

**STUDI KOMPARATIF PENGARUH JENIS, SPASI VERTIKAL, DAN PANJANG
GEOSINTETIK TERHADAP STABILITAS
DAN DEFORMASI MSE *WALL*
(*STUDI KASUS: PROYEK FLYOVER DI KAWASAN INDUSTRI JABABEKA IX*)**

(Skripsi)

Oleh:

**FIRZA FAUZY AKBAR
NPM 2215011047**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

ABSTRAK

STUDI KOMPARATIF PENGARUH JENIS, SPASI VERTIKAL, DAN PANJANG GEOSINTETIK TERHADAP STABILITAS DAN DEFORMASI MSE *WALL* (*STUDI KASUS: PROYEK FLYOVER DI KAWASAN INDUSTRI JABABEKA IX*)

Oleh

FIRZA FAUZY AKBAR

Proyek *flyover* Kawasan Industri Jababeka IX membutuhkan struktur penahan tanah pada oprit timbunan. MSE *Wall* dengan perkuatan geosintetik dipilih sebagai solusi. Penelitian ini menganalisis stabilitas eksternal, internal, dan lereng, serta deformasi MSE *Wall* menggunakan metode numerik PLAXIS 2D. Dua belas variasi dimodelkan dengan mengkombinasikan dua jenis geogrid (Hibritex LP105 dan LP155), dua spasi vertikal (0,4 m dan 0,6 m), dan tiga panjang (7, 8, dan 8,5 m). Analisis stabilitas eksternal menunjukkan SF geser = 1,408, eksentrisitas $e = 1,053 \text{ m} < e_{\max} = 2,125 \text{ m}$, dan kapasitas dukung $q_R = 436,436 \text{ kN/m}^2 > \sigma_v = 224,481 \text{ kN/m}^2$ —seluruhnya terpenuhi pada kondisi statis maupun gempa ($k_h = 0,202g$). Stabilitas internal seluruh 25 lapisan geogrid aman terhadap putus dan cabut. Seluruh 12 variasi menghasilkan SF statis 1,824–3,121 ($\geq 1,5$) dan SF gempa 1,218–1,503 ($\geq 1,1$). Deformasi vertikal berkisar 17,67–22,21 mm dan lateral 6,08–8,11 mm, keduanya jauh di bawah batas SNI 8460:2017. Variasi 9 (LP155, 8,5 m, spasi 0,4 m) direkomendasikan sebagai konfigurasi paling optimal.

Kata kunci: MSE *Wall*, Geogrid, PLAXIS 2D, Stabilitas Lereng, Deformasi, Geosintetik

ABSTRACT

COMPARATIVE STUDY OF THE INFLUENCE OF GEOSYNTHETIC TYPE, VERTICAL SPACING, AND LENGTH ON THE STABILITY AND DEFORMATION OF MSE WALLS (CASE STUDY: FLYOVER PROJECT IN THE JABABEKA IX INDUSTRIAL AREA)

By

FIRZA FAUZY AKBAR

The Jababeka IX Industrial Estate flyover project requires a retaining structure for its embankment. A Mechanically Stabilized Earth (MSE) Wall reinforced with geosynthetics was selected. This study analyzes external and internal stability, slope stability, and deformation of the MSE Wall using PLAXIS 2D numerical method. Twelve variations were modeled by combining two geogrid types (Hibritex LP105 and LP155), two vertical spacings (0.4 m and 0.6 m), and three lengths (7, 8, and 8.5 m). External stability analysis shows SF sliding = 1.408, eccentricity $e = 1.053 \text{ m} < e_{max} = 2.125 \text{ m}$, and bearing capacity $q_R = 436.436 \text{ kN/m}^2 > \sigma_v = 224.481 \text{ kN/m}^2$ —all satisfied for both static and seismic ($k_h = 0.202g$) conditions. Internal stability of all 25 geogrid layers is safe against rupture and pullout. All 12 variations produce static SF of 1.824–3.121 (≥ 1.5) and seismic SF of 1.218–1.503 (≥ 1.1). Vertical deformation ranges 17.67–22.21 mm and lateral deformation 6.08–8.11 mm, both well below SNI 8460:2017 limits. Variation 9 (LP155, 8.5 m, 0.4 m spacing) is recommended as the optimal configuration.

Keywords: MSE Wall, Geogrid, PLAXIS 2D, Slope Stability, Deformation, Geosynthetic

**STUDI KOMPARATIF PENGARUH JENIS, SPASI VERTIKAL, DAN PANJANG
GEOSINTETIK TERHADAP STABILITAS
DAN DEFORMASI MSE WALL
(STUDI KASUS: PROYEK FLYOVER DI KAWASAN INDUSTRI JABABEKA IX)**

Oleh

FIRZA FAUZY AKBAR

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Sipil Fakultas
Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

Judul Skripsi

**: STUDI KOMPARATIF PENGARUH JENIS,
SPASI VERTIKAL, DAN PANJANG
GEOSINTETIK TERHADAP STABILITAS
DAN DEFORMASI MSE WALL (STUDI
KASUS: PROYEK FLYOVER DI KAWASAN
INDUSTRI JABABEKA IX)**

Nama Mahasiswa

: Firza Fauzy Akbar

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2215011047

Program Studi

: S1 Teknik Sipil

Jurusan

: Teknik Sipil

Fakultas

: Teknik



1. Komisi Pembimbing

Ir. Aminudin Syah, S.T., M.Eng.

NIP 19880323 201903 1 019

Dr. Suyadi, S.T., M.T.

NIP 19741225 200501 1 003

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil

3. Ketua Program Studi Teknik Sipil

Sasana Putra, S.T., M.T.

NIP 19691111 200003 1 002

Dr. Suyadi, S.T., M.T.

NIP 19741225 200501 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

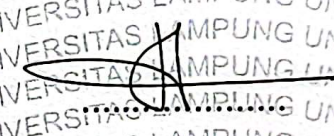
Ketua

: Ir. Aminudin Syah, S.T., M.Eng.



Sekretaris

: Dr. Suyadi, S.T., M.T.



Penguji

Bukan Pembimbing

**: Prof. Dr. Eng. Ir. Lusmellia Afriani,
S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.

NIP. 19691030 200003 1 001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 02 Juni 2026

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Firza Fauzy Akbar

Nomor Pokok Mahasiswa : 2215011047

Judul Skripsi : Studi Komparatif Pengaruh Jenis, Spasi Vertikal,
dan Panjang Geosintetik Terhadap Stabilitas Dan
Deformasi MSE *Wall* (Studi Kasus: Proyek *Flyover*
Di Kawasan Industri Jababeka IX)

Jurusan : Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri dan semua tulisan yang tertuang dalam skripsi ini telah mengikuti kaidah Penulisan Karya Ilmiah Universitas Lampung.

Bandar Lampung, Mei 2026
Pembuat Pernyataan



Firza Fauzy Akbar

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kecamatan Raman Utara yang terletak di Lampung Timur pada tanggal 27 November 2004. Penulis merupakan anak kedua dari Bapak Sudarmaji dan Ibu Dewi Handayani. Penulis merupakan 2 bersaudara dengan 1 (satu) kakak perempuan yang bernama Salma Fauziyyah.

Penulis memulai jenjang pendidikan di TK Pertiwi, Lampung Timur yang diselesaikan pada tahun 2010, lalu dilanjutkan Pendidikan Tingkat Dasar di SDN 1 Kota Raman, Lampung Timur yang diselesaikan pada tahun 2016, lalu dilanjutkan Pendidikan Tingkat Pertama di MTs Negeri 2 Lampung Timur yang diselesaikan pada tahun 2019, dan dilanjutkan Pendidikan Menengah Atas di SMA Negeri 1 Raman Utara yang diselesaikan pada tahun 2022. Kemudian, penulis diterima di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN pada tahun 2022. Selama menjadi mahasiswa, penulis berperan aktif di dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung sebagai Anggota Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa (PSDM) pada periode 2023 – 2024 dan 2024 – 2025.

Penulis telah melaksanakan kegiatan Magang dan Studi Independen Bersertifikat (MSIB) pada PT Jababeka sebagai *quality control* pada September – Desember 2024, lalu mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) periode II di Kelurahan Ketapang Kuala, Kecamatan Panjang, Kota Bandar Lampung, Lampung selama 40 hari, yaitu Juli – Agustus 2025. Mulai pada tahun 2025 juga, penulis melakukan penelitian yang berjudul “Studi Komparatif Pengaruh Jenis, Spasi Vertikal, dan Panjang Geosintetik Terhadap Stabilitas Dan Deformasi MSE *Wall* (Studi Kasus: Proyek *Flyover* Di Kawasan Industri Jababeka IX)” sebagai tugas akhir dan salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik.

PERSEMBAHAN

Alhamdulillahhirabbalamin, dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, segala puji bagi Allah Swt atas limpahan rahmat, nikmat, kekuatan, dan kesempatan, kuucapkan syukur atas Karunia Mu dan dengan segala kerendahan hati. Akhirnya saya dapat menyelesaikan karya yang semoga menjadikan saya insan yang berguna, bermanfaat, dan bermartabat.

Skripsi ini kupersembahkan kepada kedua orangtuaku Ibu dan Bapak yang selalu menuntunku dengan sabar dan penuh kasih. Terima kasih atas semua pelajaran hidup, semangat, dan doa yang kalian berikan. Aku bersyukur memiliki orangtua sekuat dan setulus kalian. Semoga karya sederhana ini bisa membuat kalian tersenyum bangga.

Untuk Kakak saya yang selalu mensupport selama masa kuliah saya. Untuk keluarga yang selalu hadir dengan doa, semoga karya ini menjadi hadiah kecil yang membawa kebahagiaan untuk kita semua.

Skripsi ini kupersembahkan untuk sahabat-sahabat yang menjadi keluarga kedua bagiku. Tanpa kalian, mungkin perjalanan ini terasa lebih sulit.

Untuk dosen yang selalu memberikan kritik dan saran dengan sabar, terima kasih atas semua ilmu berharga yang tak ternilai.

Terima kasih untuk teman-teman keluarga besar Angkatan 2022 atas dukungannya dalam proses yang panjang menemanin perjalanan kuliah dari awal hingga akhir studi.

Skripsi ini kupersembahkan untuk diriku sendiri, yang telah berjuang keras melewati segala tantangan. Terima kasih karena tidak menyerah meski banyak rintangan menghadang. Semoga karya ini menjadi pijakan untuk masa depan yang lebih baik.

MOTTO

“And in the end, the love you take is equal to the love you make.”

(Paul McCartney – The End)

“ Jangan menyerah, karena kita tidak akan pernah tahu apa yang terjadi besok kalau kita berhenti hari ini. ”

(Nazril Irham)

“Nothing’s gonna change my world.”

(John Lennon – Across the Universe)

“All is well.”

(Ranchoddas Shamaldas Chanchad)

“Musim-musim pun terus berganti, hidup ini juga pasti mati, tak akan ada yang abadi, tak akan ada yang kekal.”

(Ahmad Dhani Prasetyo – Pangeran Cinta)

SANWACANA

Atas berkat Rahmat hidayat Allah S.W.T. dengan mengucapkan puji Syukur Alhamdulillah, penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “Studi Komparatif Pengaruh Jenis, Spasi Vertikal, dan Panjang Geosintetik Terhadap Stabilitas Dan Deformasi MSE *Wall* (Studi Kasus: Proyek *Flyover* Di Kawasan Industri Jababeka IX)” sebagai salah satu syarat dalam mendapatkan gelar Sarjana Teknik di Universitas Lampung. Pada penyusunan laporan ini, penulis mendapatkan banyak bantuan, dukungan, dan arahan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM, ASEAN, Eng., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S-1 Teknik Sipil Universitas Lampung.
5. Bapak Ir. Aminudin Syah, S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing Pertama yang dengan penuh kesabaran telah memberikan bimbingan, arahan, serta dukungan selama proses penyelesaian skripsi ini. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya atas perhatian, ilmu, dan motivasi yang telah diberikan. Semoga segala kebaikan Bapak senantiasa dibalas dengan keberkahan.
6. Bapak Dr. Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S-1 Teknik Sipil sekaligus Dosen Pembimbing Kedua dan Dosen Pembimbing Akademik, yang dengan penuh kesabaran telah membimbing, mengarahkan, dan memberikan banyak ilmu serta masukan selama proses perkuliahan hingga penyelesaian skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-

besarnya atas waktu, perhatian, dan dedikasi yang telah diberikan. Semoga segala kebaikan yang Bapak berikan dibalas dengan keberkahan dan kebaikan yang berlipat.

7. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM, ASEAN, Eng., selaku Rektor Universitas Lampung sekaligus Dosen Penguji yang telah memberikan evaluasi, masukan yang konstruktif, serta kritik dan saran yang sangat membantu dalam penyempurnaan skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas kontribusi dan ilmu yang telah diberikan. Semoga segala kebaikan Ibu senantiasa mendapatkan keberkahan.
8. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Sipil yang sudah memberikan ilmu dan wawasan yang bermanfaat dalam proses pembelajaran agar lebih baik kedepannya.
9. Seluruh Staff Administrasi Jurusan Teknik Sipil yang selalu membantu dalam administrasi selama perkuliahan penulis.
10. Keluarga tercinta, Ibu Dewi dan Bapak Sudarmaji serta Mbak Salma, Mas Ibnu dan Raya, yang senantiasa memberikan perhatian, doa, kasih sayang, serta dukungan moral, material, juga menjadi penyemangat dan motivasi terbesar penulis untuk menyelesaikan skripsi.
11. Kawan Rumah Winda, teman – teman kuliah penulis yang selalu menemani dan memberikan dukungan kepada penulis, baik dukungan hati dan perasaan serta memberikan hiburan serta telah berkontribusi atas kesanggupan saya untuk menjalani masa-masa perkuliahan ini. Terimakasih karena dengan adanya kalian menjadi salah satu alasan saya bertahan di dunia perkuliahan ini.
12. Keluarga besar Teknik Sipil Angkatan 2022 (TEGAS) yang menemani penulis berjuang dari awal perkuliahan, memberikan semangat dan dukungan sampai penulis bisa menyelesaikan penulisan ini. Terimakasih kita sudah bertahan dan menjalani kehidupan skripsi yang menyenangkan ini.
13. Kepada abang dan kakak, khususnya keluarga besar Teknik Sipil angkatan 2020 dan 2021, terima kasih atas bantuan, arahan, dan pengalaman yang telah diberikan selama masa perkuliahan. Kepada adik-adik angkatan 2023

dan 2024, terima kasih atas kebersamaan dan canda tawa yang telah diberikan. Semoga kalian semua dapat menyelesaikan studi dengan lancar dan tepat waktu.

14. Seseorang Mahasiswi Teknik Sipil Universitas Lampung, yang bernama Agtin Rhamadhini, yang telah menjadi salah satu bagian terindah penulis selama menjalani proses perkuliahan sampai penulis menyelesaikan skripsi ini, terimakasih juga karena telah membantu memberikan dukungan moral, semangat, dan motivasi selama proses penulisan, menjadi cahaya dikala kehilangan arah, tempat berkeluh kesah, tempat bercerita serta meminta pendapat dan memberikan warna selama proses penulisan skripsi setiap harinya. Terima kasih untuk yang senantiasa sabar membantu penulis apabila ada kesulitan.
15. *Last but not least, i wanna thank me, i wanna thank me for believing in me, i wanna thank me for doing all this hard work, i wanna thank me for having no days off, i wanna thank me for never quitting, i wanna thank me for always being a giver, and tryna give more than i receive, i wanna thank me for tryna do more right than wrong, i wanna thank me for just being me at all times.*

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga saran dan masukan membangun diperlukan oleh penulis dikemudian hari. Akhir kata, penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat dan berguna,

Bandar Lampung, Juni 2026
Penulis,

Firza Fauzy Akbar

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|---|-------------|
| DAFTAR ISI | i |
| DAFTAR GAMBAR | iiiv |
| DAFTAR TABEL | vi |
| DAFTAR NOTASI | viii |
| I. PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3 Tujuan Penelitian..... | 3 |
| 1.4 Batasan Masalah..... | 4 |
| 1.5 Manfaat Penelitian..... | 4 |
| 1.6 Sistematika Penulisan..... | 4 |
| II. TINJAUAN PUSTAKA | 6 |
| 2.1 Tanah | 6 |
| 2.1.1 Klasifikasi Tanah | 7 |
| 2.2 Parameter Fisik Tanah..... | 8 |
| 2.2.1 Berat Volume Tanah | 8 |
| 2.2.2 Modulus Elastisitas Tanah (E_s)..... | 10 |
| 2.2.3 Koefisien Permeabilitas Tanah (k)..... | 11 |
| 2.2.4 <i>Poisson Ratio</i> (ν) | 12 |
| 2.2.5 Sudut Dilatasi (ψ) | 13 |
| 2.3 Kuat Geser Tanah | 13 |
| 2.4 Kapasitas Dukung Tanah..... | 15 |
| 2.5 Tekanan Tanah Lateral | 17 |
| 2.6 Pembebanan pada Jalan..... | 22 |
| 2.7 Koefisien Gempa..... | 23 |
| 2.8 Dinding <i>Mechanically Stabilized Earth Wall</i> | 24 |
| 2.8.1 Prinsip Dinding MSE | 25 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 2.8.2 | Geosintetik..... | 26 |
| 2.8.3 | Tipe Penutup Muka | 28 |
| 2.8.4 | Tanah Timbunan yang Diperkuat | 30 |
| 2.8.5 | Kriteria Desain..... | 30 |
| 2.8.6 | Stabilitas Eksternal | 33 |
| 2.8.7 | Stabilitas Internal..... | 38 |
| 2.8.8 | Stabilitas Global | 43 |
| 2.8.9 | Stabilitas Terhadap Gempa | 43 |
| 2.8.10 | Desain MSE <i>Wall</i> dengan geometri yang kompleks | 48 |
| 2.9 | Analisis Stabilitas Lereng..... | 52 |
| 2.11 | Metode Elemen Hingga..... | 54 |
| 2.12 | PLAXIS 2D (Metode Elemen Hingga) | 60 |
| 2.12.1 | Simulasi Model..... | 61 |
| 2.12.2 | Tahapan Pemodelan..... | 65 |
| 2.13 | Penelitian Terdahulu | 68 |
| III. | METODE PENELITIAN | 71 |
| 3.1 | Lokasi Penelitian | 71 |
| 3.2 | Alur Penelitian..... | 73 |
| 3.2.1 | Studi Literatur..... | 75 |
| 3.2.2 | Pengumpulan Data..... | 76 |
| 3.2.3 | Pemodelan dan Analisis Data | 76 |
| 3.2.4 | Evaluasi Hasil dan Pembahasan | 78 |
| 3.2.5 | Kesimpulan dan Saran..... | 78 |
| IV. | HASIL DAN PEMBAHASAN..... | 79 |
| 4.1 | Kondisi Eksisting | 79 |
| 4.2 | Hasil Investigasi Geoteknik | 79 |
| 4.1.1 | Data Tanah Dasar..... | 79 |
| 4.1.2 | Data Tanah Timbunan..... | 83 |
| 4.3 | Pembebanan | 83 |
| 4.3.1 | Beban Lalu Lintas..... | 84 |
| 4.3.2 | Beban Gempa | 85 |
| 4.4 | Analisis Kondisi Awal | 86 |
| 4.4.1 | Kondisi Pemodelan Awal..... | 86 |
| 4.4.2 | Analisis Stabilitas Eksternal..... | 87 |

| | |
|--|------------|
| 4.4.3 Analisis Stabilitas Internal..... | 94 |
| 4.4.4 Analisis Stabilitas Lereng..... | 101 |
| 4.4.4 Analisis Deformasi | 103 |
| 4.5 Analisis Variasi..... | 104 |
| 4.6 Variasi Geogrid LP105 dengan Spasi 0,4 m..... | 107 |
| 4.7 Variasi Geogrid LP105 dengan Spasi 0,6 m..... | 114 |
| 4.8 Variasi Geogrid LP155 dengan Spasi 0,4 m..... | 122 |
| 4.9 Variasi Geogrid LP155 dengan Spasi 0,6 m..... | 127 |
| 4.10 Perbandingan Nilai Stabilitas Lereng Setelah Perkuatan..... | 132 |
| 4.11 Rekapitulasi dan Analisis Deformasi | 138 |
| V. KESIMPULAN DAN SARAN | 148 |
| 5.1 Kesimpulan..... | 148 |
| 5.2 Saran..... | 150 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 152 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|-----|
| Gambar 2.1 Klasifikasi tanah berdasarkan : (a) <i>British Standard</i> , (b) ASTM, dan (c) <i>Unified Class System</i> | 7 |
| Gambar 2.2 Kriteria kegagalan Mohr dan Coulomb..... | 14 |
| Gambar 2.3 Ilustrasi tekanan tanah aktif dan pasif..... | 20 |
| Gambar 2.4 Gaya lateral berdasarkan teori Coulumb..... | 21 |
| Gambar 2.5 Distribusi tegangan tanah aktif untuk tanah kohesif..... | 22 |
| Gambar 2.6 Ilustrasi dinding MSE..... | 24 |
| Gambar 2.7 Tipe kegagalan dinding MSE | 26 |
| Gambar 2.8 Jenis Geogrid..... | 28 |
| Gambar 2.9 Detail <i>Modular Block</i> | 29 |
| Gambar 2.10 Stabilitas eksternal dinding MSE | 33 |
| Gambar 2.11 Tekanan tanah lateral pada lereng horizontal | 36 |
| Gambar 2.12 Lokasi potensi bidang gelincir untuk stabilitas internal tulangan yang tidak dapat memanjang (<i>extensible</i>)..... | 39 |
| Gambar 2.13 Ratio tegangan terhadap kedalaman dinding MSE | 40 |
| Gambar 2.14 Ketinggian tinjau dalam analisis seismik..... | 45 |
| Gambar 2. 15 Dinding dengan geometri kompleks | 49 |
| Gambar 2.16 Dinding BBMSE | 50 |
| Gambar 2.17 Dinding TMSE | 51 |
| Gambar 2.18 Metode Massa | 60 |
| Gambar 2.19 Contoh pemodelan <i>plane-strain</i> dan <i>axisimetri</i> | 66 |
| Gambar 2.20 Contoh pemodelan geometri MSE <i>Wall</i> | 66 |
| Gambar 3.1 Lokasi Penelitian | 72 |
| Gambar 3.2 Proses konstruksi MSE wall di kawasan industri jababeka IX | 72 |
| Gambar 3.3 Alur penelitian. | 75 |
| Gambar 3.4 Pemodelan MSE <i>Wall</i> | 78 |
| Gambar 4.1 Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar (SB) Untuk Probabilitas Melebihi 7% | 85 |
| Gambar 4.2 Bidang gelincir pada kondisi eksisting..... | 102 |
| Gambar 4.3 Deformasi pada MSE <i>wall</i> kondisi eksisting | 103 |
| Gambar 4.6 Deformasi pada MSE <i>wall</i> variasi 1..... | 109 |
| Gambar 4.9 Deformasi pada MSE <i>wall</i> variasi 2..... | 112 |
| Gambar 4.6 Deformasi pada MSE <i>wall</i> variasi 3..... | 114 |
| Gambar 4.7 Deformasi pada MSE <i>wall</i> variasi 4..... | 117 |
| Gambar 4.8 Deformasi pada MSE <i>wall</i> variasi 5..... | 119 |
| Gambar 4.9 Deformasi pada MSE <i>wall</i> variasi 6..... | 122 |
| Gambar 4.10 Deformasi pada MSE <i>wall</i> variasi 7..... | 123 |
| Gambar 4.11 Deformasi pada MSE <i>wall</i> variasi 8..... | 125 |

