,03.

$$q_u = S_u \cdot N_c + \gamma_b \cdot D_f$$

$$\begin{aligned} q_u &= 20,59 \times 7,03 + 17,84 \times 0,6 \\ &= 155,45 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Untuk mendapatkan nilai Faktor Keamanan (FK) maka :

$$FK = \frac{q_u}{q_a}$$

$q_a = S_n$ = tegangan normal yang diberikan timbunan pada permukaan tanah pada kedalaman 0 yang mampu dipikul oleh tanah.

Tanah dasar pada eksperimen ini memikul mortar busa dan Plat beton,

$$\begin{aligned} S_n \text{ mortar busa} &= \gamma \text{ mortar busa} \times T \text{ mortar busa} \\ &= 0,8 \text{ kN/m}^3 \times 0,4 \text{ m} \\ &= 0,32 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_n \text{ Plat beton} &= \gamma \text{ Plat beton} \times T \text{ Plat beton} \\ &= 24 \text{ kN/m}^3 \times 0,1 \text{ m} \\ &= 2,4 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Analisis tegangan yang terjadi dalam massa tanah (S_n) akibat beban titik (P) di permukaan berdasarkan teori Boussinesq (1885) maka dapat ditentukan :

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_B$$

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 2.18)

$$= 0,48$$

Tegangan pada tanah yang terjadi akibat beban 5 kN adalah :

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_z &= \frac{Q}{z^2} I_B \\ &= \frac{5 \text{ kN}}{(0,5 \text{ m})^2} 0,48 \\ &= 9,6 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

Tegangan yang terjadi di atas tanah dasar akibat timbunan mortar busa tebal 20 cm beban 5 kN adalah :

$$\begin{aligned}q_a = S_n &= S_n \text{ mortar busa} + S_n \text{ Plat beton} + S_n \text{ beban titik} \\ &= 0,32 \text{ kN/m}^2 + 2,4 \text{ kN/m}^2 + 9,6 \text{ kN/m}^2 \\ &= 12,32 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

Sehingga Faktor Keamanan (FK) timbunan mortar busa tebal 20 cm beban 5 kN adalah:

$$\begin{aligned}\text{FK} &= \frac{q_u}{q_a} > 1,4 \\ \text{FK} &= \frac{155,45 \text{ kN/m}^2}{12,32 \text{ kN/m}^2} \\ &= 12,62 > 1,4\end{aligned}$$

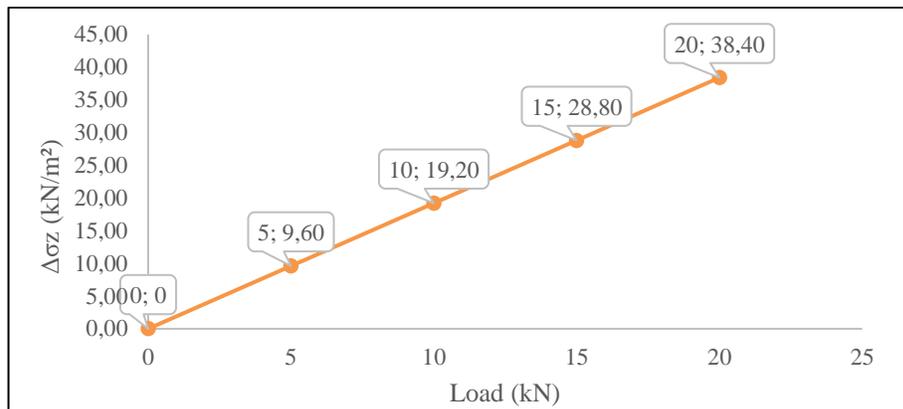
Untuk hasil perhitungan beban selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 5.15 berikut:

Tabel 5.15: Tegangan Akibat Beban Titik ($z = 0,5 \text{ m}$)

| 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 | 9,6 | 12,32 | 12,62 |
| 10 | 0 | 0 | 0,44 | 19,2 | 21,92 | 7,09 |
| 15 | 0 | 0 | 0,44 | 28,8 | 31,52 | 4,93 |
| 20 | 0 | 0 | 0,44 | 38,4 | 41,12 | 3,78 |

Sumber : Hasil Penelitian

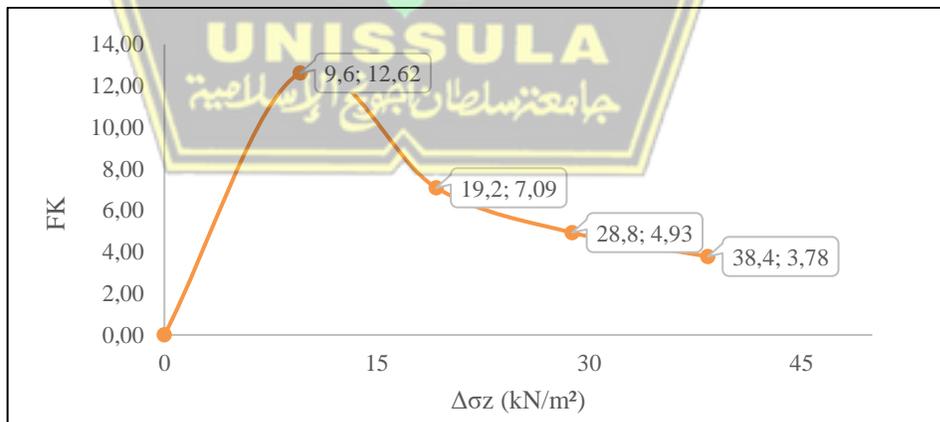
Faktor aman yang terjadi pada beban maksimum 20 kN sebesar 3,78, nilai yang diperoleh besar dari Faktor Keamanan (FK) yang disyaratkan yaitu 1,2. Gambar berikut menampilkan hubungan antara beban yang diberikan dan tegangan akibat beban titik pada tanah dasar akibat timbunan dengan mortar busa tebal 40 cm :



Gambar 5.43: Tegangan Akibat Beban Titik pada Tanah Dasar Akibat Timbunan Mortar Busa Tebal 40 cm