| | |
|--|-----|
| Gambar 4.12 Deformasi pada MSE <i>wall</i> variasi 9..... | 127 |
| Gambar 4.13 Deformasi pada MSE <i>wall</i> variasi 10..... | 128 |
| Gambar 4.14 Deformasi pada MSE <i>wall</i> variasi 11..... | 130 |
| Gambar 4.15 Deformasi pada MSE <i>wall</i> variasi 12..... | 132 |
| Gambar 4.16 Faktor keamanan kondisi statis pada variasi geogrid LP105 dengan spasi 0,4 m..... | 132 |
| Gambar 4.17 Faktor keamanan kondisi gempa pada variasi geogrid LP105 dengan spasi 0,4 m..... | 133 |
| Gambar 4.18 Faktor keamanan kondisi statis pada variasi geogrid LP105 dengan spasi 0,6 m..... | 133 |
| Gambar 4.19 Faktor keamanan kondisi gempa pada variasi geogrid LP105 dengan spasi 0,6 m..... | 134 |
| Gambar 4.20 Faktor keamanan kondisi statis pada variasi geogrid LP155 dengan spasi 0,4 m..... | 134 |
| Gambar 4.21 Faktor keamanan kondisi gempa pada variasi geogrid LP155 dengan spasi 0,4 m..... | 135 |
| Gambar 4.22 Faktor keamanan kondisi statis pada variasi geogrid LP155 dengan spasi 0,4 m..... | 135 |
| Gambar 4.23 Faktor keamanan kondisi gempa pada variasi geogrid LP155 dengan spasi 0,6 m..... | 136 |
| Gambar 4.24 Penurunan pada variasi geogrid LP105 dengan spasi 0,4 m..... | 139 |
| Gambar 4.25 Penurunan pada variasi geogrid LP105 dengan spasi 0,6 m..... | 139 |
| Gambar 4.26 Penurunan pada variasi geogrid LP155 dengan spasi 0,4 m..... | 139 |
| Gambar 4.27 Penurunan pada variasi geogrid LP155 dengan spasi 0,6 m..... | 140 |
| Gambar 4.28 Penurunan pada berbagai variasi..... | 140 |
| Gambar 4.29 Deformasi lateral pada variasi geogrid LP105 dengan spasi 0,4 m..... | 142 |
| Gambar 4.30 Deformasi lateral pada variasi geogrid LP105 dengan spasi 0,6 m..... | 143 |
| Gambar 4.31 Deformasi lateral pada variasi geogrid LP155 dengan spasi 0,4 m..... | 143 |
| Gambar 4.32 Deformasi lateral pada variasi geogrid LP155 dengan spasi 0,6 m..... | 144 |
| Gambar 4.33 Rekapitulasi Deformasi lateral..... | 144 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2.1 Modulus elastisitas tanah | 10 |
| Tabel 2.2 Koefisien permeabilitas tanah (k) pada temperatur 20°C..... | 12 |
| Tabel 2.3 Rentang nilai <i>poisson ratio</i> | 12 |
| Tabel 2.4 Nilai-nilai faktor kapasitas dukung tanah..... | 17 |
| Tabel 2.5 Beban lalu lintas | 23 |
| Tabel 2. 6 Koefisien beban gempa | 23 |
| Tabel 2.7 Sistem dinding MSE..... | 25 |
| Tabel 2.8 Kriteria tanah timbunan untuk dinding MSE | 30 |
| Tabel 2.9 Panjang minimal tulangan | 31 |
| Tabel 2.10 Kedalaman tanah minimal MSE <i>wall</i> | 31 |
| Tabel 2.11 Kombinasi pembebanan untuk MSE <i>wall</i> | 32 |
| Tabel 2.12 Faktor untuk beban tetap γ_p | 33 |
| Tabel 2.13 Faktor tahanan stabilitas eksternal | 34 |
| Tabel 2.14 Faktor tahanan tarik geosintetik pada dinding MSE | 41 |
| Tabel 2.15 Faktor tahanan cabut geosintetik pada dinding MSE..... | 42 |
| Tabel 2.16 Nilai faktor aman untuk lereng stabil menurut AASHTO..... | 53 |
| Tabel 2.17 Nilai faktor aman untuk lereng stabil menurut SNI 8460:2017 | 53 |
| Tabel 3.1 Variasi pemodelan MSE <i>Wall</i> | 77 |
| Tabel 4.1 Rangkuman Hasil Uji Lab Borlog BH-1 | 81 |
| Tabel 4.2 Hasil Uji N-SPT | 82 |
| Tabel 4.3 Parameter tanah timbunan | 83 |
| Tabel 4.4 Faktor koefisien situs FPGA | 85 |
| Tabel 4.5 Tabel koefisien gempa untuk berbagai struktur penahan tanah..... | 86 |
| Tabel 4.6 Spesifikasi Geogrid PET UX Terra Grid 100 kN..... | 87 |
| Tabel 4.7 Spesifikasi <i>Modullar Block</i> Eksisting | 87 |
| Tabel 4.8 Gaya dan momen yang bekerja pada MSE <i>Wall</i> | 88 |
| Tabel 4.9 Hasil analisis stabilitas terhadap geser | 89 |
| Tabel 4.10 Hasil analisis stabilitas terhadap guling | 90 |
| Tabel 4.11 Faktor kuat dukung tanah fondasi | 91 |
| Tabel 4.12 Hasil analisis stabilitas terhadap daya dukung..... | 91 |
| Tabel 4.13 Hasil analisis stabilitas geser terhadap gempa | 92 |
| Tabel 4.14 Hasil analisis stabilitas guling terhadap gempa..... | 93 |
| Tabel 4.15 Hasil analisis stabilitas kuat dukung terhadap gempa | 94 |
| Tabel 4.16 Gaya tarik terfaktor | 95 |
| Tabel 4.17 Spesifikasi geogrid PET UX Terra Grid 100 kN | 95 |
| Tabel 4.18 Hasil analisis stabilitas terhadap tarik | 96 |
| Tabel 4.19 Hasil analisis stabilitas terhadap cabut..... | 96 |
| Tabel 4.20 Hasil analisis stabilitas tarik terhadap pengaruh gempa..... | 98 |

| | |
|---|-----|
| Tabel 4.21 Hasil analisis stabilitas internal untuk setiap lapisan | 99 |
| Tabel 4.22 Rekapitulasi nilai SF pada tahapan konstruksi kondisi eksisting..... | 101 |
| Tabel 4.23 Spesifikasi geogrid Hibritex LP105 | 105 |
| Tabel 4.24 Spesifikasi geogrid Hibritex LP155 | 105 |
| Tabel 4.26 Parameter Input <i>Modullar Block</i> Maccaferri..... | 106 |
| Tabel 4.26 Rekapitulasi Nilai SF Setiap <i>Phase MSE Wall</i> Variasi 1 | 108 |
| Tabel 4.27 Rekapitulasi Nilai SF Setiap <i>Phase MSE Wall</i> Variasi 2 | 111 |
| Tabel 4.28 Rekapitulasi Nilai SF Setiap <i>Phase MSE Wall</i> Variasi 3 | 113 |
| Tabel 4.28 Rekapitulasi Nilai SF Setiap <i>Phase MSE Wall</i> Variasi 4 | 114 |
| Tabel 4.30 Rekapitulasi Nilai SF Setiap <i>Phase MSE Wall</i> Variasi 6 | 118 |
| Tabel 4.30 Rekapitulasi Nilai SF Setiap <i>Phase MSE Wall</i> Variasi 7 | 123 |
| Tabel 4.32 Rekapitulasi Nilai SF Setiap <i>Phase MSE Wall</i> Variasi 8 | 124 |
| Tabel 4.33 Rekapitulasi Nilai SF Setiap <i>Phase MSE Wall</i> Variasi 9 | 126 |
| Tabel 4.33 Rekapitulasi Nilai SF Setiap <i>Phase MSE Wall</i> Variasi 10 | 127 |
| Tabel 4.35 Rekapitulasi Nilai SF Setiap <i>Phase MSE Wall</i> Variasi 11 | 129 |
| Tabel 4.36 Rekapitulasi Nilai SF Setiap <i>Phase MSE Wall</i> Variasi 12 | 131 |

DAFTAR NOTASI

| Simbol | Keterangan | Satuan |
|------------------|--|-------------------|
| B | Lebar fondasi | m |
| $[B]$ | Matriks kompatibilitas regangan-perpindahan | - |
| β | Sudut kemiringan permukaan tanah | ° |
| c | Kohesi tanah | kN/m ² |
| c' | Kohesi tanah efektif | kN/m ² |
| cd | Kohesi tanah yang dimobilisasi | kN/m ² |
| δ | Sudut gesek antara dinding dengan tanah | ° |
| δh | Deformasi lateral (pergeseran horizontal muka dinding) | mm |
| δv | Deformasi vertikal (penurunan) | mm |
| $\delta h/H$ | Rasio deformasi lateral terhadap tinggi dinding | % |
| $\Delta\sigma_H$ | Tegangan horizontal terfaktor tambahan | kN/m ² |
| $\Delta\gamma_s$ | <i>Incremental deviatoric strain</i> | - |
| e | Eksentrisitas resultan gaya | m |
| eb | Eksentrisitas untuk stabilitas daya dukung | m |
| E | Modulus elastisitas material | kN/m ² |
| EH | Tekanan tanah horizontal | kN/m |
| EQ | Beban seismik | kN/m |
| ES | Beban tambahan (<i>surchage</i>) | kN/m |
| E_u | Modulus elastisitas pada kondisi undrained | kN/m ² |
| EV | Tekanan tanah vertikal | kN/m |
| ε_x | Regangan arah sumbu x | - |
| ε_y | Regangan arah sumbu y | - |
| E_s | Modulus elastisitas tanah | kN/m ² |
| F | Faktor keamanan lereng | - |
| F_l | Resultan gaya tekanan tanah lateral | kN/m |

| Simbol | Keterangan | Satuan |
|---------------------|--|-------------------|
| F_2 | Resultan gaya tambahan akibat beban hidup | kN/m |
| F^* | Faktor tahanan tarik geosintetik ($= 2/3 \tan \phi$) | - |
| F_{PGA} | Faktor amplifikasi percepatan puncak | - |
| FS | Faktor keamanan (<i>Safety Factor</i>) | - |
| F_v | Koefisien situs untuk periode panjang | - |
| γ | Berat volume tanah | kN/m ³ |
| γ_b | Berat volume tanah basah | kN/m ³ |
| γ_d | Berat volume tanah kering | kN/m ³ |
| γ_{EH} | Faktor beban tetap horizontal | - |
| γ_{EQ} | Faktor beban untuk beban seismik | - |
| γ_{EV} | Faktor beban tetap vertikal | - |
| γ_{LS} | Faktor beban sementara (lalu lintas) | - |
| γ_p | Faktor beban untuk beban tetap | - |
| γ_r | Berat volume tanah perkuatan | kN/m ³ |
| γ_{sat} | Berat volume tanah jenuh air | kN/m ³ |
| γ_s | Berat volume butiran padat | kN/m ³ |
| γ_w | Berat volume air | kN/m ³ |
| G_s | Berat jenis tanah | - |
| k | Koefisien permeabilitas tanah | m/s |
| K_o | Koefisien tekanan tanah dalam keadaan diam | - |
| K_a | Koefisien tekanan tanah aktif | - |
| K_{AE} | Koefisien tekanan tanah aktif seismik (Mononobe-Okabe) | - |
| k_{av} | Percepatan rata-rata gempa | g |
| k_h | Koefisien gaya gempa horizontal | - |
| k_{max} | Percepatan maksimum gempa | g |
| K_p | Koefisien tekanan tanah pasif | - |
| K_r | Koefisien tekanan lateral di zona perkuatan | - |
| k_v | Koefisien gaya gempa vertikal | - |
| μ | Koefisien gesek internal ($\tan \phi$ fondasi) | - |
| $N_c, N_q, N\gamma$ | Faktor kapasitas dukung tanah (fungsi ϕ) | - |

| Simbol | Keterangan | Satuan |
|-----------------|---|-------------------|
| $N-SPT$ | Nilai tahanan penetrasi standar | - |
| ν (ν) | Poisson ratio | - |
| P_a | Resultan gaya tekanan tanah aktif | kN/m |
| P_{AE} | Gaya tekanan tanah aktif akibat gempa | kN/m |
| P_d | Gaya pendorong terfaktor | kN/m |
| PGA | Percepatan gempa puncak di batuan dasar | g |
| ϕ | Sudut gesek internal tanah | ° |
| ϕ' | Sudut gesek internal tanah efektif | ° |
| $\phi b'$ | Sudut gesek internal tanah timbunan tertahan | ° |
| ϕd | Sudut gesek dalam yang dimobilisasi | ° |
| ϕ_f | Sudut gesek dalam tereduksi (hasil SRF) | ° |
| P_i | Gaya inersia per lapisan perkuatan | kN/m |
| P_{IR} | Gaya inersia massa tanah perkuatan | kN/m |
| P_p | Resultan gaya tekanan tanah pasif | kN/m |
| P_u | Beban ultimit | kN |
| ψ | Sudut dilatasi | ° |
| q | Beban hidup / <i>surchage</i> | kPa |
| q_c | Tahanan konus (kuat dukung tanah) | kN/m ² |
| q_R | Kapasitas dukung terfaktor | kN/m ² |
| q_u | Kapasitas dukung ultimit | kN/m ² |
| R_c | Rasio liputan perkuatan | - |
| RF_{CR} | Faktor reduksi akibat rayapan (<i>creep</i>) | - |
| RF_D | Faktor reduksi akibat daya tahan kimia/biologi | - |
| RF_{ID} | Faktor reduksi akibat kerusakan saat pemasangan | - |
| R_r | Gaya penahan nominal terfaktor | kN/m |
| S_1 | Percepatan spektral periode 1 detik | g |
| SA | Kelas situs tanah batuan keras | - |
| SB | Kelas situs tanah batuan | - |
| SC | Kelas situs tanah keras | - |
| SD | Kelas situs tanah sedang | - |
| SE | Kelas situs tanah lunak | - |

| Simbol | Keterangan | Satuan |
|-----------------|---|-------------------|
| S_{eq} | Tegangan tambahan akibat beban lalu lintas | kPa |
| SF | Faktor keamanan (<i>Safety Factor</i>) | - |
| σ | Tegangan normal pada bidang runtuh | kN/m ² |
| σ' | Tegangan normal efektif | kN/m ² |
| σ_x | Tegangan arah sumbu x | kN/m ² |
| σ_y | Tegangan arah sumbu y | kN/m ² |
| σ_v | Tegangan vertikal terfaktor | kN/m ² |
| σ_H | Tekanan tanah horizontal terfaktor | kN/m ² |
| S_{rs} | Tahanan tarik ultimit perkuatan untuk beban statis | kN/m |
| S_S | Percepatan spektral periode pendek (0,2 detik) | g |
| S_v | Spasi vertikal antar lapisan perkuatan | m |
| τ | Kuat geser tanah | kN/m ² |
| T_{al} | Kuat tarik izin perkuatan geosintetik | kN/m |
| T_{HF} | Gaya geser horizontal terfaktor akibat gempa | kN/m |
| T_{max} | Gaya tarik maksimum pada perkuatan | kN/m |
| T_{md} | Gaya tarik dinamis per lapisan perkuatan | kN/m |
| T_r | Tahanan tarik terfaktor perkuatan | kN/m |
| T_{total} | Gaya tarik maksimum kondisi gempa | kN/m |
| T_{ult} | Kuat tarik ultimit geosintetik | kN/m |
| θ | Sudut kemiringan permukaan dinding | ° |
| u | Tekanan air pori | kN/m ² |
| V | Volume total tanah | m ³ |
| VI | Resultan gaya aksial (vertikal) | kN/m |
| V_S | Volume butiran padat tanah | m ³ |
| W | Berat total tanah (butiran padat, air, dan udara) | kN |
| $W_{eksternal}$ | Berat total eksternal (dinding + beban lalu lintas) | kN/m |
| W_S | Berat butiran padat tanah | kN |
| z | Kedalaman sisi atas perkuatan yang ditinjau | m |
| ξ | Sudut seismik ($\tan^{-1}(k_h/(1-k_v))$) | ° |
| ΣV | Jumlah gaya vertikal | kN/m |

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan kawasan industri di Indonesia, khususnya di wilayah penyangga ibu kota, semakin pesat. Salah satu contohnya adalah Kawasan Industri Jababeka di Cikarang Timur, Kabupaten Bekasi, yang dikembangkan sejak tahun 1989 oleh PT. Jababeka Tbk. Kawasan ini kini mengalami pertumbuhan dan telah memasuki tahap IX (KIJ-9). Pertumbuhan ini menuntut ketersediaan infrastruktur yang memadai, khususnya untuk akses dan distribusi logistik antar kawasan industri.

Namun, kondisi geografis di kawasan ini menghadirkan tantangan tersendiri. Salah satunya adalah jalan kabupaten yang membentang di antara dua kawasan industri, dan berfungsi sebagai pembatas fisik. Jalan ini tidak dirancang untuk menampung kendaraan berat, sehingga tidak memungkinkan mobilitas logistik secara langsung antar kawasan industri. Untuk mengatasi masalah ini, dibangunlah jalan layang (*flyover*) yang melintasi jalan kabupaten untuk menghubungkan dua kawasan industri tanpa mengganggu aktivitas kendaraan lokal.

Salah satu bagian penting dalam struktur *flyover* adalah oprit timbunan, yang harus dirancang dengan baik karena berpotensi menimbulkan tekanan lateral terhadap tanah dasar. Untuk itu, digunakan sistem dinding penahan tanah. Dalam proyek ini dipilih sistem *Mechanically Stabilized Earth (MSE) wall*, yakni dinding penahan tanah yang diperkuat dengan material geosintetik atau logam, dipasang secara berlapis dan disertai elemen modular di bagian depan sebagai *facing*. Sistem ini bekerja dengan menciptakan massa tanah yang stabil melalui interaksi antara tanah dan material perkuatannya (Elias *et al.*, 2001).

Menurut Federal Highway Administration (FHWA, 2009), MSE *Wall* memiliki sejumlah kelebihan, antara lain efisiensi biaya, proses pembangunan yang cepat, fleksibel terhadap deformasi, dan mampu menahan beban gempa (FHWA, 2009). Karena bentuknya modular dan tidak memerlukan bekisting, sistem ini sangat cocok diterapkan di kawasan padat seperti kawasan industri.

Namun, efektivitas MSE *wall* sangat bergantung pada parameter geometri perkuatannya, terutama mengenai variasi spasi vertikal dan panjang geosintetik yang digunakan. Penentuan spasi yang terlalu lebar atau panjang perkuatan yang kurang optimal dapat memicu kegagalan internal seperti cabut (*pull-out*) atau putus, serta meningkatkan risiko deformasi lateral yang berlebihan pada muka dinding. Sebaliknya, penggunaan perkuatan yang terlalu rapat atau terlalu panjang akan menyebabkan inefisiensi biaya material. Oleh karena itu, diperlukan analisis mendalam untuk menentukan konfigurasi yang paling optimal dalam menjaga stabilitas struktur. Selain itu, stabilitas global atau stabilitas lereng juga penting untuk diperhatikan, terutama jika MSE *wall* dibangun di atas tanah lunak atau di lokasi dengan kemiringan tertentu (FHWA, 2001).

Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Ansori, 2025), penggunaan geosintetik dapat diandalkan untuk konstruksi MSE karena konfigurasinya memungkinkan adanya tahanan terhadap cabutan yang optimum. Selain itu pada penelitian yang dilakukan oleh (Silaban, 2020), menyebutkan bahwa penggunaan MSE *wall* dapat meningkatkan faktor keamanan baik dalam kondisi statis maupun dinamis.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis deformasi dan stabilitas dari struktur MSE *wall* pada proyek *Flyover* Jababeka IX. Analisis dilakukan dengan pendekatan numerik menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D. Sebagai bagian dari analisis, digunakan beberapa variasi jenis geosintetik dan *modular block* untuk melihat perbandingan kinerjanya terhadap faktor keamanan. Hasil dari pemodelan ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai material perkuatan

yang paling sesuai untuk digunakan berdasarkan kondisi tanah dan desain struktur.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah penelitian yang diambil adalah sebagai berikut::

1. Bagaimana kondisi stabilitas eksternal (guling, geser, dan daya dukung) pada struktur MSE *wall* di Proyek *Flyover* Jababeka?
2. Bagaimana kestabilan lereng yang terbentuk akibat timbunan tanah dan struktur MSE *wall* di proyek tersebut apakah memenuhi nilai faktor keamanan?
3. Apakah deformasi dari hasil analisis memenuhi standar yang berlaku sesuai SNI 8460:2017?
4. Bagaimana pengaruh variasi spasi vertikal dan panjang pemasangan geosintetik terhadap deformasi dan faktor keamanan struktur MSE *wall*?