Sumber : Hasil Penelitian

Tegangan maksimum yang dihasilkan akibat beban maksimum sebesar 20 kN pada timbunan menggunakan mortar busa setebal 40 cm tercatat sebesar 38,40 kN/m². Grafik menunjukkan bahwa peningkatan beban berbanding lurus dengan peningkatan tegangan yang diterima oleh tanah dasar. Daya dukung tanah dasar terkait dengan faktor aman, yang mencerminkan kemampuan tanah dalam menahan beban di atasnya. Hubungan antara tegangan pada tanah dasar dan Faktor Keamanan (FK) akibat timbunan mortar busa ditampilkan dalam grafik yang relevan sebagai berikut :



Gambar 5.44: Hubungan Tegangan pada Tanah Dasar dengan Faktor Keamanan (FK) Akibat Timbunan Mortar Busa Tebal 40 cm

Sumber : Hasil Penelitian

Peningkatan tegangan yang diterima oleh tanah dasar berbanding terbalik dengan nilai Faktor Keamanan (FK). Dalam hal ini, tegangan maksimum akibat timbunan dengan mortar busa setebal 40 cm tercatat sebesar 38,4 kN/m², menghasilkan faktor keamanan 3,78. Nilai FK ini melebihi batas minimum yang disyaratkan, yaitu 1,4 untuk jalan kelas I menurut pedoman Kimpraswil No Pt T-10-2002-B Panduan Geoteknik 4 mengenai timbunan tanah lunak. Dengan demikian, faktor keamanan yang diperoleh masih memenuhi standar yang ditetapkan.

Kondisi tanah dasar dengan timbunan dengan mortar busa dipengaruhi oleh variasi ketebalan mortar busa dan variasi beban yang diterapkan, menghasilkan tegangan pada tanah sebagai berikut.

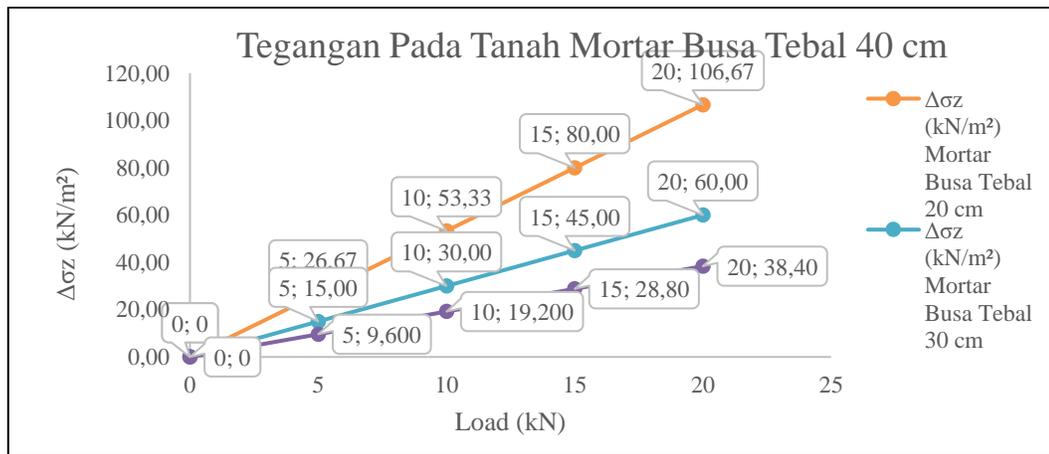
Tabel 5.16: Tegangan pada Tanah Akibat Penambahan Beban dan Variasi Tebal Mortar Busa

| Tebal Mortar Busa (cm) | Tegangan pada tanah ($\Delta\sigma_z$) Akibat Beban | | | | | FK Beban maksimum (20 kN) |
|------------------------|---|-------|-------|-------|--------|---------------------------|
| | 0 kN | 5 kN | 10 kN | 15 kN | 20 kN | |
| 20 | 0 | 26,67 | 53,33 | 80,00 | 106,67 | 1,42 |
| 30 | 0 | 15 | 30 | 45 | 60 | 2,48 |
| 40 | 0 | 9,6 | 19,2 | 28,8 | 38,4 | 3,78 |

Sumber : Hasil Penelitian

Tebal mortar busa mempengaruhi tegangan pada tanah dasar. Tegangan terkecil pada timbunan dengan mortar busa tebal 40 cm pada beban maksimum 20 kN.

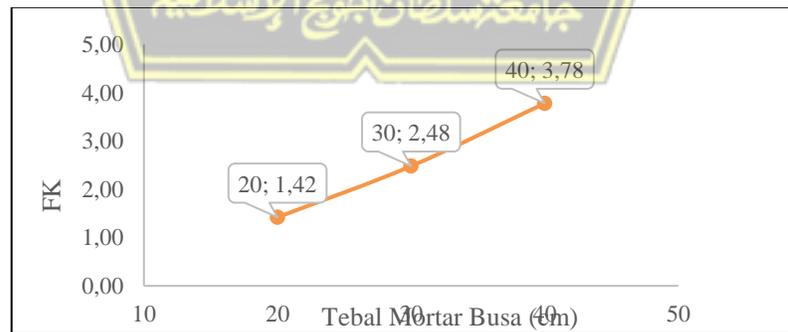
Gambar 5.45 di bawah menampilkan perbandingan tegangan pada tanah akibat beban titik yang diberikan dan variasi tebal mortar busa.



Gambar 5.45: Perbandingan Variasi Tebal Mortar Busa dan Tegangan pada Tanah Dasar

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar 5.45 di atas menunjukkan bahwa peningkatan beban yang diterima oleh tanah dasar akan menyebabkan kenaikan tegangan pada tanah tersebut. Jika beban yang diterima melebihi kemampuan *subgrade* untuk menahan, maka kerusakan pada *subgrade* jalan dapat terjadi. Dalam penelitian ini, ditemukan bahwa semakin tebal mortar busa yang digunakan sebagai timbunan pada tanah lunak dapat mengurangi tegangan yang diterima oleh tanah dasar pada permukaannya. Selanjutnya, hubungan antara Faktor Keamanan (FK) dan variasi ketebalan mortar busa akibat beban maksimum sebesar 20 kN ditunjukkan dalam Gambar 5.46 berikut.