1.3 Tujuan Penelitian

Mengacu pada rumusan masalah di atas, maka dapat ditentukan tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengevaluasi stabilitas eksternal struktur MSE *wall* yang mencakup bahaya guling, geser, dan daya dukung tanah menggunakan metode LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) menggunakan data geometri & parameter tanah proyek *Flyover* Jababeka IX.
2. Menganalisis stabilitas lereng di sekitar MSE *wall* dengan pendekatan numerik pada berbagai tahap konstruksi dan membandingkannya dengan nilai minimum yang disyaratkan pada SNI 8460:2017.
3. Menganalisis pengaruh panjang, spasi vertikal, dan jenis perkuatan geosintetik terhadap nilai faktor keamanan (*Safety Factor*) dan pola deformasi pada struktur MSE *wall* menggunakan PLAXIS 2D
4. Menganalisis nilai deformasi struktur membandingkannya dengan nilai maksimum yang disyaratkan pada SNI 8460:2017.

1.4 Batasan Masalah

Untuk membatasi topik yang akan dibahas dalam penelitian ini, maka batasan masalah penelitian ini ditentukan sebagai berikut:

1. Analisis difokuskan pada stabilitas eksternal (guling, geser, dan daya dukung tanah), stabilitas internal seperti tahanan cabut (*pullout*) dan stabilitas lereng secara keseluruhan.
2. Jenis dinding penahan tanah yang dianalisis adalah MSE *wall* dengan sistem perkuatan geosintetik.
3. Model kriteria keruntuhan yang digunakan adalah Mohr-Coulomb
4. Pemodelan numerik dilakukan 2D *plane strain* menggunakan PLAXIS 2D pada penampang kritis (tinggi maksimum).
5. Variasi jenis geosintetik yang digunakan sebagai material perkuatan dibatasi pada tipe komersial yang umum digunakan dalam proyek MSE *wall*, dengan parameter teknis yang diperoleh dari literatur atau lembar data produk.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini akan memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Menjadi acuan dalam evaluasi dan pengembangan desain dinding penahan tanah pada proyek-proyek serupa.
2. Menambah wawasan akademik dalam bidang analisis geoteknik, khususnya terkait struktur penahan tanah berbasis mekanik.

1.6 Sistematika Penulisan

Runtutan sistematika penulisan dalam proposal penelitian ini dijelaskan sebagai berikut.

1. BAB I PENDAHULUAN

Bab ini memaparkan mengenai latar belakang penelitian, rumusan masalah sebagai arah dari jalannya penelitian, tujuan penelitian yang

ingin dicapai, batasan masalah yang diterapkan, dan manfaat dari penelitian yang dilakukan.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memaparkan tentang landasan teori terkait dengan penelitian yang dilakukan serta penelitian terdahulu yang serupa dan dapat menjadi referensi untuk penelitian ini.

3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini memaparkan tentang alur penelitian, kebutuhan alat dan bahan, serta variabel penelitian dengan rinci.

4. BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memaparkan hasil dari kegiatan penelitian yang telah dilakukan dan pembahasannya.

5. BAB V PENUTUP

Bab ini memaparkan kesimpulan akhir dari hasil penelitian sebagai jawaban dari setiap rumusan masalah yang telah dibuat pada awal penelitian.

6. DAFTAR PUSTAKA

Bab ini memaparkan tentang seluruh referensi/acuan yang digunakan dalam penyusunan skripsi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

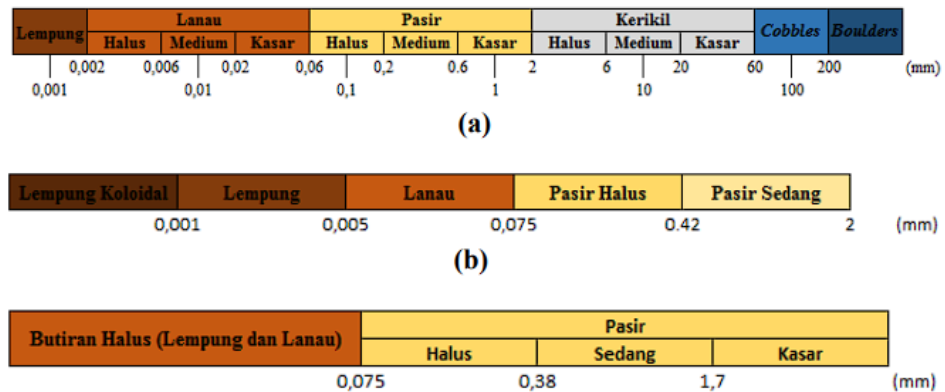
2.1 Tanah

Definisi tanah menurut (Terzaghi & Peck, 1987) adalah kumpulan butiran mineral alami yang bisa dipisahkan dengan cara mekanik bila agregat tersebut diaduk dalam air. Definisi tanah lebih lengkap disampaikan oleh (Das, 1994) yaitu material yang terdiri dari butiran mineral-mineral padat yang terikat secara kimia satu dengan yang lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (partikel padat) disertai zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel padat tersebut. Secara garis besar, tanah tersusun atas tiga elemen utama, yaitu butiran tanah, air, serta udara yang menempati ruang di antara butiran tersebut.

Tanah terbentuk melalui proses pelapukan batuan, baik secara fisik maupun kimiawi. Pelapukan fisik biasanya disebabkan oleh erosi, angin, air, es, perubahan suhu, atau faktor cuaca lain yang membuat batuan terurai menjadi partikel lebih kecil. Tanah yang terbentuk dari proses ini umumnya masih memiliki komposisi yang sama dengan batuan asalnya. Sementara itu, pelapukan kimiawi terjadi karena adanya reaksi dengan air yang mengandung asam atau basa, oksigen, maupun karbon dioksida. Proses ini menyebabkan susunan mineral pada batuan asal berubah. Jika tanah hasil pelapukan tetap berada di lokasi asalnya, maka disebut tanah residual (*residual soil*). Namun, jika tanah tersebut terbawa dan terendapkan di tempat lain, maka disebut tanah terangkut (*transported soil*).

Penentuan klasifikasi tanah didasarkan pada sifat serta karakteristik yang dimilikinya. Tanah termasuk ke dalam kategori kohesif apabila partikel-partikelnya menunjukkan ikatan yang kuat setelah mendapat pengaruh air, seperti yang terjadi pada tanah lempung. Berdasarkan ukuran butirannya,

tanah dibedakan menjadi dua kelompok utama, yakni tanah berbutir halus dan tanah berbutir kasar. Beberapa standar klasifikasi tanah yang sering digunakan, di antaranya *British Standard*, ASTM, dan *Unified Class System*. Batas-batas ukuran butiran dalam klasifikasi tanah berdasarkan standar-standar tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Klasifikasi tanah berdasarkan : (a) *British Standard*, (b) ASTM, dan (c) *Unified Class System* (Sumber: Das, 1994)

2.1.1 Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah adalah suatu metode pengelompokan berbagai jenis tanah yang berbeda namun memiliki karakteristik serupa, yang disusun ke dalam kelompok dan subkelompok sesuai dengan fungsinya. Sistem ini berperan sebagai sarana komunikasi yang sederhana untuk menggambarkan sifat-sifat umum tanah yang bervariasi tanpa memerlukan penjelasan secara rinci. Secara garis besar, klasifikasi berdasarkan tekstur berkaitan dengan kondisi permukaan tanah yang dipengaruhi oleh ukuran butir penyusunnya. Hasil dari penyelidikan sifat-sifat tanah dapat digunakan untuk mengevaluasi masalah-masalah tertentu seperti:

1. Penentuan penurunan bangunan yaitu dengan menentukan kompresibilitas tanah
2. Penentuan kecepatan air yang mengalir lewat benda uji guna menghitung koefisien permeabilitas

3. Untuk mengevaluasi stabilitas tanah yang miring dengan menentukan kuat geser tanah

Sistem klasifikasi tanah merupakan suatu sistem penggolongan yang sistematis dari jenis-jenis tanah yang mempunyai sifat-sifat yang sama ke dalam kelompok dan sub kelompok berdasarkan pemakaiannya.

Tanah dibagi menjadi 4 bagian kelompok yaitu:

1. Kerikil (*gravel*)
2. Pasir (*sand*)
3. Lanau (*silt*)
4. Lempung (*clay*)

Dalam sistem klasifikasi tanah berdasarkan tekstur, tanah dibagi atas dasar komponen utama yang terkandung didalamnya. Misalnya lempung berpasir (*sandy clay*), lempung berlanau (*silty clay*), dan seterusnya.

2.2 Parameter Fisik Tanah

Faktor yang memengaruhi stabilitas tanah pada lereng antara lain adalah sifat fisik tanah penyusun lereng. Sifat fisik tanah tidak hanya digunakan dalam proses klasifikasi, tetapi juga menjadi parameter penting dalam analisis stabilitas lereng. Penjelasan lebih lanjut mengenai parameter sifat fisik tanah disajikan sebagai berikut.

2.2.1 Berat Volume Tanah

Secara umum, berat volume tanah diklasifikasikan menjadi empat, yaitu berat volume basah, berat volume jenuh, berat volume kering, dan berat volume butiran padat. Berat volume basah didefinisikan sebagai perbandingan antara berat total tanah dengan volume total tanah. Parameter ini menggambarkan berat tanah dalam kondisi kadar air alami, dengan memperhitungkan kandungan butiran padat, air, dan udara di dalam tanah. Berat volume basah (γ_b) dapat ditentukan menggunakan Persamaan (2.1).

$$\gamma_b = \frac{W}{V} \quad (2.1)$$

Keterangan :

γ_b = berat volume tanah basah (kN/m³)

W = berat total tanah meliputi butiran padat, air dan udara
(kN)

V = volume total tanah (m³)

Berat volume jenuh air adalah perbandingan berat butiran tanah dan air dengan volume total tanah. Seluruh pori tanah diasumsikan terisi penuh oleh air. Berat volume jenuh air (γ_{sat}) dapat dihitung dengan Persamaan (2.2).

$$\gamma_{sat} = \frac{W_{(tanah+air)}}{V} \quad (2.2)$$

Keterangan :

γ_{sat} = berat volume tanah jenuh air (kN/m³)

Berat volume kering adalah perbandingan antara berat volume padat dengan volume total. Dalam menghitung berat volume kering, berat pori yang diisi oleh air dan udara tidak diperhitungkan. Berat volume kering (γ_d) dapat dihitung dengan Persamaan (2.3).

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (2.3)$$

Keterangan :

γ_d = berat volume tanah kering (kN/m³)

W_s = berat butiran padat tanah (kN)

Berat volume butiran padat didefinisikan sebagai rasio antara berat butiran padat terhadap volume butiran padat itu sendiri. Parameter ini merepresentasikan komposisi tanah yang hanya terdiri dari butiran padat, tanpa melibatkan air maupun udara. Hal ini dikarenakan berat dan volume butiran padat merupakan komposisi

yang konstan dalam satuan volume tanah. Berat volume butiran padat (γ_s) dapat dihitung dengan Persamaan (2.4).

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (2.4)$$

Keterangan :

γ_s = berat volume butiran padat (kN/m³)

V_s = volume butiran padat tanah (m³)

Dalam klasifikasi tanah, digunakan satuan yang lebih standar dengan perbandingan yang bersifat universal. Parameter fisik utama yang menjadi acuan adalah berat jenis (*specific gravity*). Berat jenis merupakan rasio antara berat volume butiran padat tanah terhadap berat volume air pada temperatur 4°C. Berat jenis (G_s) dapat dihitung dengan Persamaan (2.5)

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (2.5)$$

Keterangan :

G_s = berat jenis tanah

γ_w = berat volume air (kN/m³)

2.2.2 Modulus Elastisitas Tanah (E_s)

Modulus elastisitas tanah (E_s) ialah perbandingan antara tegangan (σ) dengan regangan (ϵ) yang terjadi pada tanah. Menurut Bowles (1995), rentang modulus elastisitas untuk berbagai jenis tanah dapat didekati seperti Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Modulus elastisitas tanah

| Jenis Tanah | E_s (MPa) | Jenis Tanah | E_s (Mpa) |
|---------------------|-------------|-------------------|-------------|
| Lempung | | <i>Loess</i> | 15 – 60 |
| Sangat Lunak | | Pasir | |
| Lunak | 5 – 25 | Lanau | 5 – 20 |
| Sedang | 15 – 50 | Tidak padat | 10 – 25 |
| Kasar | 50 – 100 | Padat | 50 – 81 |
| Pasiran | 25 – 250 | Pasir dan kerikil | |
| <i>Glacial till</i> | | Tidak padat | 50 – 150 |
| Tidak padat | 10 – 150 | Padat | 100 – 200 |

| Jenis Tanah | E_s (MPa) | Jenis Tanah | E_s (Mpa) |
|--------------|-------------|----------------|-------------|
| Padat | 150 – 720 | Material lepas | 150 – 5000 |
| Sangat padat | 500 – 1440 | Lanau | 2 – 20 |

(Sumber: Bowles, 1995)

Nilai modulus elastisitas tanah juga dapat didekati dengan menggunakan rumus empiris yang disarankan oleh (Schmertmann, 1970) sebagai berikut.

a. Tanah pasir

$$E_s = 766 \times \text{N-SPT} \quad (2.6)$$

$$E_s = 2q_c \quad (2.7)$$

b. Tanah lempung *normally consolidated*

$$E_u = 250c_u \text{ sampai } 500c_u \quad (2.8)$$

c. Tanah lempung *over consolidated* (OC)

$$E_u = 750c_u \text{ sampai } 1000c_u \quad (2.9)$$

dengan,

E_s = modulus elastisitas tanah (kN/m²)

E_u = modulus elastisitas pada kondisi *undrained* (kN/m²)

q_c = kuat dukung tanah (kN/m²)

c_u = kohesi pada kondisi *undrained* (kN/m²)

2.2.3 Koefisien Permeabilitas Tanah (k)

Permeabilitas tanah didefinisikan sebagai kemampuan tanah dalam mengalirkan air melalui rongga porinya. Dalam kajian mekanika tanah, parameter yang digunakan untuk menyatakan tingkat permeabilitas adalah koefisien permeabilitas (k), yang menunjukkan laju aliran air dalam tanah. Berdasarkan besar kecilnya nilai k , material tanah dapat digolongkan ke dalam beberapa klasifikasi menjadi:

1. Lolos air (*permeable*), $k > 10^{-4}$ cm/det,
2. Semi lolos air (*semi permeable*), $k \approx 10^{-4}$ cm/det, dan
3. Kedap air (*impermeable*), $k < 10^{-4}$ cm/det.

Tahanan aliran pada pori tanah dipengaruhi oleh sejumlah faktor, antara lain sifat fisik tanah, rapat massa, geometri pori, serta temperatur. Faktor temperatur berhubungan erat dengan viskositas dan tegangan permukaan air (Hardiyatmo, 2012). Secara umum, pengukuran koefisien permeabilitas tanah dilakukan pada temperatur standar 20°C. (Das, 2006) memberikan rentang nilai koefisien permeabilitas (k) untuk berbagai jenis tanah, yang disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Koefisien permeabilitas tanah (k) pada temperatur 20°C

| Jenis Tanah | k (mm/det) |
|---|---------------------|
| Butiran kasar | $10 - 10^3$ |
| Kerikil halus, kombinasi butiran kasar dan pasir butiran sedang | $10^2 - 10$ |
| Pasir halus, lanau lepas | $10^{-4} - 10^{-2}$ |
| Lanau padat, lanau kelempungan | $10^{-5} - 10^{-4}$ |
| Lempung kelanauan, lempung | $10^{-8} - 10^{-5}$ |

(Sumber: Das, 2006)

2.2.4 Poisson Ratio (ν)

Poisson ratio (ν) adalah nilai perbandingan antara tekanan aksial dengan regangan pemuaian lateral. Das (2006) mengusulkan nilai *poisson ratio* untuk berbagai jenis tanah seperti pada tabel berikut

Tabel 2.3 Rentang nilai *poisson ratio*

| Jenis Tanah | ν |
|-----------------|------------|
| Pasir lepas | 0,2 – 0,4 |
| Pasir sedang | 0,25 – 0,4 |
| Pasir padat | 0,3 – 0,45 |
| Pasir kelanauan | 0,2 – 0,4 |

| Jenis Tanah | v |
|----------------|-------------|
| Lempung lunak | 0,15 – 0,25 |
| Lempung sedang | 0,2 – 0,5 |

(Sumber: Das, 2006)

2.2.5 Sudut Dilatasi (ψ)

Dilatasi adalah perubahan volume pada tanah berbutir akibat adanya tegangan geser (Nedderman, 2005). Sudut dilatasi (ψ) didefinisikan sebagai sudut yang menunjukkan besar kecenderungan tanah untuk mengalami pergeseran, dan dinyatakan dalam derajat. Nilai sudut dilatasi dipengaruhi oleh tingkat kepadatan serta sudut geser tanah. Pada tanah lempung, umumnya tidak terjadi dilatasi sehingga nilai $\psi = 0$. Sedangkan pada pasir kuarsa, sudut dilatasi biasanya berkisar $\psi \approx \phi - 30^\circ$. Namun, dalam banyak kasus, sudut dilatasi dianggap bernilai 0 apabila sudut geser dalam (ϕ) kurang dari 30° .

2.3 Kuat Geser Tanah

Menurut (Afriani, 2014), kuat geser tanah merupakan salah satu parameter geoteknik paling fundamental yang menentukan kemampuan tanah dalam memikul beban dan mempertahankan kestabilan struktur di atasnya. Ketika terdapat beban pada tanah, maka akan terdapat distribusi tegangan dengan intensitas tertentu. Tegangan normal yang timbul dapat menimbulkan pergeseran berupa gelinciran antar bidang tanah. Sebagai reaksi, butiran tanah akan memberikan gaya perlawanan untuk mempertahankan kestabilannya, yang dikenal sebagai kuat geser tanah (τ). Keruntuhan geser (*shear failure*) terjadi akibat adanya pergerakan relatif antar partikel tanah. Dengan demikian, nilai kuat geser tanah dipengaruhi oleh:

1. Kohesi tanah, yang ditentukan oleh karakteristik jenis tanah serta derajat kepadatan, namun tidak dipengaruhi oleh tegangan normal yang terjadi pada bidang geser.
2. Gaya gesek antar partikel tanah, yang nilainya berbanding lurus dengan tegangan normal pada bidang geser.

(Mohr, 1910) dalam (Hardiyatmo, 2012) menyatakan bahwa keruntuhan suatu material dipengaruhi oleh kombinasi kritis antara tegangan normal dan tegangan geser. Hubungan kedua tegangan tersebut pada bidang keruntuhan dapat dirumuskan pada Persamaan (2.10).

$$\tau = f(\sigma) \quad (2.10)$$

Persamaan (2.10) akan membentuk garis keruntuhan (*failure envelope*) berbentuk lengkung, seperti ditunjukkan Gambar 2.2. (Coulomb, 1776) dalam (Das, 1994) melakukan penyederhanaan terhadap persamaan yang dibuat oleh Mohr sehingga diperoleh hubungan linear antara regangan normal dan tegangan geser yang dinyatakan dengan Persamaan (2.11).

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.11)$$

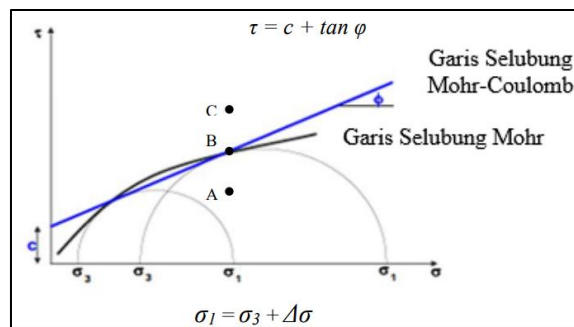
dengan,

τ = kuat geser tanah (kN/m^2)

c = kohesi tanah (kN/m^2)

σ = tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m^2)

ϕ = sudut gesek internal tanah ($^\circ$)



Gambar 2.2 Kriteria kegagalan Mohr dan Coulomb
(Sumber: Das, 2006)

Apabila posisi tegangan berada pada titik A, maka tanah tidak mengalami keruntuhan geser. Keruntuhan geser terjadi ketika tegangan mencapai titik B karena titik tersebut terletak pada garis kegagalan. Sedangkan kondisi pada titik C tidak mungkin terjadi, sebab material akan mengalami

keruntuhan sebelum tegangan mencapai titik tersebut. Di samping itu, tekanan air pori turut memengaruhi nilai tegangan efektif yang bekerja dalam tanah. Terzaghi (1925) dalam Hardiyatmo (2012) mengembangkan persamaan Coulomb dalam bentuk tegangan efektif menjadi Persamaan (2.12).

$$\tau = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (2.12)$$

Karena $\sigma' = (\sigma - u)$, maka

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.13)$$

dengan,

c' = kohesi tanah efektif (kN/m²)

σ' = tegangan normal efektif (kN/m²)

u = tekanan air pori (kN/m²)

ϕ' = sudut gesek internal tanah efektif (°)

2.4 Kapasitas Dukung Tanah

Kapasitas dukung tanah adalah kemampuan tanah untuk menopang beban-beban di atasnya yang disalurkan melalui fondasi. Perancangan fondasi dilakukan dengan teliti agar beban fondasi tidak menghasilkan tekanan yang relatif besar terhadap tanah di bawahnya, karena tekanan yang berlebihan dapat menyebabkan penurunan yang signifikan bahkan keruntuhan fondasi. Menurut (Hardiyatmo, 2014), terdapat dua persyaratan yang harus dipenuhi dalam merancang fondasi, yaitu:

1. Faktor aman terhadap keruntuhan akibat terlampauinya kapasitas dukung tanah harus terpenuhi, umumnya faktor aman yang digunakan adalah 3.
2. Penurunan fondasi masih dalam batas toleransi.

Tekanan maksimum yang dapat dibebankan pada tanah sedemikian rupa hingga kedua persyaratan di atas terpenuhi disebut kapasitas dukung izin (q_a). Apabila hanya memenuhi persyaratan nomor satu, sedangkan persyaratan nomor dua tidak, maka nilai kapasitas dukung harus dikurangi

sampai penurunan yang terjadi memenuhi syarat. Kapasitas izin tanah dihitung berdasarkan pada kapasitas dukung ultimit tanah dibagi dengan faktor aman (*safety factor*). Kapasitas dukung ultimit (q_u) didefinisikan sebagai tekanan maksimum persatuan luas yang dapat diterima oleh tanah akibat beban yang bekerja tanpa menyebabkan keruntuhan. Kapasitas dukung ultimit dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.14).

$$q_u = \frac{P_u}{A} \quad (2.14)$$

dengan,

q_u = kapasitas dukung ultimit (kN/m²)

P_u = beban ultimit (kN)

A = luas beban (m²)

Banyak metode yang digunakan untuk menentukan nilai kapasitas dukung tanah, salah satunya Persamaan (2.15) yang diusulkan oleh Terzaghi (1943) dalam Hardiyatmo (2014a) sebagai berikut:

$$q_u = c N_c + D_f \gamma N_q + 0,5 \gamma B N_y \quad (2.15)$$

dengan,

c = kohesi tanah (kN/m²)

D_f = kedalaman fondasi (m)

γ = berat volume tanah (kN/m³)

B = lebar fondasi (m)

N_c, N_q, N_y = faktor kapasitas dukung tanah (fungsi ϕ)

Asumsi yang digunakan ialah dasar fondasi kasar, sehingga menahan gerakan lateral tanah di dasar fondasi dan mengikat tanah seolah-olah merupakan satu kesatuan dengan fondasinya. Kapasitas dukung tanah merupakan fungsi dari ϕ dan bentuk geometri zona longsor, oleh karena itu dalam menghitung kapasitas dukung tanah diberi faktor $N_c, N_q,$

dan N_y . Nilai-nilai N_c , N_q , dan N_y telah diberikan oleh (AASHTO, 2007) berdasarkan nilai sudut gesek internal, disajikan dalam Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Nilai-nilai faktor kapasitas dukung tanah

| ϕ (°) | Keruntuhan Geser Umum | | | ϕ (°) | Keruntuhan Geser Umum | | |
|---------------|-----------------------|-------|------------|---------------|-----------------------|-------|------------|
| | N_c | N_q | N_γ | | N_c | N_q | N_γ |
| 0 | 5,14 | 1,00 | 0,0 | 23 | 18,1 | 8,7 | 8,2 |
| 1 | 5,4 | 1,1 | 0,1 | 24 | 19,3 | 9,6 | 9,4 |
| 2 | 5,6 | 1,2 | 0,2 | 25 | 20,7 | 10,7 | 10,9 |
| 3 | 5,9 | 1,3 | 0,2 | 26 | 22,3 | 11,9 | 12,5 |
| 4 | 6,2 | 1,4 | 0,3 | 27 | 23,9 | 13,2 | 14,5 |
| 5 | 6,5 | 1,6 | 0,5 | 28 | 25,8 | 14,7 | 16,7 |
| 6 | 6,8 | 1,7 | 0,6 | 29 | 27,9 | 16,4 | 19,3 |
| 7 | 7,2 | 1,9 | 0,7 | 30 | 30,1 | 18,4 | 22,4 |
| 8 | 7,5 | 2,1 | 0,9 | 31 | 32,7 | 20,6 | 25,9 |
| 9 | 7,9 | 2,3 | 1,0 | 32 | 35,5 | 23,2 | 30,2 |
| 10 | 8,4 | 2,5 | 1,2 | 33 | 38,6 | 26,1 | 35,2 |
| 11 | 8,8 | 2,7 | 1,4 | 34 | 42,2 | 29,4 | 41,1 |
| 12 | 9,3 | 3,0 | 1,7 | 35 | 46,1 | 33,3 | 48,0 |
| 13 | 9,8 | 3,3 | 2,0 | 36 | 50,6 | 37,8 | 56,3 |
| 14 | 10,4 | 3,6 | 2,3 | 37 | 55,6 | 42,9 | 66,2 |
| 15 | 11,0 | 3,9 | 2,7 | 38 | 61,4 | 48,9 | 78,0 |
| 16 | 11,6 | 4,3 | 3,1 | 39 | 67,9 | 56,0 | 92,3 |
| 17 | 12,3 | 4,8 | 3,5 | 40 | 75,3 | 64,2 | 109,4 |
| 18 | 13,1 | 5,3 | 4,1 | 41 | 83,9 | 73,9 | 130,2 |
| 19 | 13,9 | 5,8 | 4,7 | 42 | 93,7 | 85,4 | 155,6 |
| 20 | 14,8 | 6,4 | 5,4 | 43 | 105,1 | 99,0 | 186,5 |
| 21 | 15,8 | 7,1 | 6,2 | 44 | 118,4 | 115,3 | 224,6 |
| 22 | 16,9 | 7,8 | 7,1 | 45 | 133,9 | 134,9 | 271,8 |

(Sumber: AASHTO, 2007)

Catatan:

N_c (Prandtl, 1921), N_q (Reisner, 1924), dan N_γ (Vesic, 1975).

2.5 Tekanan Tanah Lateral

Analisis tekanan tanah lateral digunakan dalam perancangan sistem dinding penahan tanah dan sistem perkuatan tanah lainnya. Tekanan tanah lateral adalah gaya arah horizontal yang ditimbulkan akibat dorongan tanah di belakang struktur penahan tanah. Nilai tekanan tanah lateral sangat dipengaruhi oleh perubahan letak (*displacement*) dari sistem penahan dan sifat-sifat tanahnya.

(Dunn *et al.*, 1980) mengklasifikasikan tekanan lateral menjadi tiga keadaan, yaitu keadaan diam, keadaan pasif, dan keadaan aktif. Pada

keadaan diam, kedudukan tegangan-tegangan dalam kondisi stabil sehingga tidak terjadi perubahan letak (*displacement*) pada arah vertikal maupun horizontal. Nilai rasio antara tekanan horizontal dan tekanan vertikal pada kedalaman yang ditinjau saat keadaan diam didefinisikan sebagai koefisien tekanan tanah saat diam (K_0) yang dapat dinyatakan dalam Persamaan (2.16). (Jaky, 1944) dalam (Bowles, 1984) memberikan nilai pendekatan koefisien tekanan tanah saat diam untuk tanah granuler seperti dalam Persamaan (2.17). Sedangkan untuk jenis tanah lempung *normally consolidated*, (Brooker *et al.*, 1965) dalam (Hardiyatmo, 2014b) menyarankan Persamaan (2.18).

$$K_0 = \frac{\sigma_h'}{z\gamma'} = \frac{\sigma_h'}{\sigma_v'} \quad (2.16)$$

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (2.17)$$

$$K_0 = 0,95 - \sin \phi \quad (2.18)$$

dengan σ_h' adalah tekanan horizontal efektif, σ_v' adalah tekanan vertikal efektif, dan ϕ adalah sudut gesek internal tanah.

Apabila dinding penahan tanah bergeser ke arah luar timbunan, maka tanah timbunan akan mengalami keruntuhan. Kondisi ini menimbulkan tekanan tanah aktif (P_a), di mana perbandingan antara tekanan horizontal dengan tekanan vertikal didefinisikan sebagai koefisien tekanan tanah aktif (K_a).

Sebaliknya, jika dinding penahan tanah terdorong ke arah timbunan hingga menyebabkan tanah runtuh, maka gaya yang bekerja disebut tekanan tanah pasif (P_p). Perbandingan antara tekanan horizontal dan tekanan vertikal pada kondisi ini dinyatakan sebagai koefisien tekanan tanah pasif (K_p).

(Rankine, 1857) menganalisis tekanan tanah lateral pada kondisi keseimbangan plastis, yaitu saat tanah berada tepat di ambang keruntuhan. Analisis ini dilakukan dengan asumsi tanah bersifat homogen, tidak memiliki kohesi, isotropis, serta terletak pada ruang semi tak terbatas

dengan permukaan tanah datar dan dinding penahan tegak lurus yang halus (tidak ada kekasaran).

Dari analisis tersebut, koefisien tekanan tanah aktif dapat ditentukan dengan Persamaan (2.19), sedangkan koefisien tekanan tanah pasif dihitung menggunakan Persamaan (2.20). Perlu dicatat bahwa nilai koefisien tekanan tanah pasif selalu lebih besar dibandingkan koefisien tekanan tanah pada kondisi diam maupun koefisien tekanan tanah aktif, atau lebih tepatnya $K_p > K_o > K_a$.

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2) \quad (2.19)$$

$$K_p = \tan^2(45^\circ + \phi/2) \quad (2.20)$$

Dari kedua persamaan di atas, diperoleh Persamaan (2.21)

$$K_p = \frac{1}{K_a} \quad (2.21)$$

Setelah nilai K_a dan K_p diketahui, tekanan tanah aktif dan tekanan nilai pasif masing-masing dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.22) dan Persamaan (2.23).

$$P_a = 0,5H^2\gamma K_a \quad (2.22)$$

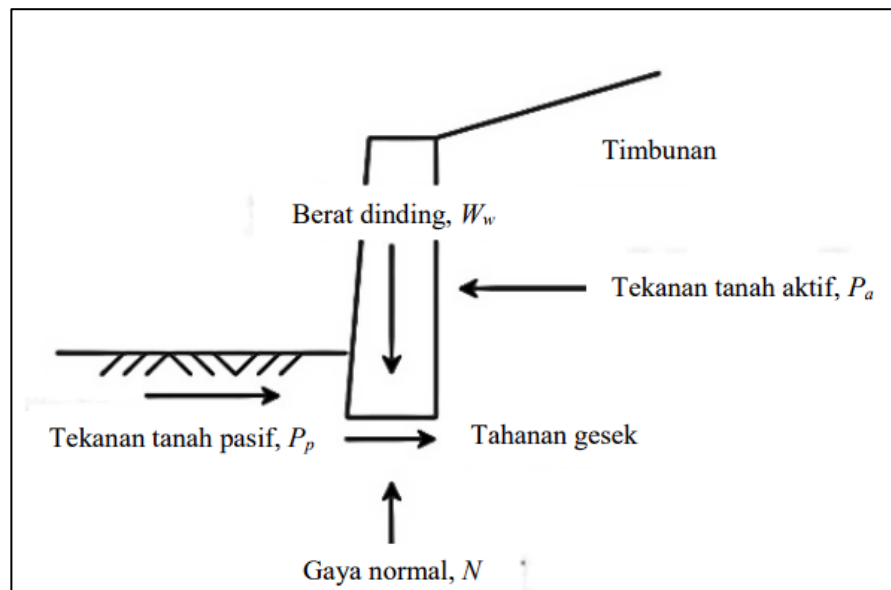
$$P_p = 0,5H^2\gamma K_p \quad (2.23)$$

dengan H adalah kedalaman tanah dari permukaan yang dinyatakan dalam meter dan γ adalah berat satuan volume tanah yang dinyatakan dalam kN/m^3 . Apabila kondisi permukaan tanah miring, maka sudut kemiringannya harus diperhitungkan dalam menentukan tekanan tanah lateral. Koefisien tekanan tanah aktif dan koefisien tekanan tanah pasif secara berurutan dapat ditentukan menggunakan Persamaan (2.24) dan Persamaan (2.25). Perbedaan tekanan tanah lateral pada bidang horizontal dan bidang miring diilustrasikan pada Gambar 2.3.

$$K_a = \cos \beta \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}} \quad (2.24)$$

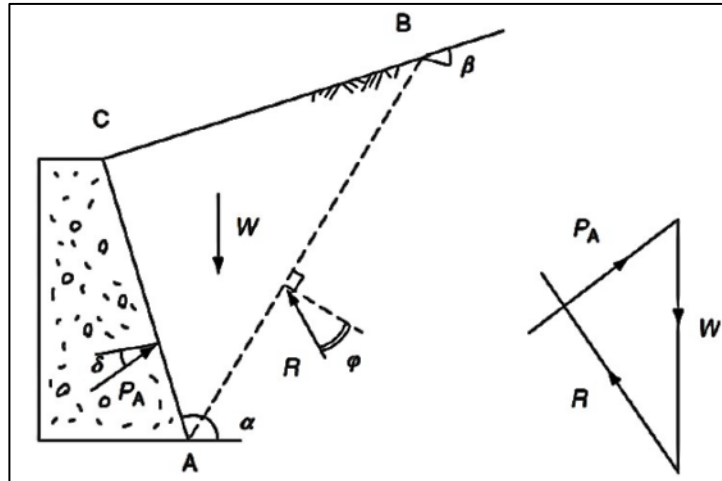
$$K_p = \cos \beta \frac{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}} \quad (2.25)$$

dengan β adalah sudut kemiringan permukaan tanah yang dinyatakan dalam derajat.



Gambar 2. 3 Ilustrasi tekanan tanah aktif dan pasif
(Sumber: Das,2006)

Teori mengenai tekanan tanah lateral juga disampaikan oleh (Coulomb, 1776) dalam (Hardiyatmo, 2014) yang mana teori ini memperhatikan pengaruh gesekan antara tanah timbunan dengan dinding penahannya seperti Gambar 2.3. Susut gesek antara dinding dan tanah (δ) mempengaruhi bentuk bidang longsor pada ujung kaki dinding penahan tanah menjadi lengkung di dekat dasar kaki dinding.



Gambar 2. 4 Gaya lateral berdasarkan teori Coulumb
(Sumber: Hardiyatmo, 2014)

Koefisien tekanan tanah aktif dan koefisien tekanan tanah pasif menggunakan teori Coulomb secara berurutan dapat ditentukan menggunakan Persamaan (2.26) dan Persamaan (2.27).

$$K_a = \frac{\sin^2(\alpha + \phi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha - \delta) \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right)^2} \quad (2.26)$$

$$K_a = \frac{\sin^2(\alpha - \phi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha + \delta) \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + \beta)}{\sin(\alpha + \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right)^2} \quad (2.27)$$

dengan,

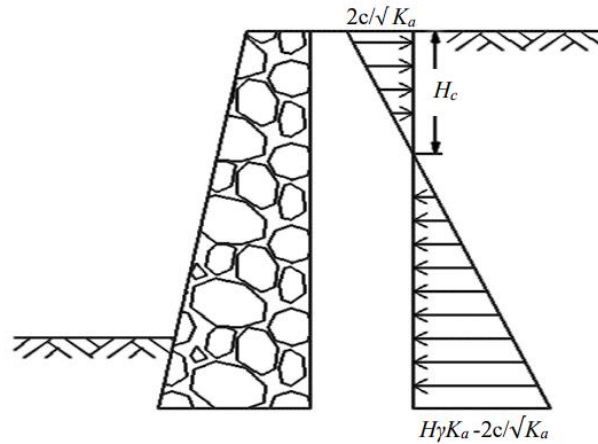
α = sudut kemiringan dinding penahan tanah dengan bidang planar horizontal

ϕ = sudut gesek internal tanah

δ = sudut gesek antara dinding dengan tanah (0,67 untuk dinding beton)

β = sudut kemiringan permukaan tanah

Pada tanah kohesif, nilai kohesi akan mempengaruhi nilai tekanan tanah aktif dan tekanan tanah pasifnya. Tekanan tanah aktif akan mengalami gaya tarik sedalam H_c dari permukaan tanah seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Distribusi tegangan tanah aktif untuk tanah kohesif

(Sumber: Das,2006)

Nilai H_c dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.28). Hal ini akan menyebabkan nilai tekanan tanah aktif akan berkurang, sementara tekanan tanah pasifnya akan bertambah. Hal ini dapat dijelaskan menggunakan Persamaan (2.29) dan Persamaan (2.30).

$$H_c = \frac{2c}{\gamma\sqrt{K_a}} \quad (2.28)$$

$$P_a = \left(0,5 H^2 \gamma K_a - 2cH \sqrt{K_a} + \frac{2c^2}{\gamma} \right) \cos \beta \quad (2.29)$$

$$P_p = \left(0,5 H^2 \gamma K_p + 2cH \sqrt{K_p} \right) \cos \beta \quad (2.30)$$

dengan c adalah nilai kohesi tanah yang dinyatakan dalam kN/m^2 dan β adalah sudut kemiringan permukaan tanah yang dinyatakan dalam derajat.

2.6 Pembebanan pada Jalan

(FHWA, 2003) memberikan kriteria pembebanan lalu lintas pada jalan yang diperhitungkan sebagai beban pada seluruh lebar permukaan jalan. Pembebanan pada jalan meliputi beban permanen akibat berat sendiri

struktur jalan serta beban lalu lintas, dan beban sementara akibat beban peralatan saat konstruksi. Departemen Pekerjaan Umum (2005) menyarankan nilai beban lalu lintas untuk pembebanan jalan berdasarkan kelas jalannya, disajikan dalam Tabel 2.5

Tabel 2.5 Beban lalu lintas

| Kelas Jalan | Beban Lalu Lintas (kPa) |
|-------------|-------------------------|
| I | 15 |
| II | 12 |
| III | 12 |

(Sumber: Departemen Pekerjaan Umum, 2005)

2.7 Koefisien Gempa

Beban yang bekerja pada tanah tidak hanya berasal dari beban statis, tetapi juga dari beban dinamis. Beban dinamis ini umumnya berupa getaran atau vibrasi, baik yang disebabkan oleh fenomena alam maupun aktivitas manusia. Salah satu sumber utama getaran alami dalam tanah adalah gempa bumi, yang dapat memengaruhi kestabilan lereng (Suryolelono, 2003).

Oleh karena itu, pengaruh gempa perlu diperhitungkan dalam analisis stabilitas lereng. Pada penelitian ini, analisis beban gempa dilakukan dengan menggunakan metode *pseudostatic analysis*, di mana gaya akibat gempa dimodelkan melalui koefisien seismik. Koefisien tersebut meliputi koefisien gaya gempa horizontal (k_h) dan koefisien gaya gempa vertikal (k_v).

(Melo & Sharma, 2004) memberikan rekomendasi nilai koefisien seismik yang dapat digunakan dalam analisis beban gempa pada lereng, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.6.

Tabel 2. 6 Koefisien beban gempa

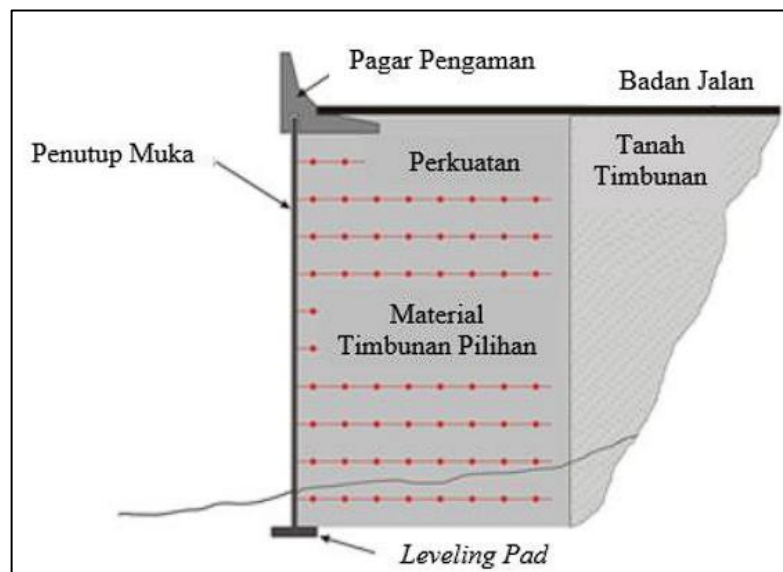
| Koefisien Beban Gempa | Keterangan |
|-----------------------|----------------------------|
| 0,1 | Gempa bumi sedang, SF >1,0 |

| Koefisien Beban Gempa | Keterangan |
|-----------------------|---------------------------------------|
| 0,15 | Gempa bumi besar, SF >1,0 |
| 1/3 – 1/2 PGA | Marcuson dan Franklin (1983), SF >1,0 |
| 1/2 PGA | Hynes-Griffin (1984), SF >1,0 |

(Sumber: Melo & Sharma, 2004)

2.8 Dinding *Mechanically Stabilized Earth Wall*

Mechanically Stabilized Earth Wall atau dinding MSE adalah konstruksi dinding penahan tanah yang distabilisasi secara mekanis untuk membantu menahan tekanan tanah lateral. Apabila dibandingkan dengan dinding penahan tanah konvensional, dinding MSE memiliki struktur yang lebih fleksibel, sehingga lebih sesuai untuk digunakan pada tanah fondasi yang buruk dan daerah seismik aktif. Ilustrasi dinding MSE ditunjukkan pada Gambar 2.6. (Berg *et al.*, 2009) menyebutkan bahwa dinding MSE terdiri dari tiga komponen utama, yaitu perkuatan, tanah asli atau tanah timbunan, dan elemen permukaan (*facing element*).



Gambar 2. 6 Ilustrasi dinding MSE

Sistem perkuatan pada dinding MSE memperhatikan beberapa hal, di antaranya geometri perkuatan, bahan perkuatan, dan kemampuan memanjang perkuatan. (Direktorat Bina Teknik, 2009) menjelaskan bagian dari masing-masing parameter ini menjadi lebih rinci, disajikan dalam Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Sistem dinding MSE.