Gambar 5.46 : Perbandingan Variasi Tebal Mortar Busa dan Faktor Keamanan (FK) Akibat Beban Maksimum 20 kN

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar 5.46 di atas menunjukkan bahwa ketebalan mortar busa berpengaruh signifikan terhadap nilai Faktor Keamanan (FK) pada tanah dasar yang menerima beban. Semakin tebal mortar busa yang digunakan sebagai timbunan di atas tanah lunak, semakin tinggi nilai Faktor Keamanan (FK) yang diperoleh. Semua variasi ketebalan mortar busa yang diuji memenuhi standar minimum Faktor Keamanan (FK) untuk jalan kelas I, sesuai dengan pedoman Kimpraswil No Pt T-10-2002-B Panduan Geoteknik 4 tentang Timbunan Tanah Lunak, yaitu lebih dari 1,4.

5.6. Pembahasan Hasil

5.6.1. Pembahasan Hasil Eksperimen Laboratorium

Berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukan di laboratorium dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Penggunaan mortar busa sebagai pengganti timbunan tanah pada tanah lunak menunjukkan bahwa semakin tebal lapisan mortar busa yang digunakan, semakin kecil penurunan tanah yang terjadi. Selain itu, level muka air tanah juga berpengaruh, di mana semakin tinggi muka air tanah, penurunan tanah yang terjadi cenderung semakin kecil. Berdasarkan hasil penelitian, ketebalan subgrade yang direkomendasikan adalah 60 cm dengan ketebalan mortar busa 40 cm, yang menghasilkan nilai penurunan tanah secara numerik hampir sama dengan hasil eksperimen. Mortar busa efektif mengurangi tekanan vertikal pada lapisan tanah karena sifatnya yang ringan, sehingga dapat mengurangi beban yang dipikul oleh tanah dasar dan struktur timbunan. Material ini terdiri dari campuran *foam agent*, pasir, semen, dan air, yang menghasilkan material ringan namun kuat, sehingga mampu mereduksi beban timbunan dan mengurangi penurunan tanah secara signifikan. (Lastiasih & Mochtar, 2022a)
2. Pengaruh ketebalan mortar busa dan tinggi muka air tanah terhadap penurunan tanah menunjukkan bahwa semakin tebal mortar busa yang digunakan dan semakin tinggi muka air tanah, maka penurunan yang terjadi akan semakin kecil. Ini disebabkan oleh massa mortar busa yang lebih ringan dibandingkan dengan air, sehingga saat mortar busa ditekan, air memberikan gaya perlawanan ke atas

(*uplift*). Dari penelitian ini, diperoleh beberapa persamaan untuk penurunan tanah (S) berdasarkan ketebalan mortar busa ($h_{mortar\ busa}$) pada kondisi berbeda dengan beban maksimum 20 kN:

- Tanpa Muka Air Tanah:
 $S = -0,00062 \cdot h_{mortar\ busa} + 1,1825$
- Dengan Muka Air Tanah pada *Subgrade*:
 $S = -0,0041 \cdot h_{mortar\ busa} + 1,0502$
- Dengan Muka Air Tanah pada Plat Beton:
 $S = -0,0046 \cdot h_{mortar\ busa} + 1,1952$

Tekanan hidrostatik yang dilawan oleh mortar busa saat terendam memberikan stabilitas pada struktur. Ketebalan mortar busa yang digunakan sebagai timbunan di atas tanah lunak dapat meningkatkan daya dukung konstruksi apung terhadap tekanan air baik vertikal maupun horizontal. Penggunaan material ringan seperti mortar busa efektif dalam mengurangi penurunan tanah dibandingkan dengan tanpa timbunan mortar busa.

3. Pengujian timbunan dengan mortar busa tanpa Muka Air Tanah menghasilkan penurunan yang lebih kecil dibandingkan dengan timbunan dengan mortar busa dengan Muka Air Tanah. Timbunan dengan mortar busa tanpa Muka Air Tanah menghasilkan nilai penurunan terkecil pada tebal mortar busa 40 cm. Hal ini karena Tebal mortar busa dapat meminimalisir terjadinya penurunan pada tanah. Timbunan mortar busa dengan Muka Air Tanah menghasilkan penurunan terkecil pada kondisi Muka Air Tanah pada Plat beton. Hal ini terjadi karena massa mortar busa lebih kecil daripada air, sehingga pada saat mortar busa ditekan maka air akan memberikan perlawanan dalam bentuk gaya ke atas (*uplift*). (Lastiasih & Mochtar, 2022a).

5.6.2. Pembahasan Hasil Analisis Numerik *Plaxis 2D*

Analisis yang dilakukan menggunakan perangkat lunak *Plaxis 2023* versi 2D dan juga melalui rumus dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Penggunaan mortar busa sebagai pengganti timbunan di atas tanah lunak menunjukkan hasil yang signifikan dalam mengurangi penurunan tanah. Semakin tebal mortar busa yang diterapkan, semakin kecil penurunan tanah yang terjadi. Selain itu, muka air tanah juga berpengaruh terhadap penurunan; semakin tinggi muka air tanah, semakin kecil penurunan yang akan terjadi. Berdasarkan penelitian, tinggi timbunan yang direkomendasikan adalah 60 cm untuk *subgrade* dan 40 cm untuk mortar busa. Hasil analisis numerik menunjukkan bahwa nilai penurunan mendekati hasil pengujian eksperimen. Mortar busa terbukti efektif sebagai pengganti timbunan karena dapat mengurangi nilai penurunan tanah berdasarkan eksperimen laboratorium. Dengan menggunakan mortar busa, tekanan vertikal pada lapisan tanah berkurang, sehingga mengurangi terjadinya penurunan. (Lastiasih & Mochtar, 2022a)
2. Gaya angkat sangat berpengaruh terhadap tebal mortar busa yang diberikan. Pada eksperimen diperoleh hasil semakin tebal mortar busa yang diberikan maka gaya angkat yang dihasilkan akan semakin kecil. Semakin tinggi Muka Air Tanah maka gaya angkat yang dihasilkan akan semakin besar. Tebal mortar busa 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 mortar busa kondisi Muka Air Tanah pada *subgrade* adalah $S_u = -7E-05h_{mortar\ busa} + 12,974$, dimana S_u = gaya angkat dan $h_{mortar\ busa}$ = tebal mortar busa. Persamaan gaya angkat akibat tebal mortar busa kondisi Muka Air Tanah pada Plat beton adalah $S_u = 0,2157h_{mortar\ busa} + 14,054$, dimana S_u = gaya angkat dan $h_{mortar\ busa}$ = tebal mortar busa.
3. Perhitungan daya dukung tanah dasar dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan metode Terzaghi dan analisis tegangan yang terjadi dalam massa tanah (S_n) akibat beban titik (P) yang diterapkan di permukaan, menggunakan teori Boussinesq (1885). Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai tegangan meningkat seiring dengan bertambahnya beban maksimum yang diberikan, yaitu 20 kN. Semakin besar beban yang diterima oleh tanah dasar, semakin tinggi pula