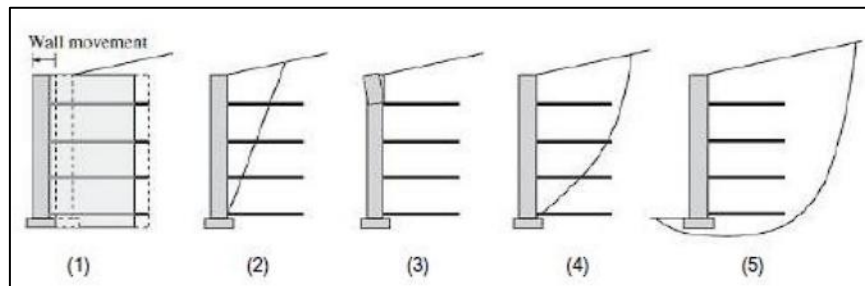
| Parameter | Jenis | Keterangan |
|-------------------------------------|--|--|
| Geometri perkuatan | Linear satu arah (<i>linier unidirectional</i>) | Pita-pita baja halus maupun beralur atau pita-pita geosintetik yang dilapisi fiber. |
| | Komposit satu arah (<i>composite unidirectional</i>) | Tulangan grid yang dicirikan oleh spasi antar grid lebih besar dari 150 mm. |
| | Bidang datar dua arah (<i>planar bidirectional</i>) | Geosintetik lembaran menerus dan <i>wire mesh</i> yang dilas maupun dianyam. |
| Bahan Perkuatan | Perkuatan metalik | Besi lunak (<i>mild steel</i>) yang digalvanis atau dilapisi epoksi. |
| | Perkuatan non-metalik | Umumnya bahan polimer yang terdiri dari polipropilen, polietilen, dan polyester. |
| Kemampuan Memanjang Perkuatan | Perkuatan yang tidak dapat memanjang (<i>inextensible</i>) | Deformasi timbunan pada saat runtuh jauh lebih kecil dari deformasi pada tanah. |
| | Perkuatan yang dapat memanjang (<i>extensible</i>) | Deformasi timbunan pada saat runtuh hampir sama atau bahkan lebih besar daripada deformasi pada tanah. |

(Sumber: Direktorat Bina Teknik, 2009)

2.8.1 Prinsip Dinding MSE

Pada prinsipnya, dinding MSE memiliki 5 (lima) tipe kegagalan, yakni tipe kegagalan eksternal, tipe kegagalan internal, tipe kegagalan lokal, tipe kegagalan kombinasi dan tipe kegagalan global kegagalan eksternal yakni kegagalan terhadap geser, guling dan daya dukung. Kegagalan internal disebabkan oleh kegagalan akibat retak,

kegagalan tarik dan kegagalan sambungan pada perkuatan. Kegagalan lokal disebabkan oleh besarnya jarak antar perkuatan yang dipasang sehingga menyebabkan terjadinya kegagalan guling dan kerusakan dinding MSE. Kegagalan kombinasi dan kegagalan global berkaitan dengan keruntuhan lereng, dimana bidang keruntuhan berada sebagian pada zona perkuatan atau diluar zona perkuatan.



Gambar 2. 7 Tipe kegagalan dinding MSE

2.8.2 Geosintetik

Geosintetik adalah istilah umum untuk produk berbentuk lembaran yang terbuat dari bahan polimer lentur, digunakan dengan tanah, batuan, atau material geoteknik lainnya, sebagai suatu kesatuan pekerjaan buatan manusia, struktur, maupun sistem (ASTM D 4439).

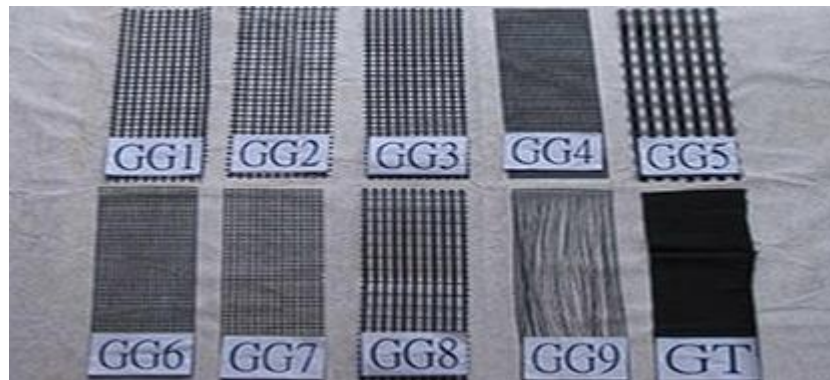
Pada dasarnya, geosintetik terbagi menjadi dua jenis yaitu tekstil dan jaring (*web*). Geosintetik jenis tekstil yaitu geotekstil dan geomembran, sedangkan geosintetik jenis jaring yaitu jaring (*web*) dan geogrid. Sebagian besar geosintetik terbuat dari polimer sintetik seperti polipropilena (PP), poliester (PET) atau polietilena (PE). Material polimer tersebut sangat tahan terhadap degradasi biologis dan kimiawi. Jenis lain yang jarang digunakan adalah poliamida (PA) atau nilon dan serat kaca. Bahan alami (seperti serat kapas, rami) juga dapat digunakan.

Geosintetik memiliki fungsi primer dan fungsi sekunder yang biasanya lebih dari satu fungsi. Kedua fungsi tersebut menjadikan geosintetik dapat berkontribusi secara total pada saat penerapannya. Dengan demikian, kedua fungsi ini perlu dipertimbangkan pada saat perhitungan dan pembuatan spesifikasi perencanaan. Geosintetik memiliki enam fungsi sebagai berikut:

- a) Filtrasi: bahan geosintetik digunakan untuk mengalirkan air ke dalam sistem drainase dan mencegah terjadinya migrasi partikel tanah melalui filter. Contoh penggunaan geosintetik sebagai filter adalah pada sistem drainase *porous*;
- b) Drainase: bahan geosintetik digunakan untuk mengalirkan air dari dalam tanah. Bahan ini contohnya digunakan sebagai drainase di belakang abutmen atau dinding penahan tanah;
- c) Separator: bahan geosintetik digunakan di antara dua material tanah yang tidak sejenis untuk mencegah terjadi pencampuran material. Sebagai contoh, bahan ini digunakan untuk mencegah bercampurnya lapis pondasi jalan dengan tanah dasar yang lunak, sehingga integritas dan tebal rencana struktur jalan dapat dipertahankan;
- d) Tanah dasar yang lunak, sehingga integritas dan tebal rencana struktur jalan dapat dipertahankan; perkuatan: sifat tarik bahan geosintetik dimanfaatkan untuk menahan tegangan atau deformasi pada struktur tanah;
- e) Penghalang: bahan geosintetik digunakan untuk mencegah perpindahan zat cair atau gas. Fungsi geosintetik ini contohnya adalah geomembran untuk menjaga fluktuasi kadar air pada tanah ekspansif atau digunakan pada penampungan sampah; dan
- f) Proteksi: bahan geosintetik digunakan sebagai lapisan yang memperkecil tegangan lokal untuk mencegah atau mengurangi kerusakan pada permukaan atau lapisan tersebut. Sebagai contoh, geotekstil digunakan untuk mencegah erosi tanah akibat hujan dan aliran air. Contoh lainnya, geotekstil tak-teranyam

digunakan untuk mencegah tertusuknya geomembran oleh tanah atau batu di sekelilingnya pada saat pemasangan.

Pada penelitian ini geosintetik yang digunakan adalah geogrid. Geogrid merupakan suatu contoh dari jenis geosintetik yang berbentuk jaring (*web*). Fungsi geogrid yang utama adalah sebagai perkuatan. Geogrid dibentuk oleh suatu jaring teratur dengan elemen–elemen tarik dan mempunyai bukaan berukuran tertentu, sehingga saling mengunci (*interlock*) dengan bahan pengisi di sekelilingnya. Jenis geogrid yang umum digunakan nampak seperti Gambar 2.7.



Gambar 2.8 Jenis Geogrid

2.8.3 Tipe Penutup Muka

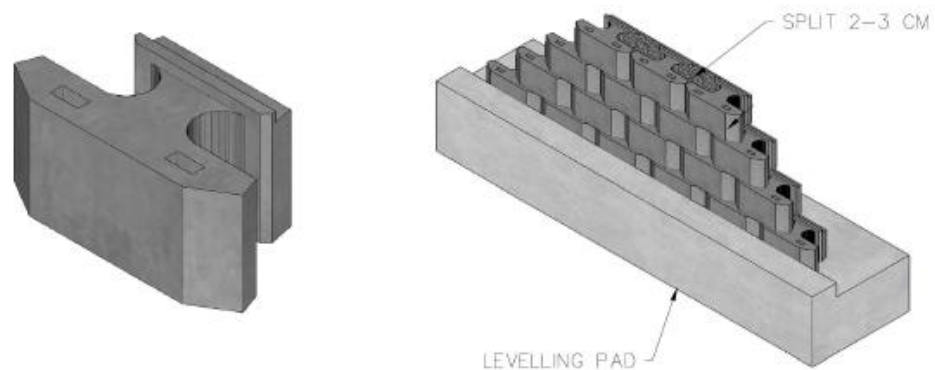
Penutup muka dapat dibedakan menjadi dua kelompok besar, yaitu penutup muka kaku dan penutup muka lentur. Berbagai tipe penutup muka utama dijelaskan sebagai berikut (SNI 8460:2017):

- a) Panel beton pracetak segmental memiliki berbagai bentuk dan ukuran, dengan ukuran tipikal tinggi 150 cm lebar 150 cm–300 cm, serta ketebalan minimum 140 cm. Bentuk yang umum dijumpai adalah bujur sangkar, persegi empat, persegi lima, persegi enam, dan tanda tambah;
- b) Unit dinding blok modular cetak kering berukuran relatif kecil dengan berat per unit 15 kg–50 kg. Tinggi per unit 10 cm–20 cm, lebar 20 cm–40 cm, dan tebal 20 cm–60 cm. Unit dinding blok modular dipasang tanpa mortar, dimana unit–unit yang

berdekatan dihubungkan dengan paku geser. Penutup muka tipe ini biasanya dipasangkan dengan perkuatan geosintetik, sebagian besar menggunakan geogrid;

- c) Penutup muka terbuat dari baja berbentuk setengah silinder. Ringan, sehingga cocok untuk daerah yang sulit pencapaiannya
- d) Beronjong dapat digunakan sebagai penutup muka dimana sebagai perkuatan umumnya digunakan anyaman kawat yang dilas (*welded wire mesh*), rangka baja yang dilas, geogrid, dan geotekstil.
- e) Penutup muka geosintetik dipasang dengan cara menekuk geosintetik 180° dan mengembalikannya ke arah belakang hingga membentuk permukaan lereng. Cara pemasangan yang sama juga digunakan untuk penutup muka menggunakan anyaman kawat yang dilas, geogrid, dan lainnya. Sebagai pelindung dari sinar ultraviolet, dapat digunakan beton semprot, atau penanaman vegetasi. Dalam hal digunakan secara permanen maka durabilitas atau ketahanan geotekstil untuk konstruksi dinding MSE harus diperhitungkan.

Pada penelitian ini tipe penutup muka yang akan diteliti yaitu unit dinding blok modular cetak (*Modular Block*) dengan tampak pada gambar berikut:



Gambar 2. 9 Detail *Modular Block*
(Sumber: Jababeka)

2.8.4 Tanah Timbunan yang Diperkuat

Tanah timbunan pada sistem dinding MSE ialah tanah timbunan pilihan. Umumnya, tanah timbunan yang digunakan merupakan tanah berbutir (non–kohesif) tanpa bahan organik atau material perusak lainnya. (Direktorat Bina Teknik , 2009) menyarankan kriteria tanah timbunan untuk sistem dinding MSE seperti pada Tabel 2.8. Tanah timbunan dipadatkan hingga mencapai 95% berat volume kering (γ_d) pada kadar air optimum.

Tabel 2.8 Kriteria tanah timbunan untuk dinding MSE

| Ukuran Saringan | Persen Lolos ^(a) |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| 102 mm (4 inchi) ^(a,b) | 100 |
| 0,425 mm (No.40) | 0 – 60 |
| 0,075 mm (No. 200) | 0 – 15 |

(Sumber: Direktorat Bina Teknik, 2009)

Indeks Plastisitas (PI) ≤ 6 , mengacu pada SNI 03-1966-1990 (AASHTO T 90)

Soundness: bahan bebas dari serpih atau tanah dengan durabilitas rendah lainnya. Bahan harus mempunyai suatu kehilangan ketahanan magnesium sulfat $< 30\%$ setelah 4 siklus atau sodium sulfat $< 15\%$ setelah 5 siklus (mengacu pada AASHTO T-104).

Catatan:

- a c_u harus ≥ 4
- b Direkomendasikan agar ukuran butir maksimum untuk bahan ini dikurangi sampai 19 mm (3/4 inchi) untuk geosintetik serta perkuatan yang dilapisi epoksi atau PVC, kecuali dilakukan pengujian untuk mengevaluasi kerusakan saat pelaksanaan akibat kombinasi bahan dan perkuatannya.

2.8.5 Kriteria Desain

Beberapa kriteria desain harus ditetapkan terlebih dahulu sebelum melakukan perencanaan dinding MSE.

(Berg *et al.* , 2009) memberikan saran untuk kriteria dalam perencanaan dinding MSE, yaitu:

1. Batasan perencanaan dan tinggi dinding.
2. Batas kemiringan permukaan dinding.
3. Panjang tulangan yang digunakan sebagai perkuatan dinding MSE. Untuk beberapa kondisi, panjang tulangan yang direkomendasikan dapat dilihat pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Panjang minimal tulangan

| Kasus | Rasio L/H Minimum |
|--|--------------------------|
| Pembebanan statis dengan beban lalu lintas | 0,7 |
| Pembebanan tambahan oleh lereng miring | 0,8 |
| Pembebanan oleh pengaruh gempa | 0,8 sampai 1,1 |

(Sumber: Berg *et al.*, 2009)

4. Beban eksternal, yaitu beban yang disebabkan oleh beban tambahan oleh tanah, pijakan bangunan atau fondasi, dan lalu lintas. Untuk beban lalu lintas, digunakan pendekatan sebagai beban seragam yang ekuivalen dengan 0,6 m di atas tanah.
5. Kedalaman tanam dinding yang mempertimbangkan kuat dukung tanah, penurunan, dan kestabilan lereng. (Berg *et al.*, 2009) menyarankan kedalaman standar sampai puncak *levelling pad* seperti pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Kedalaman tanah minimal MSE *wall*

| Kemiringan Di Depan Dinding | Kedalaman Minimal (m) |
|------------------------------------|------------------------------|
| Seluruh tipe geometri | 0,6 |
| Horizontal (dinding) | H/20 |
| Horizontal (abutmen) | H/10 |
| 3H : 1V | H/10 |
| 2H : 1V | H/7 |
| 1,5H : 1V | H/5 |

(Sumber: Berg *et al.*, 2009)

Menurut (Berg *et al.*, 2009), struktur khusus seperti abutmen harus dirancang dengan masa layan mencapai 75 tahun. Perhitungannya menggunakan metode *Load Resistance Factor Design* (LRFD) yang mengintegrasikan kombinasi beban tetap dan sementara. Komponen beban tetap terdiri dari tekanan tanah horizontal (EH), beban tambahan (ES), serta tekanan vertikal timbunan (EV). Sementara itu, beban sementara mencakup gaya gesek kendaraan (CT), beban seismik (EQ), dan beban lalu lintas (LL). Detail kombinasi dan faktor beban untuk MSE *wall* masing-masing merujuk pada tabel berikut

Tabel 2.11 Kombinasi pembebanan untuk MSE *wall*

| Kombinasi Beban | EH ES EV | LL LS | Opsional | |
|--------------------|----------------|---------------|----------|------|
| | | | EQ | CT |
| Kuat I | γ_p | 1,75 | - | - |
| Kondisi ekstrem I | γ_p | γ_{EQ} | 1,00 | - |
| Kondisi ekstrem II | γ_p | 0,50 | - | 1,00 |
| Daya Layan I | 1,00 | 1,00 | - | - |

Catatan :

γ_p = faktor beban untuk beban tetap

γ_{EQ} = faktor beban untuk beban hidup yang diterapkan bersamaan dengan beban gempa

EH = tekanan tanah horizontal

ES = beban tambahan

EV = tekanan tanah vertikal

EQ = beban seismik

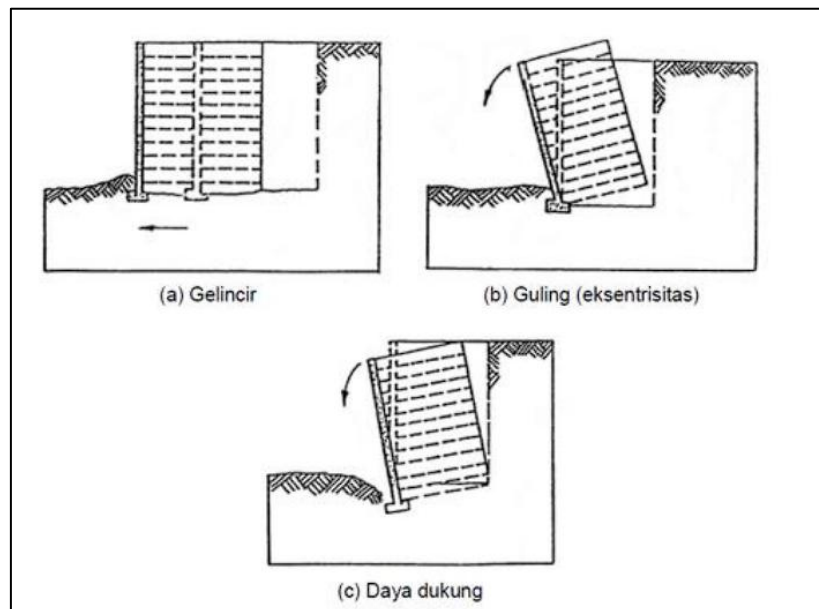
CT = gaya gesek kendaraan

Tabel 2.12 Faktor untuk beban tetap γ_p

| Tipe Beban | Faktor Beban | |
|--------------------------------------|--------------|----------|
| | Minimal | Maksimal |
| DC : Komponen dan bangunan pelengkap | 0,9 | 1,25 |
| EH : Aktif | 0,9 | 1,50 |
| EV : Stabilitas global | N/A | 1,00 |
| Dinding penahan dan abutmen | 1,00 | 1,35 |
| ES : Tekanan tanah tambahan | 0,75 | 1,50 |

2.8.6 Stabilitas Eksternal

Analisis stabilitas eksternal meliputi stabilitas geser gelincir pada fondasi, stabilitas guling akibat eksentrisitas, dan stabilitas daya dukung yang diilustrasikan pada Gambar 2.10. Pada kondisi tertentu, nilai faktor aman terhadap keruntuhan eksternal dapat dipilih lebih rendah dari hasil analisis yang diperoleh, misalnya akibat fleksibilitas struktur dinding MSE yang dapat mereduksi potensi keruntuhan guling. (Berg *et al.*, 2009) memberikan faktor tahanan stabilitas eksternal yang disajikan dalam Tabel 2.11.



Gambar 2. 10 Stabilitas eksternal dinding MSE
(Sumber: Berg *et al.*, 2009)

Tabel 2.13 Faktor tahanan stabilitas eksternal

| Kontrol Stabilitas | Kondisi | Faktor Tahanan (ϕ) |
|---------------------------------------|---|---------------------------|
| Kuat dukung tanah geser atau gelincir | Informasi parameter geoteknik lengkap | 0,65 |
| | atau lereng tidak mendukung bangunan struktural | 1,00 |
| Stabilitas global | Informasi parameter geoteknik terbatas | 0,75 |
| | atau lereng mendukung bangunan struktural | 0,65 |

a. Stabilitas Geser

Analisis stabilitas geser dipengaruhi oleh gaya–gaya lateral yang bekerja pada sistem dinding MSE. Dalam perhitungan hanya memperhatikan gaya–gaya lateral tanah di belakang dinding, sedangkan tekanan tanah pasif di depan dinding diabaikan karena berpotensi hilang akibat erosi ataupun akibat pekerjaan manusia.

Gaya penahan nominal per satuan panjang yang bekerja di belakang zona perkuatan dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.31) dan gaya pendorong nominal dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.32).

$$R_r = \gamma_{EV} V_l \times \mu \quad (2.31)$$

dengan,

R_r = gaya penahan nominal terfaktor (kN/m)

γ_{EV} = faktor beban tetap vertikal

V_l = resultan gaya aksial (kN/m)

μ = koefisien gesek internal terkecil dari $\tan \phi_{fondasi}$,
 $\tan \phi_{perkuatan}$, $\tan \phi_{\rho}$.

$$P_d = \gamma_{EH} F_1 + \gamma_{LS} F_2 \quad (2.32)$$

yang mana,

$$F_1 = \frac{1}{2} \gamma_b H^2 K_a \quad (2.33)$$

$$F_2 = qHK_a \quad (2.34)$$

dengan,

| | |
|---------------|--|
| P_d | = gaya pendorong terfaktor (kN/m) |
| F_1 | = resultan gaya tekanan tanah lateral (kN/m) |
| F_2 | = resultan gaya tambahan (kN/m) |
| γ_{EH} | = faktor beban tetap horizontal |
| γ_{LS} | = faktor beban sementara |
| K_a | = koefisien tanah aktif |
| γ_b | = berat volume tanah (kN/m ³) |
| H | = ketinggian dinding (m) |
| q | = beban hidup (kN) |

Prinsip stabilitas geser ialah kesetimbangan antara gaya penahan dan gaya pendorong yang bekerja pada lereng seperti pada Gambar 2.11. Untuk mencapai kondisi stabil terhadap geser, gaya penahan terfaktor harus lebih besar dari gaya pendorong, atau dapat dituliskan menjadi nilai faktor aman seperti Persamaan (2.35).

$$SF_{\text{geser}} = \frac{\text{Gaya penahan terfaktor}}{\text{Gaya pendorong terfaktor}} = \frac{R_r}{P_d} \geq 1,0 \quad (2.35)$$

horizontal yang besar terutama pada tanah kohesif yang lunak, struktur harus memenuhi syarat stabilitas geser lokal yang dituliskan dalam Persamaan (2.38)

$$\gamma_r H \leq 3c_u \quad (2.38)$$

dengan,

γ_r = berat volume tanah perkuatan (kN/m³)

C_u = kohesi tanah fondasi (kN/m²)

H = ketinggian dinding (m)

Untuk melakukan evaluasi terhadap stabilitas geser global, tegangan vertikal pada dasar fondasi dihitung menggunakan Persamaan (2.39). Distribusi gaya yang terjadi diasumsikan menggunakan metode Meyerhof, sehingga tegangan vertikal terfaktor untuk lereng belakang horizontal yang dapat dijabarkan menjadi Persamaan (2.40).

$$\sigma_v = \frac{\Sigma V}{L-2e} \quad (2.39)$$

$$\sigma_v = \frac{\gamma_{EV-Max} V_1 + \gamma_{LS} q L}{L-2e_b} \quad (2.40)$$

yang mana e_b dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.41)

$$e_b = \frac{\gamma_{EH-MAX} F_1 \left(\frac{H}{3}\right) + \gamma_{LS} F_{q-LS} \left(\frac{H}{2}\right)}{\gamma_{EV-Max} V_1 + \gamma_{LS} q L} \quad (2.41)$$

dengan,

σ_v = tekanan vertikal seragam (kN/m)

ΣV = jumlah gaya vertikal (kN)

L = lebar fondasi (m)

e_b = eksentrisitas untuk stabilitas daya dukung (m)

Perlu diperhatikan, apabila eksentrisitas bernilai negatif, maka nilai $L-2e$ yang digunakan sama dengan L . Berikutnya tekanan vertikal seragam dapat disimbolkan menjadi q_u sebagai penyimbolan umum.

Daya dukung nominal tanah fondasi dapat dihitung menggunakan pendekatan Terzaghi pada Persamaan (2.42) yang kemudian dikalikan dengan faktor daya dukung atau dapat dinyatakan dalam Persamaan (2.42).

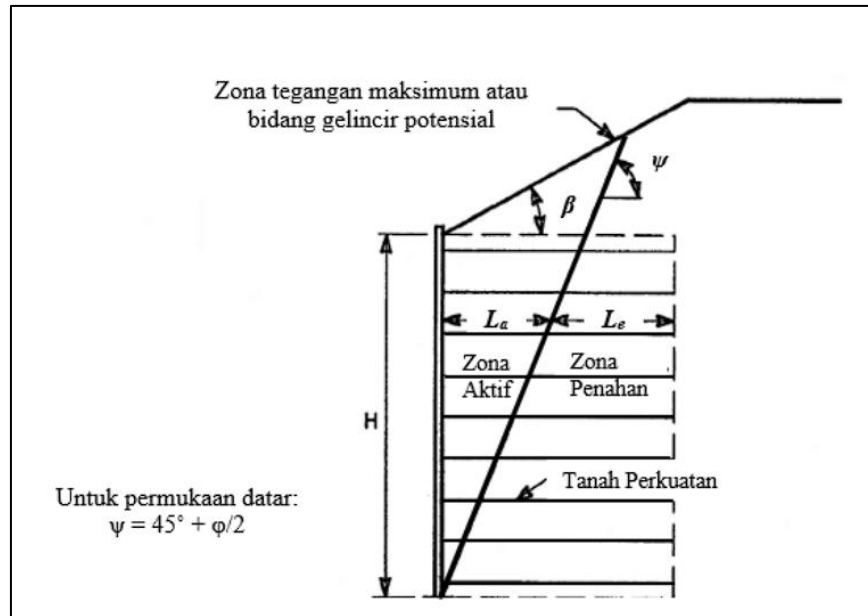
$$q_R = \phi q_n \quad (2.42)$$

dengan ϕ adalah faktor daya dukung sesuai Tabel 2.11

Struktur dianggap aman terhadap keruntuhan akibat daya dukung apabila $q_R \geq q_u$. Jika tidak terpenuhi, diperlukan pelebaran dasar fondasi atau mengurangi tegangan vertikal yang bekerja.

2.8.7 Stabilitas Internal

Perencanaan dinding MSE yang memperhitungkan keruntuhan internal meliputi penentuan gaya tarik maksimum dan lokasinya di sepanjang bidang gelincir kritis. Selain itu, kapasitas cabut dan kuat tarik yang dihasilkan oleh perkuatan juga harus dipertimbangkan. Bidang gelincir paling kritis pada dinding dengan kemiringan lebih besar dari 8° yang menggunakan perkuatan yang dapat memanjang (*extensible*) diilustrasikan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Lokasi potensi bidang gelincir untuk stabilitas internal tulangan yang tidak dapat memanjang (*extensible*) (Sumber: Berg *et al.*, 2009)

Stabilitas internal meliputi stabilitas tarik dan stabilitas cabut perkuatan. Dalam penelitian ini, analisis menggunakan gaya-gaya terfaktor untuk mengevaluasi stabilitas internal.

a. Stabilitas Tarik

Gaya tarik maksimum dipengaruhi oleh modulus, kemampuan memanjang dan kepadatan perkuatan. Berdasarkan hal tersebut, hubungan antara jenis perkuatan dengan tekanan overburden ditunjukkan pada Gambar 2.13.

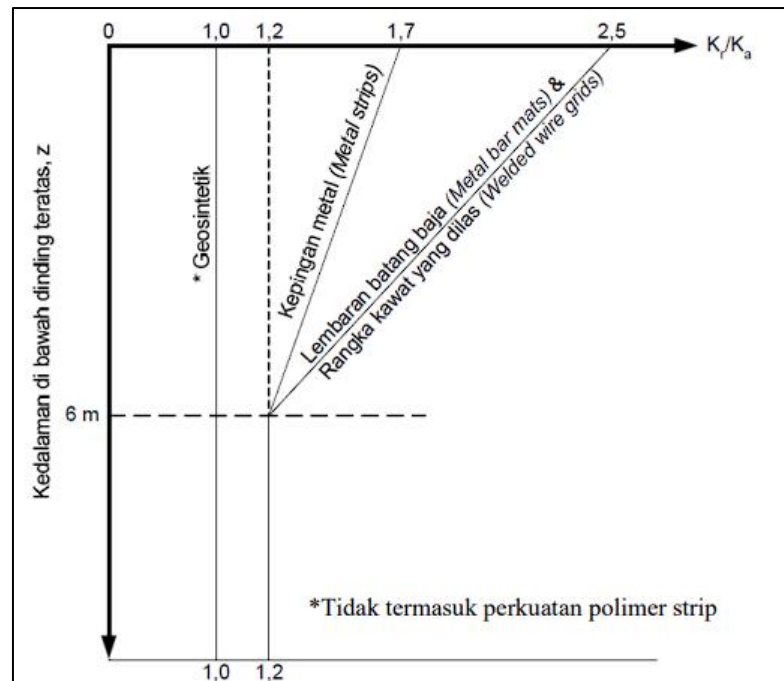
Tegangan horizontal (σ_H) pada tiap ketinggian lapisan perkuatan dapat dihitung dengan Persamaan (2.43). Untuk dinding MSE dengan beban hidup pada lereng belakang horizontal, tegangan horizontal (σ_H) dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.44).

$$\sigma_H = K_r[\sigma_v] + \Delta\sigma_H \quad (2.43)$$

$$\sigma_H = K_r[\gamma_r(z + S_{eq})\gamma_{EV-MAX}] \quad (2.44)$$

dengan,

- K_r = koefisien tekanan lateral di zona perkuatan
- σ_v = tegangan vertikal terfaktor pada kedalaman yang ditinjau (kN/m)
- $\Delta\sigma_H$ = tegangan horizontal terfaktor tambahan (kN/m)
- γ_r = berat jenis tanah perkuatan (kN/m³)
- z = kedalaman sisi atas perkuatan (m)
- h_{eq} = tinggi ekuivalen beban, umumnya diasumsikan 0,6 (m)



Gambar 2.13 Ratio tegangan terhadap kedalaman dinding MSE (Sumber: Direktorat Bina Teknik, 2009)

Gaya tarik maksimum (T_{max}) pada setiap lapisan perkuatan per satuan lebar dinding dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.45).

$$T_{max} = \sigma_H S_v \quad (2.45)$$

Dengan S_v adalah jarak vertikal tulangan (m).

Untuk menghitung tahanan tarik terfaktor perkuatan, digunakan Persamaan (2.46) dengan faktor tahanan sesuai Tabel 2.12.

$$T_r = \phi T_{al} \quad (2.46)$$

$$T_{al} = \frac{T_{ult}}{RF_{ID} \times RF_{CR} \times RF_D} \quad (2.47)$$

dengan,

T_{ult} = kuat tarik ultimit (kN/m)

ϕ = faktor tahanan tarik

RF_{ID} = faktor reduksi pemasangan

RF_{CR} = faktor reduksi rayapan

RF_D = faktor reduksi daya tahan

Tabel 2.14 Faktor tahanan tarik geosintetik pada dinding MSE

| Kondisi Pembebanan | Faktor Tahanan |
|--|----------------|
| Beban statis | 0,90 |
| Kombinasi beban statis/gempa | 1,20 |
| Kombinasi beban statis/benturan palang lalu lintas | 1,20 |

* Tidak tersedia di AASHTO

Stabilitas tarik internal akan terpenuhi apabila tahanan tarik terfaktor lebih besar dari gaya tarik maksimal, dapat dituliskan sebagai Persamaan (2.48). Apabila yang terjadi sebaliknya, dibutuhkan pengaturan susunan perkuatan atau menggunakan perkuatan dengan tahanan tarik nominal yang lebih besar.

$$T_r \geq T_{max} \quad (2.48)$$

dengan T_r adalah tahanan tarik nominal dan T_{max} adalah gaya tarik maksimum yang terjadi yang dinyatakan dalam kN/m.

b. Stabilitas Cabut

Stabilitas cabut dapat terpenuhi apabila panjang efektif cabut terfaktor lebih besar atau sama dengan beban tarik terfaktor yang dialami perkuatan (T_{max}). Keruntuhan terhadap cabut dapat dievaluasi menggunakan Persamaan (2.49) dengan mempertimbangkan faktor tahanan cabut sesuai Tabel 2.13.

$$\phi L_e \geq \frac{T_{max}}{F^* \alpha \sigma_v C R_c} \quad (2.49)$$

dengan,

- L_e = panjang zona tahanan tertanam (m)
- T_{max} = gaya tarik maksimal perkuatan (kN/m)
- ϕ = faktor tahanan cabut
- F^* = faktor tahanan tarik, untuk geosintetik sama dengan $2/3 \tan \phi$
- α = faktor koreksi skala
- σ_v = tegangan vertikal nominal, termasuk beban tambahan terdistribusi (kN/m)
- C = 2 untuk perkuatan jenis pita, rangka, dan lembaran
- R_c = rasio liputan perkuatan, digunakan 1 untuk perkuatan lembar menerus

Tabel 2.15 Faktor tahanan cabut geosintetik pada dinding MSE

| Kondisi Pembebanan | Faktor Tahanan |
|--|----------------|
| Beban Statis | 0,90 |
| Kombinasi beban statis/gempa | 1,2 |
| Kombinasi beban statis/benturan palang lalu lintas | 1,00 |

* Tidak tersedia di AASHTO

Panjang total tulangan perkuatan (L) yang dibutuhkan untuk stabilitas internal dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.50) pada kondisi lereng dinding belakang horizontal, penutup

muka vertikal, dan menggunakan perkuatan yang dapat memanjang (*extensible*).

$$L = L_a + L_e \quad (2.50)$$

$$L_a = (H - Z) \tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.51)$$

Dengan Z adalah kedalaman sisi atas perkuatan yang dalam m.

2.8.8 Stabilitas Global

Stabilitas global ditentukan dengan menggunakan metode pias atau rotasional. Dinding tanah yang diperkuat diasumsikan sebagai bagian yang kaku dan hanya bidang keruntuhan yang terjadi di luas massa tanah tersebut yang dapat dipertimbangkan. Stabilitas global dapat dibagi menjadi stabilitas keseluruhan dan stabilitas gabungan. Kegagalan keseluruhan terjadi pada zona tanah perkuatan, sedangkan kegagalan gabungan terjadi pada area luar zona perkuatan. Nilai faktor aman untuk stabilitas global mengacu pada AASHTO (2007).

2.8.9 Stabilitas Terhadap Gempa

Keruntuhan yang terjadi akibat gempa sangat dipengaruhi oleh percepatan gempa yang terjadi di lokasi tinjauan. Dalam analisis stabilitas terhadap gempa, digunakan metode Mononobe–Okabe (M–O) dalam (Berg *et al.*, 2009). Kombinasi pembebanan yang memperhitungkan pengaruh gempa termasuk ke dalam kondisi ekstrem *I* (*Extreme Event I*). Beban akibat gempa akan mempengaruhi stabilitas eksternal dan internal.

a. Stabilitas eksternal

Penentuan zona gempa mengacu pada zonasi gempa yang dikeluarkan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Pemukiman Kementerian Pekerjaan Umum. Dari data spektral gempa yang diperoleh dapat dihitung percepatan maksimum (k_h)

dengan Persamaan (2.52) dan percepatan rata-rata gempa dengan Persamaan (2.53).

$$k_h = F_{PGA} (PGA) \times PSA \quad (2.52)$$

$$k_{av} = a k_{max} \quad (2.53)$$

yang mana, nilai a diperoleh dari Persamaan (2.54).

$$a = 1 + 0,01H \left[0,5 \left(\frac{F_v \cdot S_I}{k_{max}} \right) - 1 \right] \quad (2.54)$$

dengan,

k_{max} = percepatan maksimum gempa (g)

k_{av} = percepatan rata-rata gempa (g)

F_{PGA} = amplifikasi percepatan

PGA = percepatan gempa puncak (g)

a = koefisien reduksi akibat ketinggian dinding

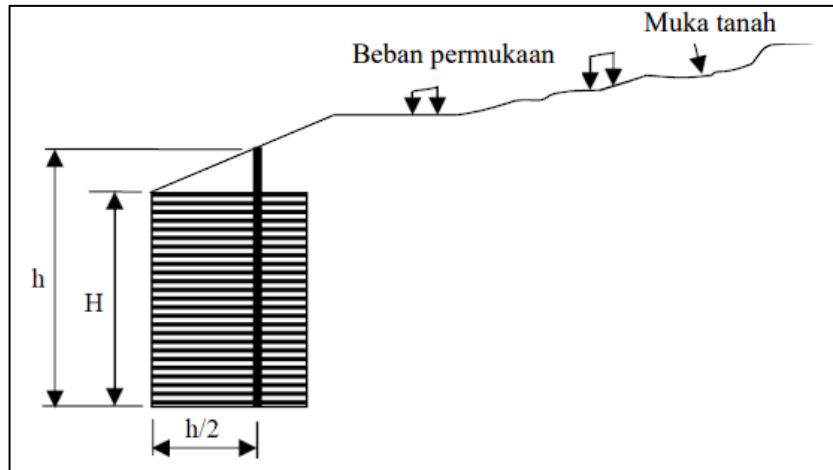
S_I = percepatan rata-rata gempa (g)

F_v = koefisien situs

Ketinggian (h) yang ditinjau dalam analisis seismik sesuai ditentukan berdasarkan Persamaan (2.55) dan diilustrasikan dalam Gambar 2.14.

$$h = H + \frac{\tan I (0,5 H)}{(1 - 0,5 \tan I)} \quad (2.55)$$

dengan I adalah sudut kemiringan lereng belakang.



Gambar 2.14 Ketinggian tinjau dalam analisis seismik
(Sumber: Berg *et al.*, 2009)

Daya dorong total (P_{AE}) dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.56) dan gaya inersia horizontal yang bekerja (P_{IR}) menggunakan Persamaan (2.58).

$$P_{AE} = 0,5 (K_{AE}) \gamma_b^{h^2} \quad (2.56)$$

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\phi'_b - \zeta - 90 + \theta)}{\cos \zeta \cos^2(90 - \theta) \cos(\delta + 90 - \theta + \zeta) \left[I + \sqrt{\frac{\sin(\phi'_b + \delta) \sin(\phi'_b - \zeta - I)}{\cos(\delta + 90 - \theta + \zeta) \cos(I - 90 + \theta)}} \right]^2} \quad (2.57)$$

$$P_{IR} = 0,5 (k_{av})(W) \quad (2.58)$$

dengan,

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{kh}{1-kv} \right)$$

δ = sudut gesek internal dinding, lebih rendah dari sudut gesek internal tanah perkuatan dan tanah timbunan tertahan ($^{\circ}$)

I = sudut kemiringan lereng belakang dinding ($^{\circ}$)

ϕ'_b = sudut gesek internal tanah timbunan tertahan ($^{\circ}$)

θ = sudut kemiringan permukaan dinding ($^{\circ}$)

Asumsi yang digunakan di atas ialah nilai k_h sama dengan nilai k_{max} , sedangkan nilai k_v sama dengan nol, serta P_{IR} bekerja pada pusat massa dinding.

Stabilitas geser akibat beban gempa dapat dievaluasi menggunakan Persamaan (2.59).

$$T_{HF} = P_{AE} (\cos \delta) + P_{IR} + \gamma_{EQ} (q_{LS}) K_{AE} H \quad (2.59)$$

Kemudian, gaya vertikal yang bekerja dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.60).

$$\Sigma V = W + P_{AE} \sin \delta + \text{beban tambahan nominal} \quad (2.60)$$

Cek stabilitas geser terhadap pengaruh gempa menggunakan Persamaan (2.61).

$$CDR_{\text{geser}} = \frac{R_{\tau}}{T_{HF}} \quad (2.61)$$

dengan R_{τ} adalah tahanan geser nominal (kN).

Untuk evaluasi stabilitas guling, T_{HF} diterapkan pada $h/2$ untuk kontrol terhadap eksentrisitas. Sedangkan, untuk stabilitas dukung tanah, evaluasi menggunakan rasio tegangan vertikal seragam dengan kuat dukung tanah saat lebar penuh.

b. Stabilitas Internal

Analisis stabilitas internal dengan pengaruh gempa mengasumsikan bahwa irisan aktif menimbulkan beban dinamik internal (P_i) yang dapat ditentukan menggunakan Persamaan (2.62). Gaya inersia yang bekerja akan terdistribusi secara merata di setiap lapisan, sehingga gaya dinamik terfaktor

dihitung untuk setiap lapisan dengan Persamaan (2.63) dan gaya dinamik total dengan Persamaan (2.64).

$$P_i = k_{av} W_a \quad (2.62)$$

$$T_{md} = P_i / n \quad (2.63)$$

$$T_{total} = T_{max} + T_{md} \quad (2.64)$$

dengan W_a adalah berat tanah yang berada di zona aktif dan n adalah jumlah lapisan perkuatan di zona perkuatan.