tegangan yang terjadi, yang dapat menyebabkan kerusakan pada *subgrade* jalan jika beban tersebut melebihi kapasitas dukung *subgrade*. Penelitian ini juga menemukan bahwa peningkatan ketebalan mortar busa yang digunakan untuk timbunan tanah lunak berakibat pada pengurangan tegangan yang diterima oleh tanah dasar di permukaannya.

4. Tebal mortar busa berpengaruh terhadap nilai Faktor Keamanan (FK) pada tanah dasar akibat beban yang diberikan. Semakin tebal mortar busa yang digunakan sebagai timbunan pada tanah lunak, maka Faktor Keamanan (FK) yang diperoleh akan semakin besar. Nilai Faktor Keamanan (FK) yang dihasilkan pada semua variasi tebal mortar busa memenuhi persyaratan Faktor Keamanan (FK) untuk jalan kelas I berdasarkan pedoman Kimpraswil No Pt T-10-2002-B Panduan Geoteknik 4 tentang Timbunan Tanah Lunak $> 1,4$.

5.6.3. Pembahasan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu yang Relevan

Penelitian yang dilakukan jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu adalah sebagai berikut:

1. Penelitian yang dilakukan oleh (Lastiasih & Mochtar, 2022b) pada jalan yang direncanakan dibangun di atas timbunan dengan ketinggian antara 3 hingga 12 meter. Rancangan suatu timbunan jalan yang memenuhi standar faktor keamanan dengan menggunakan material yang ringan untuk meminimalisir terjadinya pemampatan tanah dasar. Ditemukan bahwa kombinasi 75% mortar busa dan 25% kerikil mampu mengurangi penurunan hingga 0,6 kali dan meningkatkan faktor keamanan rata-rata hingga 1,46 kali. Kombinasi ini didapatkan hasil terbaik dengan penurunan konsolidasi (Sc) sebesar 1,24 m dan Faktor Keamanan (SF) sebesar 1,383.
2. Penelitian (Atamini & Moestafa, 2018) tentang penggunaan timbunan ringan menghasilkan nilai penurunan sebesar 3,53 cm dan faktor keamanan (FK) 2,74, sedangkan untuk timbunan pilihan nilai penurunannya sebesar 13,79 cm dengan faktor keamanan (FK) 1,36. Akhirnya dapat disimpulkan bahwa penggunaan

timbunan ringan di atas tanah lunak akan menghasilkan penurunan lebih kecil (<74,40%) dengan faktor keamanan lebih besar (>50,36%) dibandingkan dengan timbunan pilihan.

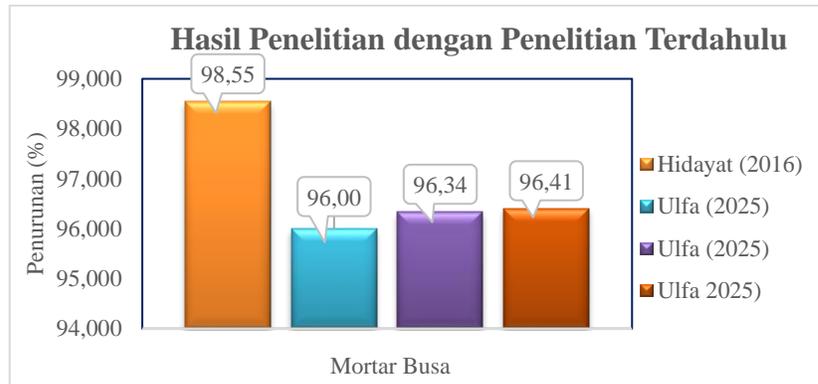
3. Penelitian (Chaiyaput et al., 2023) tentang tanggul ringan skala penuh dengan luas 14 m x 14 m dan tinggi 2,5 m dibangun di atas lapisan lempung lunak setebal 11 m untuk mengamati perilaku penurunan tanggul di atas tanah lempung lunak. Nilai q_u dari material ringan yang diperoleh dari lokasi adalah 1,3-1,8 kali lebih tinggi daripada nilai q_u pada pengujian laboratorium. Campuran dengan berat satuan lapangan basah 0,6, 0,8, dan 1,0 kN/m³ menunjukkan nilai q_u 430-620 dan 770-1000 kPa, masing-masing lebih tinggi daripada persyaratan standar (>100 kPa untuk 7 hari pemeraman dan > 200 kPa untuk 28 hari pemeraman). Berdasarkan data yang dipantau, tanggul ringan mengurangi penurunan sebanyak 80% dibandingkan dengan tanggul konvensional.