Stabilitas tarik dengan pengaruh gempa dapat dievaluasi menggunakan persamaan persamaan berikut.

$$S_{rs} \geq \frac{T_{max} RF}{\phi R_c} \quad (2.65)$$

$$S_{rt} = \frac{T_{md} RF_{ID} RF_D}{\phi R_c} \quad (2.66)$$

$$T_{max} = S_{rs} + S_{rt} \quad (2.67)$$

dengan,

ϕ = faktor tahanan kombinasi beban statis/dinamik

S_{rs} = tahanan tarik ultimit perkuatan untuk menahan beban statis (kN/m)

S_{rt} = tahanan tarik ultimit perkuatan untuk menahan beban dinamik (kN/m)

Evaluasi stabilitas cabut dengan pengaruh gempa dapat menggunakan Persamaan (2.68) berikut.

$$L_e \geq \frac{T_{total}}{\phi (0,8F^* a\sigma_v CR_c)} \quad (2.68)$$

dengan,

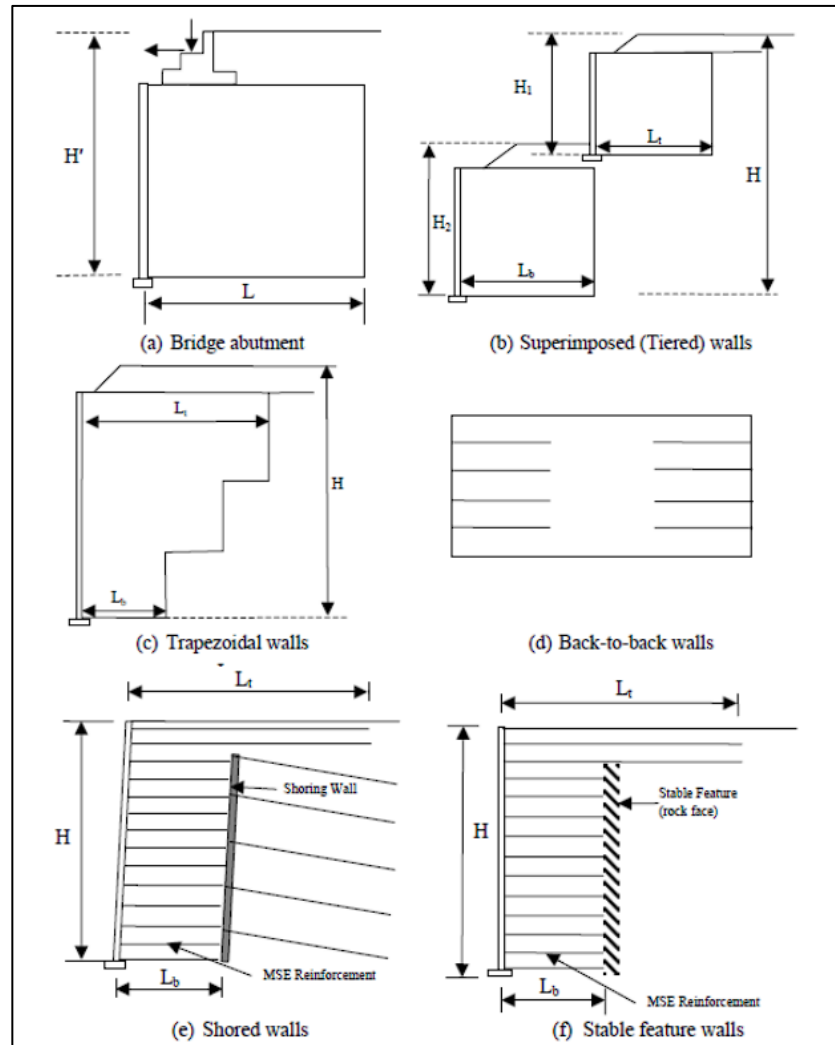
| | |
|-------------|---|
| L_e | = panjang tulangan di zona perkuatan (m) |
| T_{total} | = gaya tarik maksimum (kN/m) |
| ϕ | = faktor tahanan kombinasi beban statis/dinamik |
| F^* | = faktor tahanan tarik, direduksi 80% terhadap kondisi statis |
| α | = faktor koreksi skala |
| σ_v | = tegangan vertikal tak terfaktor (kN/m) |
| C | = faktor geometri penampang |
| R_c | = rasio penampang tulangan |

2.8.10 Desain MSE Wall dengan geometri yang kompleks

Penggunaan MSE wall tidak hanya dapat digunakan pada geometri yang sederhana, namun juga dapat diaplikasikan pada bentuk-bentuk geometri yang kompleks. Menurut (Berg *et al.*, 2009), yang termasuk geometri kompleks (Gambar 2.15) ialah:

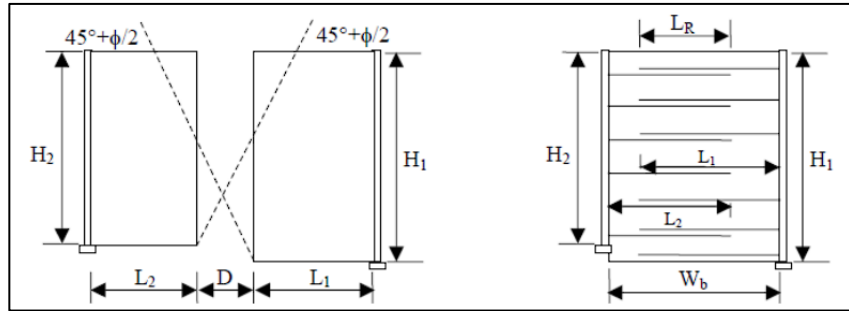
- Abutmen jembatan dengan dinding MSE
- Dinding MSE berjenjang (*superimposed walls*)
- Dinding trapesoidal (*trapezoidal walls*)
- Dinding berhadapan (*back-to-back walls*)
- Shored walls*
- Stable feature walls*

Bentuk dan letak garis gaya tarik maksimum umumnya bergantung pada geometri dan beban yang bekerja pada struktur dinding. Garis gaya tarik maksimum cukup sulit ditentukan, sehingga biasanya hanya diasumsikan saja. Pada kondisi tertentu sangat sulit melakukan analisis stabilitas internal dan eksternal secara terpisah. Oleh karena itu, banyak yang melakukan analisis dinding dengan geometri yang kompleks atau kombinasi dengan hanya memperhatikan stabilitas global saja.



Gambar 2.15 Dinding dengan geometri kompleks
(Sumber: Berg *et al.*, 2009)

Tipe dinding yang umum digunakan untuk jalan raya ialah *back-to-back walls* atau dinding BBMSE. Terdapat dua kasus dalam analisis dinding BBMSE, diilustrasikan dalam Gambar 2.16.



Gambar 2. 16 Dinding BBMSE
(Sumber: Berg *et al.*, 2009)

Pada kasus 1, tersedia jarak D di antara kedua dinding. Besarnya nilai D dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.69).

$$D = H_1 \tan \left(45^\circ - \phi/2 \right) \quad (2.69)$$

dimana H_1 adalah tinggi dinding dalam m dan ϕ adalah sudut gesek internal dalam derajat.

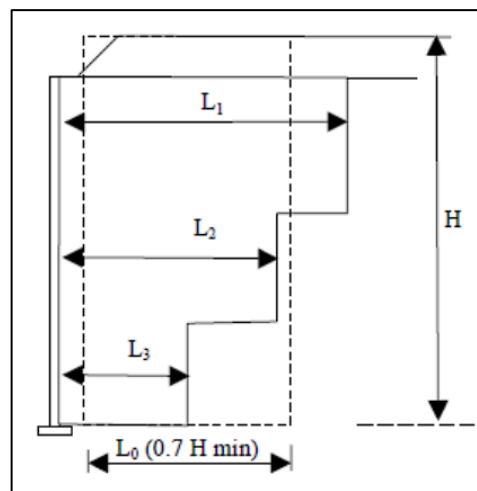
Berdasarkan Gambar 2.16 dapat dilihat bahwa tidak adanya perkuatan yang tumpang tindih, sehingga gaya dorong aktif dimobilisasi oleh perkuatan dinding masing-masing sisi. Namun pada kasus 2, terjadi tumpang tindih perkuatan dari masing-masing sisi. Panjang perkuatan yang saling tumpang tindih ini (LR) harus lebih besar dari $0,3H_2$, dimana H_2 ialah tinggi dinding terendah dari dinding berhadapan. Pada kasus 2 tidak ada gaya lateral akibat tanah di belakang dinding yang harus diperhitungkan dalam analisis stabilitas eksternal.

Apabila tanah dasar merupakan tanah keras, tipe dinding TMSE (*Trapezoidal Mechanically Stabilized Earth Walls*) dapat digunakan. Salah satu karakteristik tanah dasar yang memenuhi syarat untuk konstruksi dinding TMSE ialah nilai NSPT tanah dasar lebih besar dari 50 atau merupakan batuan. Dalam merancang dinding trapesoidal diperlukan dua analisis, yaitu:

1. Desain menggunakan penyederhanaan untuk menentukan stabilitas internal dan eksternal.
2. Analisis stabilitas lereng dilakukan dengan menggunakan program stabilitas tanah yang diperkuat untuk memeriksa stabilitas global.

Adapun penyederhanaan yang digunakan dalam desain dinding TMSE ialah sebagai berikut.

1. Dinding diwakili oleh blok-blok persegi panjang yang memiliki tinggi total dan luas penampang sama dengan bagian blok persegi panjang utuh yang digunakan dalam analisis stabilitas eksternal, diilustrasikan dalam Gambar 2.17.



Gambar 2. 17 Dinding TMSE
(Sumber: Berg *et al.*, 2009)

2. Garis gaya tarik maksimum yang terjadi sama seperti pada dinding persegi panjang utuh (bilinear atau linear sesuai dengan ekstensibilitas perkuatan).
3. Panjang dasar minimum (L_3) sama dengan $0,4H$ atau $2,5$ m, dipilih nilai yang lebih besar. Perbedaan panjang untuk tiap zona kurang dari $0,15H$.

Analisis stabilitas internal pada dinding TMSE dilakukan dengan membagi dinding dalam bagian persegi panjang dengan panjang tiap zona mengikuti penyederhanaan seperti poin 1 sampai 3 di atas. Perhitungan mengikuti analisis internal seperti pada dinding MSE sederhana.

2.9 Analisis Stabilitas Lereng

Hardiyatmo (2014b) menyatakan analisis stabilitas lereng didasarkan pada konsep keseimbangan plastis batas (*limit plastic equilibrium*) untuk menentukan faktor aman dari bidang runtuh potensial. Beberapa asumsi yang digunakan dalam analisis stabilitas lereng, yaitu:

1. Lereng mengalami runtuh di sepanjang permukaan bidang runtuh tertentu dan ditinjau dalam bidang dua dimensi.
2. Massa tanah yang runtuh atau longsor merupakan benda masif,
3. Kuat geser tanah bersifat isotropis, dan
4. Faktor aman mempertimbangkan tegangan geser rata-rata sepanjang bidang runtuh potensial dan kuat geser tanah rata-rata sepanjang permukaan runtuh.

Faktor aman didefinisikan sebagai nilai rasio antara gaya yang menahan tanah untuk mempertahankan kedudukannya dan gaya yang menggerakkan tanah, atau dapat dinyatakan dalam Persamaan (2.70).

$$F = \tau/\tau_d \quad (2.70)$$

dengan τ adalah tahanan geser maksimum yang dapat diberikan oleh tanah dan τ_d adalah tegangan geser yang timbul akibat gaya berat tanah yang akan runtuh. Berdasarkan teori Mohr-Coulomb pada Persamaan (2.11), tegangan geser yang terjadi (τ_d) akibat beban tanah dan beban lain dapat ditulis menjadi Persamaan (2.71).

$$\tau_d = c_d + \sigma \tan \phi_d \quad (2.71)$$

Apabila Persamaan (2.70) dan Persamaan (2.11) disubstitusi ke Persamaan (2.71) akan menghasilkan Persamaan (2.72) berikut.

$$F = \frac{c + \sigma \tan \phi}{c_d + \sigma \tan \phi_d} \quad (2.72)$$

dengan c_d dan ϕ_d adalah kohesi dan sudut gesek internal tanah yang terjadi atau yang dibutuhkan untuk keseimbangan pada bidang runtuhnya.

Nilai faktor aman yang disarankan oleh AASHTO (2007) untuk kriteria lereng stabil disajikan dalam Tabel 2.16.

Tabel 2.16 Nilai faktor aman untuk lereng stabil menurut AASHTO

| Faktor Aman | Parameter |
|--------------------|--|
| 1,30 | Geoteknik tersedia dengan baik |
| 1,50 | Geoteknik kurang tersedia dengan baik |
| 1,50 | Dinding/lereng mendukung elemen struktural |

(Sumber: AASHTO, 2007)

Selain itu, SNI 8460:2017 juga menyarankan faktor keamanan seperti pada tabel berikut

Tabel 2.17 Nilai faktor aman untuk lereng stabil menurut SNI 8460:2017

| Kategori Stabilitas | Mekanisme Kegagalan | Faktor Keamanan Minimum |
|----------------------------|--|--------------------------------|
| Eksternal | Geser Lateral (<i>Sliding</i>) | 1,5 |
| | Guling (<i>Overturning</i>) | 2,0 |
| | Daya Dukung (<i>Bearing Capacity</i>) | 2,5 |
| | Kegagalan Eksentrisitas | $e < L/6$ |
| Internal | Putus Tulangan (<i>Tensile Strength</i>) | 1,5 |
| | Cabut Tulangan (<i>Pullout</i>) | 1,5 |
| Global | Stabilitas Lereng Keseluruhan | 1,3 (Statis) |
| | | 1,1 (Gempa) |

(Sumber: SNI 8460:2017)

2.11 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga atau finite element method adalah suatu analisis numeris yang digunakan untuk menyelesaikan berbagai persoalan dalam bidang ilmu *engineering* seperti analisis deformasi, tegangan, regangan, transfer panas, dan permasalahan lainnya. Metode elemen hingga membagi model yang telah dibuat menjadi menjadi elemen-elemen kecil yang lebih sederhana, dan kemudian menerapkan persamaan yang mengontrol perilaku elemen-elemen tersebut untuk mendapatkan hasil yang sesuai diseluruh model. Kemajuan teknologi dan pengembangan *software* yang terus berlanjut membuat proses simulasi model desain menggunakan elemen hingga menjadi mudah dan cepat.

Secara umum, langkah-langkah dalam analisis metode elemen hingga adalah sebagai berikut.

1. Diskritisasi dan penentuan tipe elemen Diskritisasi merupakan sebuah langkah penting dalam analisis metode elemen hingga. Proses ini melakukan pembagian elemen yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen yang lebih kecil dengan batas tertentu. Tujuan proses ini adalah untuk menyederhanakan analisis dan meningkatkan akurasi hasil. Proses diskritisasi menghasilkan tiga komponen baru: nodal, elemen, dan garis nodal. Bentuk elemen pada setiap bidang dapat berbeda-beda tergantung pada proyeksi material terhadap sumbu koordinat. Elemen garis digunakan untuk material satu dimensi (1D). Elemen segitiga digunakan untuk material dua dimensi (2D). seperti plat atau lembaran.
2. Penentuan fungsi perpindahan
Setelah setiap elemen terbentuk, disusun matriks fungsi perpindahan pada setiap nodalnya. Matriks fungsi perpindahan disusun ke arah vertikal dan horizontal. Matriks perpindahan yang diperoleh masih dalam sumbu lokal. Pada elemen segitiga, terdapat dua perpindahan yang tidak diketahui yaitu u dan v pada titik P (x,y). Melalui pendekatan, terdapat perpindahan dengan persamaan sebagai berikut.

$$u(x,y) = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 y \quad (2.73)$$

$$v(x,y) = \alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6 y \quad (2.74)$$

Apabila Persamaan (2.73) dan (2.74) diubah dalam bentuk matriks, maka akan berbentuk sebagai berikut.

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \end{Bmatrix} \quad (2.75)$$

Atau dapat diubah ke bentuk lain seperti Persamaan (2.76)

$$\{U\} = [\phi] \{\alpha\} \quad (2.76)$$

Dimana:

$$\{U\} = [u, v]$$

$$\{\alpha\} = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4 \ \alpha_5 \ \alpha_6]$$

$$[\phi] = \text{matriks koordinat}$$

Selanjutnya, parameter *non-dimensional* tersebut akan dinyatakan pada fungsi *nodal degrees of freedom* dengan titik nodal n .

$$U_n = \alpha_1 + \alpha_2 x_n + \alpha_3 y_n \quad (2.77)$$

$$V_n = \alpha_4 + \alpha_5 x_n + \alpha_6 y_n \quad (2.78)$$

Persamaan (2.77) dan (2.78) dapat ditulis secara matriks menjadi persamaan berikut.

$$\begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \\ \frac{u_k}{v_i} \\ v_j \\ v_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_j & y_j & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_k & y_k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_i & y_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_j & y_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \end{bmatrix} \quad (2.79)$$

Apabila di inverse, Persamaan (2.79) akan menjadi seperti berikut.

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \end{bmatrix} = \frac{1}{2,4} \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \\ \frac{u_k}{v_i} \\ v_j \\ v_k \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

Persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi:

$$A = \frac{1}{2} x_j y_k \quad (2.81)$$

$$[H] = \begin{bmatrix} x_j y_k & 0 & 0 \\ -y_k & y_k & 0 \\ (x_j - y_k) & -x_k & x_j \end{bmatrix} \quad (2.82)$$

3. Penentuan matriks hubungan tegangan-regangan

Vektor tegangan dan vektor regangan dari setiap nodal yang terbentuk kemudian disusun untuk dibentuk hubungan antara tegangan regangan dan modulus material. Hasil perolehan matriks ini masih dalam sumbu lokal. Komponen tegangan dan regangan memiliki 6 komponen. Karena analisis dilakukan dalam model dua dimensi sehingga variasi ketebalan terhadap z dan arah melintang adalah konstan, maka komponen arah z dapat diabaikan.

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.83)$$

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.84)$$

Pada material linier, elastik, dan isotropik, sifat bahan dapat dinyatakan dengan hukum Hooke seperti pada persamaan berikut.

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_x \quad (2.85)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_y \quad (2.86)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy} \quad (2.87)$$

Ketiga persamaan di atas dapat diubah menjadi notasi matriks.

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.88)$$

Dalam idealisasi tegangan bidang 2 dimensi (z dianggap konstan), nilai regangan bidang dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x} \quad (2.89)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial y} \quad (2.90)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = \left(\frac{\partial u}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial y} \right) \quad (2.91)$$

Sehingga akan diperoleh:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_{21} & B_{22} & B_{23} & B_{24} \\ B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} & B_{21} & B_{22} & B_{23} & B_{24} \end{bmatrix} \{q\} \quad (2.92)$$

Atau bisa menjadi persamaan berikut.

$$\{\varepsilon\} = [B]\{q\} \quad (2.93)$$

Apabila regangan total sebagai jumlah tegangan elastik efektif dan terdapat residu sebelum beban diterapkan, maka tegangan dijabarkan seperti persamaan berikut.

$$\{\tau\} = [C]\{\varepsilon\} = [C](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) = [C]\{\varepsilon^e\} \quad (2.94)$$

$$[D] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{-\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{1-\nu} \end{bmatrix} \quad (2.95)$$

4. Penurunan persamaan elemen

Semua matriks hubungan yang telah dibuat pada pembahasan sebelumnya kemudian diturunkan untuk memperoleh formulasi kekakuan setiap elemen. Metode energi potensial minimum lazim digunakan untuk memperoleh formulasi ini.

5. Penggabungan matriks elemen lokal ke matriks elemen global

Formulasi yang telah diperoleh selanjutnya dikalikan matriks transformasi global untuk mengonversi seluruh persamaan sumbu lokal ke dalam sumbu global.

Terkait dengan elemen dua dimensi, tipe yang umum digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah analisis seperti *plane strain*, *plane stress*, dan *plate bending* adalah elemen segitiga dan elemen segiempat. Elemen segitiga adalah elemen yang paling mendekati untuk analisis dengan model geometri tak teratur seperti lapisan tanah. Sedangkan elemen segiempat biasa dipakai untuk memodelkan struktur yang geometrinya segiempat pula. Elemen ini cocok untuk model geometri yang teratur dan simetris, seperti struktur rangka baja dan struktur beton seperti model pelat, balok, dan kolom (Suhendro, 2000).

Selanjutnya, regangan yang terjadi pada setiap elemen dihitung berdasarkan besarnya perpindahan pada masing-masing titik simpul. Berdasarkan nilai regangan tersebut dapat dihitung tegangan yang bekerja pada setiap elemen

terdapat dua pendekatan yang umum digunakan dalam analisis kestabilan lereng dengan menggunakan metode elemen hingga, yaitu:

1. Metode Pengurangan Kekuatan Geser (*Strength Reduction Method*)

Prinsip dari metode ini yaitu, kekuatan geser material nilainya dikurangi secara bertahap sampai terbentuk suatu mekanisme keruntuhan pada lereng. Pengurangan parameter kohesi (c) dan sudut geser (ϕ) dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.76 dan Persamaan 2.77 sebagai berikut:

$$C_f = \frac{C}{SRF} \quad (2.96)$$

$$\phi_f = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi}{SRF} \right) \quad (2.97)$$

dimana:

SRF = faktor reduksi kekuatan geser

Faktor keamanan (SF) besarnya sama dengan nilai SRF pada saat tepat terjadi keruntuhan.

2. Metode Penambahan Gravitasi (*Gravitation Increase Method*)

Prinsip dari metode penambahan gravitasi yaitu nilai gravitasi dinaikkan secara bertahap sampai terbentuk suatu mekanisme keruntuhan pada lereng. Faktor keamanan dalam pendekatan ini didefinisikan sebagai Persamaan 2.98 berikut:

$$(FS)g_i = \frac{g_{\text{limit}}}{g_{\text{actual}}} \quad (2.98)$$

dimana:

g_{limit} : Nilai gravitasi yang dinaikkan hingga batas keruntuhan

g_{actual} : Nilai gravitasi aktual

3. Metode Massa

Pendekatan yang digunakan dalam metode ini yaitu massa di atas bidang runtuh dianggap sebagai sebuah benda kaku dan bidang runtuh dianggap berupa busur lingkaran. Asumsi lainnya yang digunakan yaitu parameter kekuatan geser hanya ditentukan oleh kohesi saja. Metode ini cocok sekali digunakan pada lereng lempung. Faktor keamanan lereng merupakan perbandingan antara momen penahan dan momen guling yang dapat dilihat pada Gambar 2.20 dan dinyatakan dalam Persamaan 2.99 sebagai berikut:

$$FS = \frac{\text{Momen Penahan}}{\text{Momen Guling}} = \frac{C_u R^2 \theta}{Wx} \quad (2.99)$$

Dimana:

FS = faktor keamanan

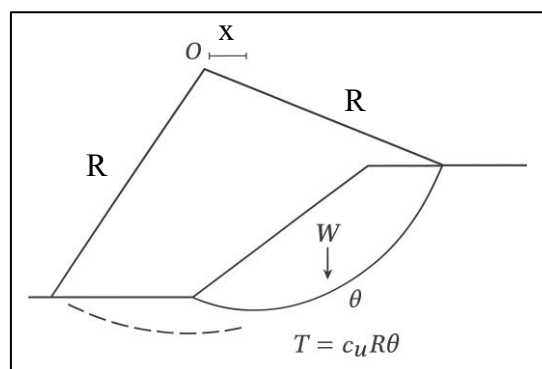
C_u = kuat geser tanah dalam kondisi undrained

R = radius bidang kelongsoran dari pusat lingkaran

W = gaya akibat beban tanah ke-n

x = adalah jarak horizontal dari pusat lingkaran terhadap titik berat bidang longsoran

ϕ = adalah sudut geser tanah



Gambar 2. 18 Metode Massa
(Sumber: Berg *et al.*, 2009)

2.12 PLAXIS 2D (Metode Elemen Hingga)

PLAXIS 2D merupakan program *finite element* yang digunakan untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas untuk berbagai kasus pada

geoteknik. Kondisi yang sebenarnya bisa digambarkan baik dengan model *plane strain* maupun dengan model *axisymmetric*. Model *plane strain* digunakan untuk model geometri dengan penampang melintang yang seragam, dengan kondisi tegangan dan pembebanan yang terjadi cukup panjang dalam arah tegak lurus penampang. Sedangkan untuk model *axisymmetric* digunakan untuk struktur geoteknik dengan bentuk lingkaran yang memiliki bidang penampang radial cukup seragam dan kondisi pembebanan memiliki sumbu aksial.