Gambar 5.47: Perbandingan Faktor Aman Mortar Busa dengan Penelitian Terdahulu

Sumber : Hasil Penelitian

4. Penelitian (Hidayat et al., 2016) tentang Penggunaan material ringan dengan mortar busa sebagai material pengisi timbunan pada badan jalan yaitu deformasinya lebih rendah jika dibandingkan dengan timbunan konvensional. Penurunan tanah dasar akibat konstruksi timbunan konvensional mengalami penurunan sebesar 6810 mm, sedangkan apabila menggunakan timbunan ringan akibat beban merata 39,9 mm dan timbunan ringan akibat beban terpusat 98,3 mm, seperti pada Gambar 5.48 dibawah ini :

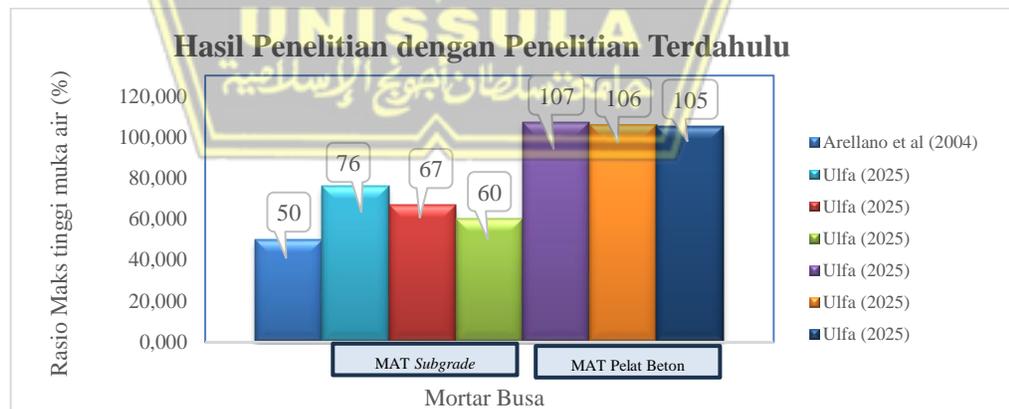


Gambar 5.48: Perbandingan Penurunan Mortar Busa dengan Penelitian Terdahulu

Sumber : Hasil Penelitian

5. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Pertiwi et al., 2025) dengan hasil *boring test* tanah dasar termasuk dalam klasifikasi tanah sangat lunak hingga kedalaman >15 meter. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan mortar busa dapat mengurangi penurunan tanah dasar sebesar 61,2% dengan waktu yang lebih lama sebesar 18,5%. Penurunan dan lendutan lateral terkecil terjadi pada variasi timbunan foam mortar 100% dengan waktu konsolidasi 190 hari. Semakin besar persentase tinggi mortar busa, maka penurunan yang terjadi akan semakin kecil karena faktor keamanannya meningkat.
6. Menurut (Arellano et al., 2010) Ketinggian air terakumulasi merupakan total kedalaman air yang mencakup penurunan total, dinyatakan sebagai $h+S_{total}$. Penelitian menunjukkan bahwa rasio maksimum tinggi muka air terakumulasi terhadap tinggi timbunan adalah 0,5 m, yang berarti kedalaman air dibatasi hingga 50% dari tinggi timbunan. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa mortar busa dengan ketebalan 20 cm pada MAT *subgrade* menghasilkan penurunan sebesar $(1,002+1,042+1,082+1,099) \times 10^{-3}$ atau S total sebesar $4,225 \times 10^{-3}$ m, dengan rasio maksimum tinggi muka air yang terakumulasi terhadap tinggi timbunan sebesar 0,76 m, yang berarti total kedalaman air mencakup penurunan total hingga 76% dari tinggi timbunan. Sementara itu, mortar busa tebal 30 cm menghasilkan penurunan sebesar $(0,942+0,971+1,006+1,036) \times 10^{-3}$ m dan rasio maksimum akumulasi air sebesar 0,67 m, membatasi penurunan hingga 67%. Mortar busa tebal 40 cm menghasilkan penurunan sebesar

$(0,942+0,950+0,980+1,022) \times 10^{-3}$ m dengan rasio maksimum akumulasi air sebesar 0,60 m, yang membatasi penurunan hingga 60% dari tinggi timbunan. Sedangkan MAT di Plat beton akibat beban maksimum menghasilkan penurunan sebesar $(0,985+1,024+1,075+1,089) \times 10^{-3}$ m atau, dengan rasio maksimum tinggi muka air yang terakumulasi terhadap tinggi timbunan sebesar 1,07 m ($(h + Stotal)/H = (0,85 + 0,015960)/0,8 = 1,07$ m), yaitu total kedalaman air yang mencakup perkiraan penurunan total dibatasi hingga 107% dari tinggi timbunan. Mortar busa tebal 30 cm menghasilkan penurunan sebesar $(0,951+0,983+0,989+1,024) \times 10^{-3}$ m dengan rasio maksimum tinggi muka air yang terakumulasi terhadap tinggi timbunan sebesar 1,06 m, yaitu total kedalaman air yang mencakup perkiraan penurunan total dibatasi hingga 106% dari tinggi timbunan. Mortar busa tebal 40 cm menghasilkan penurunan sebesar $(0,888+0,910+0,954+0,990) \times 10^{-3}$ m dengan rasio maksimum tinggi muka air yang terakumulasi terhadap tinggi timbunan sebesar 1,05 m, yaitu total kedalaman air yang mencakup perkiraan penurunan total dibatasi hingga 105%. Penelitian menyimpulkan bahwa rasio maksimal yang direkomendasikan adalah 50% untuk menghindari kebutuhan gaya *overburden* berlebihan, karena akumulasi air yang melebihi batas ini berpotensi menurunkan faktor keamanan struktural timbunan,



Gambar 5.49: Perbandingan Rasio Tinggi Muka Air Timbunan Mortar Busa dengan Penelitian Terdahulu

Sumber : Hasil Penelitian

BAB VI

KESIMPULAN, IMPLEMENTASI DAN REKOMENDASI

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan sebagai bagian dari prosedur penelitian, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Tebal mortar busa yang digunakan sebagai pengganti timbunan pada tanah lunak *subgrade* dengan ketebalan tanah dasar 60 cm dan mortar busa 40 cm mampu menghasilkan penurunan terkecil akibat pembebanan maksimum sebesar 20 kN dalam kondisi kering. Sedangkan pada kondisi muka air tinggi, di mana muka air berada di atas mortar busa pada Plat beton, penurunan yang terjadi dengan tebal mortar busa 40 cm dan beban maksimum 20 kN tetap dapat dikendalikan, menunjukkan efektivitas mortar busa dalam mengurangi penurunan tanah lunak akibat perubahan muka air dan beban yang diberikan.
2. Penggunaan mortar busa sebagai pengganti timbunan pada tanah lunak menunjukkan bahwa semakin tebal lapisan mortar busa yang diterapkan, semakin kecil penurunan tanah yang terjadi akibat beban maksimum 20 kN. Tanpa adanya muka air tanah (MAT), persamaan matematika pada penurunan tanah yang diperoleh adalah $S = -0,00062 \cdot h_{mortar\ busa} + 1,1825$, dimana S = penurunan tanah dan $h_{mortar\ busa}$ = tebal mortar busa. Sebaliknya, keberadaan MAT berpengaruh signifikan terhadap kinerja timbunan; semakin tinggi level MAT, semakin kecil penurunan yang terjadi. Pada kondisi dengan MAT dan beban maksimum yang sama, persamaan penurunan menjadi $S = -0,0041 \cdot h_{mortar\ busa} + 1,0502$ untuk *subgrade*, dan $S = -0,0046 \cdot h_{mortar\ busa} + 1,1952$ untuk Plat beton. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan mortar busa dapat meminimalisir penurunan tanah pada kondisi tanpa MAT serta memberikan stabilitas yang lebih baik saat MAT ada.

3. Gaya angkat pada tanah lunak dengan timbunan mortar busa saat terendam air menghasilkan nilai yang semakin besar dibandingkan pada kondisi kering. Dianggap penggunaan mortar busa sebagai timbunan di atas tanah lunak pada kondisi terendam air menghasilkan tekanan hidrostatis. Persamaan gaya angkat akibat timbunan mortar busa kondisi Muka Air Tanah pada *subgrade* adalah $S_u = -7E-05h_{mortar\ busa} + 12,974$, dimana S_u = gaya angkat dan $h_{mortar\ busa}$ = tebal mortar busa. Persamaan gaya angkat akibat timbunan mortar busa kondisi Muka Air Tanah pada Plat beton adalah $S_u = -1E-04.h_{mortar\ busa} + 3,354$, dimana S_u = gaya angkat dan $h_{mortar\ busa}$ = tebal mortar busa.
4. Faktor aman yang didapat dengan beban maksimum 20 kN masih memenuhi persyaratan yaitu $> 1,4$ pada variasi mortar busa tebal 20 cm, 30 cm, dan 40 cm. Timbunan dengan mortar busa tebal 40 cm menghasilkan Faktor Keamanan (FK) yang paling besar, sehingga dengan menggunakan timbunan mortar busa tebal 40 cm tanah dasar dianggap masih mampu memikul beban yang ada di atasnya. Semakin besar beban yang diterima tanah dasar maka tegangan yang terjadi pada tanah dasar akan semakin besar. Kondisi ini dapat mengakibatkan kerusakan pada *subgrade* jalan apabila beban besar yang diterima tidak mampu dipikul oleh *subgrade*.

6.2 Implementasi

Penelitian dengan timbunan mortar busa ini dapat diimplementasikan sebagai salah satu alternatif penanganan pembangunan konstruksi jalan di atas tanah lunak. Pengerjaannya yang mudah serta beban timbunan yang ringan, merupakan kelebihan dari mortar busa dibandingkan dengan material yang lain.

6.3 Rekomendasi

Rekomendasi pada penelitian ini adalah :

1. Pada penelitian selanjutnya perlu dikaji ketebalan tanah dasar yang lebih bervariasi sehingga hasil yang diperoleh lebih mendekati beberapa ketebalan tanah dasar lunak yang ada diberbagai tempat.

2. Hasil penelitian ini bisa dikembangkan dengan material timbunan ringan lainnya dengan kombinasi material lain seperti *fly ash* sehingga dapat lebih memanfaatkan dan mengurangi limbah lingkungan.
3. Perlu dilakukan pernodelan dengan skala penuh dilapangan agar dapat diketahui kondisi yang sebenarnya terjadi.



BAB VII

DAFTAR PUSTAKA

- Akay, O., Özer, A. T., Fox, G. A., Bartlett, S. F., & Arellano, D. (2013). Behavior of sandy slopes remediated by EPS-block geofoam under seepage flow. *Geotextiles and Geomembranes*, 37, 81–98. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.02.005>
- American Concrete Institute. (1997). ASTM C 33-97. In *Construction Materials: Their Nature and Behaviour: Fourth Edition*. <https://doi.org/10.1201/9781315272436-20>
- American Concrete Institute (ACI) 318. (2019). ACI-8.5.1. In *318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. <https://doi.org/10.14359/51716937>
- Amran, Y., & Surandono, A. (2017). Analisa Daya Dukung Tanah (DDT) pada Sub Grade (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.
- Arellano, D., Tatum, J. B., Stark, T. D., Horvath, J. S., & Leshchinsky, D. (2010). Framework for design guideline for expanded polystyrene block geofoam in slope stabilization and repair. *Transportation Research Record*, 2170, 100–108. <https://doi.org/10.3141/2170-12>
- Atamini, H., & Moestafa, B. (2018). Evaluasi Stabilitas dan Penurunan antara Timbunan Ringan Mortar Busa Dibandingkan dengan Timbunan Pilihan pada Oprit Jembatan (Studi Kasus: Flyover Antapani, Kota Bandung) (Hal. 90-100). *RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil*, 4(1), 90. <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v4i1.90>
- Bowles, J. E. (1984). *Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)* (Kedua). Erlangga.
- Braja M.Das. (2015). *Fundamental of Geotechnical Engineering* (Third Edit). Chris Carson.
- Carvajal, E., & Romana, M. (2013). Analysis of the influence of soft soil depth on the subgrade capacity for flexible pavements. *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics, ICSMGE 2013*, 2, 1249–1253.

- Chaipayut, S., Ayawanna, J., Jongpradist, P., Poorahong, H., Sukkarak, R., & Jamsawang, P. (2023). Application of a cement–clay–air foam mixture as a lightweight embankment material for construction on soft clay. *Case Studies in Construction Materials*, 18(June), e02188. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02188>
- Das, B. M. (1995). Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik. Penerbit Erlangga, 1–300.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2016). SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan. *Badan Standarisasi Nasional*, 1–67.
- Fadilah, R., & Hamdhan, I. N. (2017). Analisis Stabilitas dan Penurunan pada Timbunan Mortar Busa Ringan Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Reka Racana*, 3(2), 59–69. <https://doi.org/10.28926/briliant.v2i1.33>
- Gere, J. M., & Timoshenko, S. P. (1997). Mekanika Bahan. In Erlangga (Jilid 2 Ed). PWS Publishing Company.
- Ghosh, A., & Dey, U. (2009). Bearing ratio of reinforced fly ash overlying soft soil and deformation modulus of fly ash. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(4), 313–320. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.12.002>
- Gultom, J. (2022). Konstruksi Jalan Raya Perancangan dan Pembangunan Jalan Di Atas Tanah Lunak. In T. Afkar (Ed.), *Ruas Media* (1st ed.).
- Gultom, J., Pratikso, & Rochim, A. (2022). Floating road construction on soft soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 955(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/955/1/012016>
- Gultom, J., Royani, E., & W, A. P. (2023a). *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.
- Hardiyatmo, H. C. (2016). *Mekanika Tanah II* (3rd ed.). Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. (2018). *Mekanika Tanah I* (7th ed.). Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. (2023). *Geosintetik untuk Rekayasa Jalan Raya* (Third Edit). Gadjah Mada Unibersity Press.
- Hendriksen, R. (2011). The Floating Construction Method. In *A New Method of Constructing Submerged and Floating Structure* (p. 269). Delft University of Technology.
- Hendry, Rahmawati, R., & Andriani, S. (2021). Stabilisasi Tanah Lempung dengan Campuran Fly Ash (FA) dan Expanded Polystyrene (EPS) sebagai Alternatif Timbunan Ringan pada Lapisan Subgrade. *Potensi : Jurnal Sipil Politeknik*,

23(1), 41–50. <https://doi.org/10.35313/potensi.v23i1.2490>

Hermanto, H. (2019). *Pengaruh Pemakaian Jenis Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Bebas Material Ringan Mortar Busa Sebagai Bahan Pengganti Urugan Pilihan Pada Konstruksi*

Hidayat, D., Muslih, P. Y., & Pungky, P. F. (2016). Analisis Material Ringan Dengan Mortar Busa Pada Konstruksi Timbunan Jalan. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi, October*, 1–10.

Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). An Introduction to Geotechnical Engineering. Civil Engineering and Engineering Mechanics Series. In *Pearson Education Taiwan Ltd.* (p. 733). A Paramount Communication Company, Prentice-Hall, Inc.

Huang, J. jie, Su, Q., Zhao, W. hui, Li, T., & Zhang, X. xi. (2017). Experimental study on use of lightweight foam concrete as subgrade bed filler of ballastless track. *Construction and Building Materials*, 149, 911–920. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.122>

Iqbal, M. (2012). Kajian Penanganan Tanah Lunak Dengan Timbunan Jalan Mortar Busa. In *Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jemabatan, Kementerian PekerjaanUmum. Bandung* (1st ed.). Penerbit Informatika.

Islam, S., Islam, J., & Robiul, N. (2022). Heliyon Improvement of consolidation properties of clay soil using fine-grained construction and demolition waste. *Heliyon*, 8(October), e11029. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11029>

Janbu, N., Bjerrum, L., & Kjaernsli, B. (1956b). Veiledning ved løsning av fundamenteringsoppgaver. In *Norwegian Geotechnical Institute* (Issue 16).

Jiang, Z., Gao, X., Feng, X., & Chen, D. (2022). Research on the Application of Foamed Lightweight Concrete (FLC) in the Construction of Highway Soft Soil Foundation Engineering with Buried High-Pressure Gas Pipes. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(19). <https://doi.org/10.3390/app121910119>

Kadela, M., Kozłowski, M., & Kukielka, A. (2017). Application of Foamed Concrete in Road Pavement - Weak Soil System. *Procedia Engineering*, 193, 439–446. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.235>

Karen S, H., David M, C., & Durell, G. D. (2013). Mixing in an Aggregate/Fine-Grained Soil System Subjected to Cyclic Loading with a Geotextile Separator. *SOUND GEOTECHNICAL RESEARCH TO PRACTICE*, 307–318. <https://doi.org/https://doi.org/10.1061/9780784412770.020>

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.

- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga. (2024). *Manual Desain Perkerasan Jalan*.
- Kementerian PUPR. (2002). Pedoman Kimpraswil No: Pt T-10-2002-B ; Panduan Geoteknik 4 Desain dan Konstruksi. In *Edisi Pertama Bahasa Indonesia*.
- Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan. (2015). Pelaksanaan Timbunan Material Ringan Mortar Busa untuk Konstruksi Jalan. In *Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan rakyat Republik Indonesia*.
- Koerner, R. M. (2005). *Designing with geosynthetics* (S. Eric (ed.); fifth Edit). Pearson Education, Inc.
- 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>
- Kusuma, R. I., Mina, E., & Rahman, T. (2016). Stabilisasi Tanah dengan Menggunakan Fly Ash dan Pengaruhnya terhadap Nilai Kuat Tekan Bebas (Studi Kasus Jalan Raya Bojonegara, Kab. Serang). *Jurnal Fondasi*, 5(1). <https://doi.org/10.36055/jft.v5i1.1251>
- Lastiasih, Y., & Mochtar, I. B. (2022b). Comparison Study of Embankment Filled with Selected Material and Foamed Mortar on Toll Road. *Indonesian Geotechnical Journal*, 1(2), 12–26. [https://doi.org/DOI: https://doi.org/10.56144/igj.v1i2.1](https://doi.org/DOI:https://doi.org/10.56144/igj.v1i2.1)
- Lat, D. C., Jais, I. B. M., Ali, N., Baharom, B., Mohd Yunus, N. Z., & Mat Yusof, D. A. (2019). Uplift and Settlement Prediction Model of Marine Clay Soil e Integrated with Polyurethane Foam. *Open Engineering*, 9(1), 481–489. <https://doi.org/10.1515/eng-2019-0054>
- Lestari, M. I., Manoppo, F. J., & Rondonuwu, S. (2019). Analisis Kestabilan Tanah Timbunan (Embankment) Pada Tanah Rawa Dengan Menggunakan Bambu (Studi Kasus : Jalan Toll Manado-Bitung). *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 8(2), 1078–1091.
- Li, F., Zhang, Z., Chen, X., Chi, Z., Li, J., & Wang, W. (2022). Numerical Research of Lightweight Foam Concrete Replacement Method of Deep Soft Foundation Treatment of Low-Filled Embankment. *Geofluids*, 2022(1). <https://doi.org/10.1155/2022/6006383>
- M.Das, B. (2010). Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis). In *Penerbit Erlangga (Jilid 1)*. Erlangga.
- Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat. (2017). *PERMEN PUPR Nomor 01/PRT/M/2017 Tentang Tata Cara Pelaksanaan Pengadaan Badan Usaha*

Untuk Pengusahaan Jalan Tol (pp. 1–20).

- Nusyura Al Islami, A., & Nizar, F. (2023). The Effect of Using Foam Mortar As an Alternative Backfill Material on Sheet Pile Walls on Slopes. *International Journal of Civil Engineering and Infrastructure*, 1(1), 76–86.
- Pasaribu, O. (2017). *Manual Design Perkerasan Jalan 2017* (Issue Revisi).
- Permana Putuarga, A. R., Mochtar, I. B., & Mandarsyah, D. (2024). Analysis of Road Embankment Improvement on Soft Soil Using Foamed Mortar Lightweight Embankment. *Journal of Infrastructure & Facility Asset Management*, 6(1), 49–64. <https://doi.org/10.12962/jifam.v6i1.19890>
- Pertiwi, N. W., Asih, R., Soemitro, A., & Satrya, T. R. (2025). Behaviour Study of Abutment Foundation Pile on Lightweight Embankment Oprit (Case Study : Kali Otek Bridge – Lamongan North Ring Road Construction Package Section 2). *Journal of Infrastructure and Facility Asset Management*, 7(2), 57–72.
- Puppala, A. J., Ruttanaporamakul, P., & Congress, S. S. C. (2019). Design and construction of lightweight EPS geofom embedded geomaterial embankment system for control of settlements. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(3), 295–305. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.01.015>
- Robbani, E. A., & Ikhyia, I. (2019). Analisis Daya Dukung Fondasi Dangkal Menggunakan Metode Numerik dan Analitik pada Tanah Lempung Lunak yang Diperkuat dengan Granular Trench. (Hal. 41-52). *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 5(4), 41. <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v5i4.41>
- Rochim, A., & Fitriyana, L. (2022). Characterization of Subgrade Soil of Lowland Areas of Semarang City. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 971(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/971/1/012034>
- Rustam, R. K. R. (2018). Studi Sifat Mekanis Tanah Merah dengan Pengujia Triaksial. *Jurnal Forum Mekanika*, 7(1), 29–34.
- Salim, M. A., & Siswanto, A. B. (2021). Analsis Perbandingan Penggunaan Material Ringan Mortar Busa dengan Material Tanah Sirtu pada Pekerjaan Timbunan Jalan. *Jurnal Teknik Sipil*, 14(1), 139–149.
- She, W., Du, Y., Zhao, G., Feng, P., Zhang, Y., & Cao, X. (2018). Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high-speed railway roadbeds. *Construction and Building Materials*, 170, 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.207>
- Sheng, J. L., Yu, D. Y., Zhou, T., & Zheng, Y. S. (2020). Application of Foamed Soil in Widening Project of Limited Expressway Subgrade. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 565(1), 4–9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/565/1/012107>

- 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.
- 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, P. D. (2007). *Statistika Untuk Penelitian*. Alfabeta.
- The British Standard. (2004). Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules. In *BS EN 1997-1* (Vol. 1, Issue 2005). European Committee for Standardization Comite Europeen de Normalisation Europaisches Komitee Fur Normung.
- US Army Engineering and Design. (2003). Slope Stability. Engineer Manual EM1110-2-1902. In *US Army Corps of Engineers* (p. EM 1110-2-1902). Department of the Army, U.S Army Corps of Engineers.
- Wardoyo, Sarwondo, Destiasari, F., Wahyudin, W., Hasibuan, G., & Pradana Sollu, W. (2019). *Atlas Sebaran Batu Lempung Bermasalah Indonesia* (1st ed.). Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Wartoyo, L. A., Lastiasih, Y., Taufik, R., & Ismawanto, I. (2022). Analisis Stabilitas Timbunan Tinggi Pada Mortar Busa Menggunakan Metode Elemen Hingga Pada Proyek Pembangunan Jalan Baru Batas Kota Singaraja - Mengwitani. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 20(1), 79. <https://doi.org/10.12962/j2579-891x.v20i1.11578>
- Wicaksono, S., & Iqbal, M. (2020). Effectiveness Of Foamed Mortar Light Weight Fills As An Approach Bridge Fill On Sheet-Pile Structures. *Jurnal Jalan-Jembatan*, 37(2), 87–101.
- Widodo, B., Pratikso, Rochim, A., Irsyam, M., & Widoanindyawati, V. (2019). Influence of bamboo pile clusters in the pile mattress bamboo construction systems as reinforcement of soft subgrade that support embankment load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 527(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/527/1/012055>
- Zulnasri, A., Nugroho, S. A., & Fatnanta, F. (2021). Perubahan Nilai Kuat Tekan Lempung. *JURNAL REKAYASA SIPIL*, 17(1), 24–36. <https://doi.org/DOI:https://doi.org/10.25077/jrs.17.1.24-36.2021> Attribution-NonCommercial
- Zumrawi, M. M. E., & Mansour, N. (2016). Laboratory Evaluation of Geogrids Used for Stabilizing Soft Subgrades. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 10(3), 418–421.