2.12.1 Simulasi Model

PLAXIS 2D dimaksudkan sebagai suatu alat bantu analisis untuk digunakan oleh para ahli geoteknik yang tidak harus menguasai metode numerik. Umumnya para praktisi menganggap bahwa perhitungan dengan metode elemen hingga yang non-linear adalah sulit dan menghabiskan banyak waktu. Aplikasi geoteknik umumnya membutuhkan model konstitutif tingkat lanjut untuk memodelkan perilaku tanah maupun batuan yang non-linear, bergantung pada waktu serta anistropis. Program PLAXIS 2D dilengkapi oleh beberapa adalah sulit dan menghabiskan banyak waktu. Tim riset dan pengembangan PLAXIS 2D menjawab masalah tersebut dengan merancang prosedur-prosedur fitur untuk menghadapi berbagai aspek struktur dan geoteknik yang kompleks. Ringkasan mengenai fitur-fitur penting dalam PLAXIS 2D antara lain adalah sebagai berikut:

a) Pembuatan Model Geometri secara Grafis

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

b) Pembentukan Jaring Elemen secara Otomatis

PLAXIS 2D secara otomatis akan membentuk jaring elemen hingga 2D yang acak dengan pilihan untuk memperhalus jaring elemen secara global maupun lokal.

c) Elemen Ordo Tinggi

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

d) Pelat

Elemen balok khusus dapat digunakan untuk memodelkan lentur dari dinding tanah penahan, lining terowongan, elemen cangkang serta struktur–struktur tipis lainnya. Perilaku dari elemen–elemen ini diatur oleh kekakuan lentur, kekakuan arah normal penampang dan momen lentur batas. Sendi plastis dapat digunakan untuk elemen pelat yang bersifat elastoplastis saat momen batas termobilisasi. Elemen pelat dengan antarmuka dapat digunakan untuk melakukan analisis yang realistis dari struktur–struktur geoteknik.

e) *Interface* (Antarmuka)

Elemen antar muka atau elemen penghubung dapat digunakan untuk memodelkan interaksi tanah–struktur. Sebagai contoh, elemen–elemen ini dapat digunakan untuk memodelkan zona tipis diantara *lining* terowongan dengan tanah di sekelilingnya yang mengalami intensitas geser yang tinggi. Nilai sudut geser dan kohesi dari elemen antarmuka umumnya berbeda dengan nilai sudut geser dan kohesi dari tanah di sekitarnya.

f) Angkur

Elemen pegas elastoplastis digunakan untuk memodelkan pengankuran dan penopang horizontal. Perilaku elemen–elemen ini diatur oleh kekakuan normal penampang dan sebuah gaya maksimum. Sebuah pilihan khusus juga tersedia untuk

analisis pada ankur tanah prategang ataupun sistem penopang prategang lainnya pada galian.

g) Geogrid

Geogrid (geotekstil) sering digunakan dalam praktek untuk timbunan yang membutuhkan perkuatan atau untuk struktur penahan tanah. Elemen-elemen ini dapat dimodelkan dalam PLAXIS 2D dengan menggunakan elemen–elemen yang khusus untuk menahan gaya tarik. Elemen ini juga dapat dikombinasikan dengan elemen antarmuka untuk memodelkan interaksi dengan tanah di sekelilingnya.

h) Model Elastisitas Linier

Model ini menyatakan hukum Hooke tentang elastisitas linier isotropis. Model ini meliputi dua buah parameter kekakuan, yaitu modulus Young (E), dan angka Poisson (ν). Model linier elastis sangat terbatas untuk pemodelan perilaku tanah. Model ini terutama digunakan pada struktur–struktur yang kaku dalam tanah.

i) *Model Hardening Soil* (HS)

Model *Hardening Soil* merupakan model tingkat lanjut untuk memodelkan perilaku tanah pada model Mohr-Coulomb, kondisi tegangan batas dideskripsikan oleh kohesi (c), sudut geser (ϕ) dan sudut dilatansi (ψ). Namun demikian, kekakuan tanah dideskripsikan lebih akurat dengan menggunakan tiga kekakuan yang berbeda yaitu, kekakuan pembebanan triaksial (E_{50}), kekakuan pengurangan beban (*unloading*) triaksial (E_{ur}) dan kekakuan pembebanan satu arah (E_{oed}). Untuk nilai tipikal dari berbagai jenis tanah, dapat digunakan $E_{ur} \approx 3E_{50}$ dan $E_{oed} \approx E_{50}$, tetapi tanah yang sangat lunak dan tanah yang sangat kaku cenderung memberikan rasio E_{oed}/E_{50} yang berbeda.

Berbeda dengan model Mohr-Coulomb, model *Hardening Soil* mengikutsertakan modulus kekakuan yang bergantung pada tegangan. Hal ini berarti bahwa kekakuan akan semakin

meningkat terhadap tegangan. Karena itu, ketiga kekakuan merupakan nilai yang berhubungan dengan sebuah tegangan acuan, yang umumnya diambil sebesar 100 kPa (1 bar). Model ini merupakan model *Hardening* yang tidak mengikutsertakan pelunakan tanah akibat dilatansi dan efek lepasnya ikatan antar butir. Sebagai catatan, penggunaan model *Hardening Soil* umumnya menghasilkan waktu perhitungan yang lebih lama, karena pembentukan dan dekomposisi matriks kekakuan dari material dilakukan dalam tiap langkah perhitungan.

j) Model Mohr–Coulomb

Model yang sederhana namun handal ini didasarkan pada parameter-parameter tanah yang telah dikenal dengan baik dalam praktek rekayasa teknik sipil. Walaupun demikian tidak semua fitur non-linear tercakup dalam model ini. Model Mohr–Coulomb dapat digunakan untuk menghitung tegangan pendukung yang realistis pada muka terowongan, beban batas pada pondasi dan lain-lain. Model ini juga dapat digunakan untuk menghitung faktor keamanan dengan menggunakan pendekatan ‘reduksi ϕ – c ’.

k) Tekanan Air Pori Hidrostatik

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

l) Analisis Konsolidasi

Semakin berkurangnya tekanan air pori berlebih terhadap waktu dapat dihitung dengan menggunakan sebuah analisis konsolidasi. Suatu perhitungan konsolidasi membutuhkan masukan berupa koefisien permeabilitas tanah untuk tiap lapisan

tanah. Penggunaan prosedur peningkatan langkah waktu secara otomatis akan membuat analisis menjadi mudah dilakukan namun tetap handal.

m) Tampilan Luaran (*Output*)

Program PLAXIS 2D memiliki fitur-fitur grafis yang sangat baik untuk menampilkan hasil-hasil dari perhitungan. Nilai-nilai perpindahan, tegangan, regangan dan gaya-gaya dalam dari elemen struktural dapat diperoleh dari tabel keluaran. Keluaran berbentuk grafis maupun tabel dapat langsung dicetak, disimpan ke media penyimpanan ataupun langsung ke dalam memori *clipboard* dari *windows* untuk dapat digunakan dalam perangkat lunak lain.

n) Lintasan Tegangan

Lintasan Tegangan sebuah pilihan khusus tersedia untuk menggambarkan kurva beban terhadap perpindahan, lintasan tegangan atau jalur tegangan, lintasan regangan, kurva tegangan-regangan serta kurva penurunan terhadap waktu. Visualisasi dari lintasan tegangan akan memberikan informasi yang berharga terhadap perilaku tanah secara lokal dan memungkinkan analisis yang mendetail terhadap hasil dari perhitungan dengan menggunakan PLAXIS 2D.

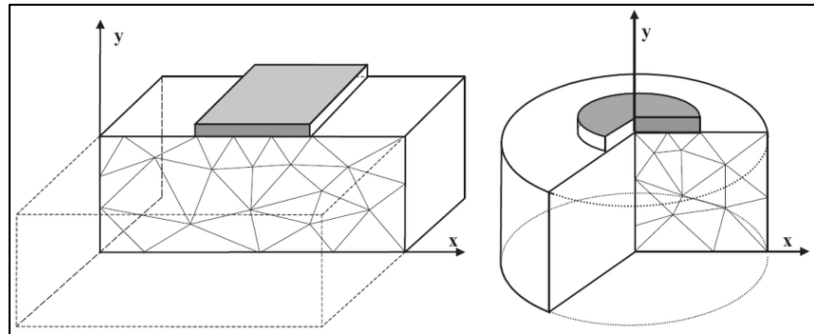
2.12.2 Tahapan Pemodelan

Pada pemodelan PLAXIS 2D, tahapan-tahapan yang dilakukan dalam pemodelan adalah sebagai berikut:

1. Parameter Model

Parameter yang dapat digunakan antara lain *plane strain* dan *axisimetri*. *Plane strain* digunakan untuk geometri dengan potongan melintang tanah yang seragam dan pembebanan dengan arah tegak lurus terhadap potongan melintang, sehingga *displacement* dan tegangan arah sumbu z diasumsikan bernilai 0. Lalu untuk model *axisimetri* digunakan untuk struktur melingkar dengan potongan seragam dimana deformasi dan

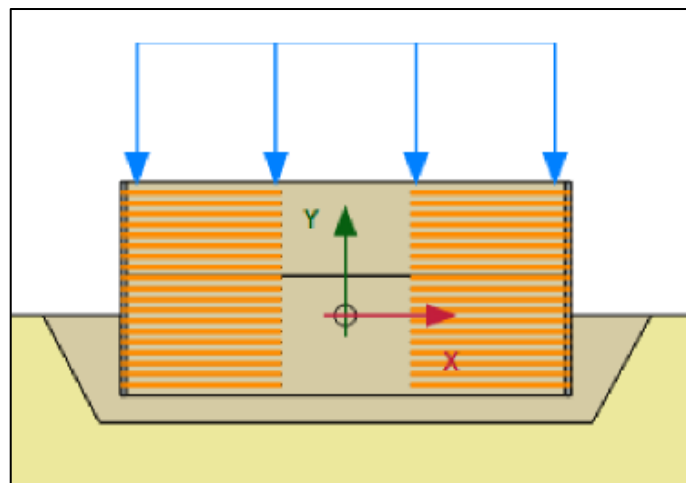
tegangan diasumsikan sama di semua arah radial. Perlu diingat bahwa pada pemodelan axisimetri sumbu x menampilkan radius dan sumbu y disamakan dengan sumbu simetri aksial pemodelan.



Gambar 2.19 Contoh pemodelan *plane-strain* dan *axisimetri*
(Sumber : Brinkgreve *et al.*, 2014)

2. Geometri

Untuk membuat model geometri, langkah yang perlu diperhatikan yaitu membuka lembar kerja baru, membuat garis geometri, membentuk lapisan tanah dan struktur, pemilihan jangkar/penyangga yang akan digunakan, serta beban yang bekerja di permukaan selanjutnya menetapkan kondisi batas yang akan dianalisis.



Gambar 2.20 Contoh pemodelan geometri MSE Wall.
(Sumber : Jababeka)

3. *Input Parameter Material*

Memasukkan nilai-nilai parameter tanah sesuai dengan sifat-sifat material dan melakukan idealisasi geometrik terhadap struktur yang direncanakan.

4. Penyusunan jaring elemen

Penyusunan jaringan elemen dilakukan untuk menghaluskan jaringan elemen secara global. Pengaturan jaringan elemen di simpan bersama-sama dengan masukan lainnya. Saat masuk kembali kedalam suatu proyek tanpa mengubah konfigurasi geometrik maupun pengaturan jaringan elemen, jaring elemen yang sama dapat disusun kembali dengan hanya menekan tombol susun jaring elemen pada *toolbar*.

5. Kondisi awal

Kondisi awal pada proyek ini membutuhkan perhitungan tekanan air, penonaktifan dari struktur dan beban serta perhitungan tegangan tanah awal. Tekanan air (tekanan air pori dan tekanan air pada kondisi batas eksternal) dapat dihitung dengan dua cara yaitu dengan perhitungan secara langsung berdasarkan masukan dari dan tinggi tekan dari permukaan air dalam tanah, atau berdasarkan hasil dari perhitungan aliran air dalam tanah.

6. Perhitungan

Dalam PLAXIS, proses-proses ini dapat disimulasikan dengan menggunakan pilihan dalam perhitungan tahapan kontruksi. Tahapan kontruksi memungkinkan pengaktifan dan penonaktifan dari berat, kekakuan dan kekuatan dari komponen-komponen yang diinginkan dalam metode elemen hingga.

2.13 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang dilakukan oleh (Aziza *et al.*, 2022) berjudul “Analisis Deformasi Lateral MSE *Wall* dengan Perkuatan Geogrid terhadap Variasi Jenis Material Timbunan” memberikan hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar nilai panjang penjangkaran dan kuat tarik geogrid, maka deformasi lateral yang terjadi semakin kecil. Sebaliknya, peningkatan spasi vertikal justru menyebabkan deformasi semakin besar. Nilai deformasi lateral pada tanah pasir berkisar antara 0,0647–0,2731 meter, sedangkan pada tanah lempung antara 0,0862–0,1825 meter, yang menunjukkan bahwa tanah lempung lebih stabil dalam menahan gaya lateral. Dari hasil tersebut, disimpulkan bahwa parameter kuat tarik dan spasi vertikal memiliki pengaruh paling signifikan terhadap deformasi lateral pada dinding MSE.

Penelitian oleh (Ansori *et al.*, 2025) berjudul “Analisis Stabilitas Dinding Penahan Tanah Tipe *Mechanically Stabilized Earth (MSE)* pada Jalan Layang Bantaianfd Sumatera Selatan” menganalisis stabilitas eksternal dan internal dinding MSE menggunakan metode analitis dan numerik berdasarkan SNI 8460:2017. Hasil menunjukkan bahwa dinding MSE aman terhadap kegagalan dengan faktor keamanan global 1,753 (statis) dan 1,402 (gempa). Nilai kekuatan tarik optimum geogrid sebesar 38,79 kN/m, lebih kecil dari yang digunakan ($T_u=100$ kN/m), menandakan desain yang aman dan efisien.

Penelitian oleh Noor (2021) berjudul “*Study of Behavior Mechanically Stabilized Earth Wall (MSE Wall) with Sand on the Model Test in the Laboratory*” dilakukan untuk mengetahui perilaku dinding penahan tanah tipe MSE dalam skala laboratorium dengan variasi jumlah lapisan perkuatan. Penelitian ini menggunakan material pasir sebagai timbunan dan karung plastik (*sack*) sebagai pengganti geotekstil, dengan variasi 1–4 lapis perkuatan serta tanpa perkuatan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin banyak

lapisan perkuatan, semakin besar beban dan tegangan maksimum yang dapat ditahan dinding, serta deformasi yang terjadi semakin kecil. Nilai beban maksimum mencapai 75 kg dan tegangan maksimum sebesar 0,023 kg/cm² pada empat lapis perkuatan. Dengan demikian, penggunaan karung sebagai material alternatif pengganti geotekstil efektif meningkatkan kekuatan dan kestabilan MSE *Wall*.

Penelitian oleh (Muhardi & Alfadhella, 2024) berjudul “Evaluasi Alternatif Perbaikan Lereng Menggunakan Metode Elemen Hingga” menekankan efektivitas penggunaan struktur *Mechanically Stabilized Earth Wall* (MSE *Wall*) sebagai solusi perkuatan lereng. Analisis dilakukan dengan metode elemen hingga (PLAXIS 2D V.21) pada tiga alternatif perkuatan, yaitu MSE *Wall* dengan bronjong angkur dan *bored pile*, MSE *Wall* dengan blok beton dan *bored pile*, serta perkuatan menggunakan *sheet pile* beton tipe W-600 Class B. Hasil penelitian menunjukkan bahwa MSE *Wall* memberikan performa paling stabil dibandingkan alternatif lainnya. Nilai faktor keamanan tertinggi diperoleh pada MSE *Wall* dengan bronjong angkur dan *bored pile* sebesar 2,403, sedangkan *sheet pile* hanya mencapai 1,520. Berdasarkan kriteria SNI 8460:2017, seluruh model memenuhi batas aman, namun MSE *Wall* terbukti memberikan kestabilan dan efisiensi struktural yang lebih baik, menjadikannya alternatif paling efektif dalam memperkuat lereng dan mencegah kelongsoran tanah.

Penelitian oleh Tomar, Lohar, dan Shrivastava (2024) berjudul “*Parametric Study of Mechanically Stabilised Earth Wall using PLAXIS*” bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi parameter desain terhadap perilaku deformasi dinding MSE. Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga dengan perangkat lunak PLAXIS 2D melalui pemodelan *plane strain*. Parameter yang divariasikan meliputi panjang geogrid, kuat tarik geogrid, serta sudut geser dalam tanah timbunan, sementara geometri dinding, kondisi batas, muka air tanah, dan beban dijaga konstan. Sebanyak 120 kombinasi pemodelan dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh

masing-masing parameter terhadap deformasi maksimum dinding. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan panjang dan kuat tarik geogrid serta sudut geser tanah secara signifikan mampu mengurangi deformasi lateral dinding MSE. Penelitian ini menegaskan bahwa PLAXIS 2D sangat efektif dalam memodelkan interaksi tanah–struktur serta perilaku deformasi dinding MSE secara realistis, sehingga dapat digunakan sebagai alat bantu utama dalam evaluasi dan optimasi desain dinding MSE.

Penelitian oleh Hassan, Hammad, dan Fayed (2023) berjudul “*Study of the Performance of Mechanically Stabilized Earth Wall (MSE) using Numerical Modelling*” bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dan faktor keamanan dinding MSE berdasarkan pemodelan numerik yang telah dikalibrasi dengan data monitoring lapangan. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D dengan pendekatan metode elemen hingga untuk memodelkan dinding MSE berskala penuh yang berlokasi di New Cairo, Mesir. Model numerik divalidasi dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data pengukuran deformasi dan tekanan tanah di lapangan. Analisis parametrik dilakukan dengan memvariasikan kekakuan aksial geogrid, sudut geser dalam tanah timbunan, rasio panjang terhadap tinggi dinding (L/H), serta beban timbunan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kekakuan geogrid, sudut geser tanah, dan rasio L/H secara signifikan meningkatkan faktor keamanan dinding MSE, sedangkan peningkatan beban timbunan menyebabkan penurunan faktor keamanan. Penggunaan model konstitutif Hardening Soil dalam PLAXIS 2D terbukti mampu merepresentasikan perilaku tegangan–regangan tanah dengan lebih akurat dibandingkan model elastoplastik sederhana.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada di Desa Jatireja, Kecamatan Cikarang Timur, Kabupaten Bekasi, Provinsi Jawa Barat, dengan koordinat sekitar $6^{\circ}18'15''$ Lintang Selatan dan $107^{\circ}08'45''$ Bujur Timur. Desa ini dipilih karena merupakan area pembangunan *Flyover* yang akan menghubungkan Kawasan Industri Jababeka VI dengan Kawasan Industri Jababeka IX yang menggunakan dinding penahan tanah tipe *Mechanically Stabilized Earth Wall* (MSE *Wall*) sebagai struktur perkuatan timbunan jalan.

Pemilihan lokasi ini dilatarbelakangi oleh pengalaman peneliti yang sebelumnya telah melaksanakan kerja praktik di proyek *Flyover* Kawasan Industri Jababeka IX. Selama kerja praktik tersebut, peneliti memperoleh pemahaman langsung mengenai kondisi lapangan, tahapan konstruksi, serta permasalahan teknis yang dihadapi, khususnya terkait sistem perkuatan tanah yang digunakan. Pengalaman ini mendorong peneliti untuk melakukan kajian lebih mendalam melalui analisis numerik terhadap stabilitas dan deformasi struktur MSE *Wall* pada proyek tersebut.

Pemilihan lokasi ini juga didasarkan pada ketersediaan data uji tanah, dokumen proyek, serta kemudahan akses observasi lapangan.

Lokasi penelitian berjarak berbatasan dengan beberapa wilayah sebagai berikut:

| | |
|-----------------|------------------------------|
| Sebelah utara | : Kecamatan Cikarang Utara |
| Sebelah selatan | : Kecamatan Cikarang Selatan |
| Sebelah timur | : Kecamatan Karawang Barat |
| Sebelah barat | : Kecamatan Cikarang Pusat |



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian



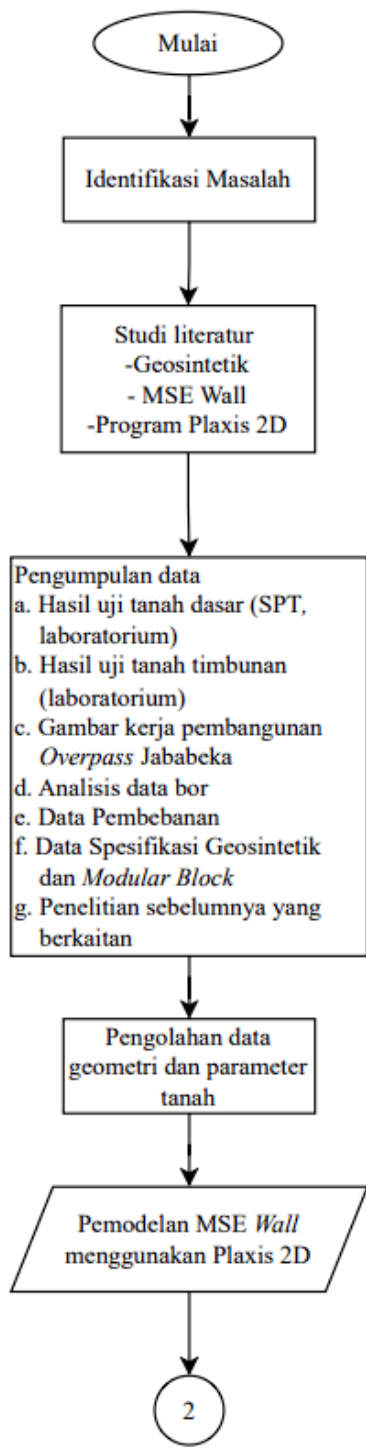
Gambar 3.2 Proses konstruksi MSE wall di kawasan industri jababeka IX

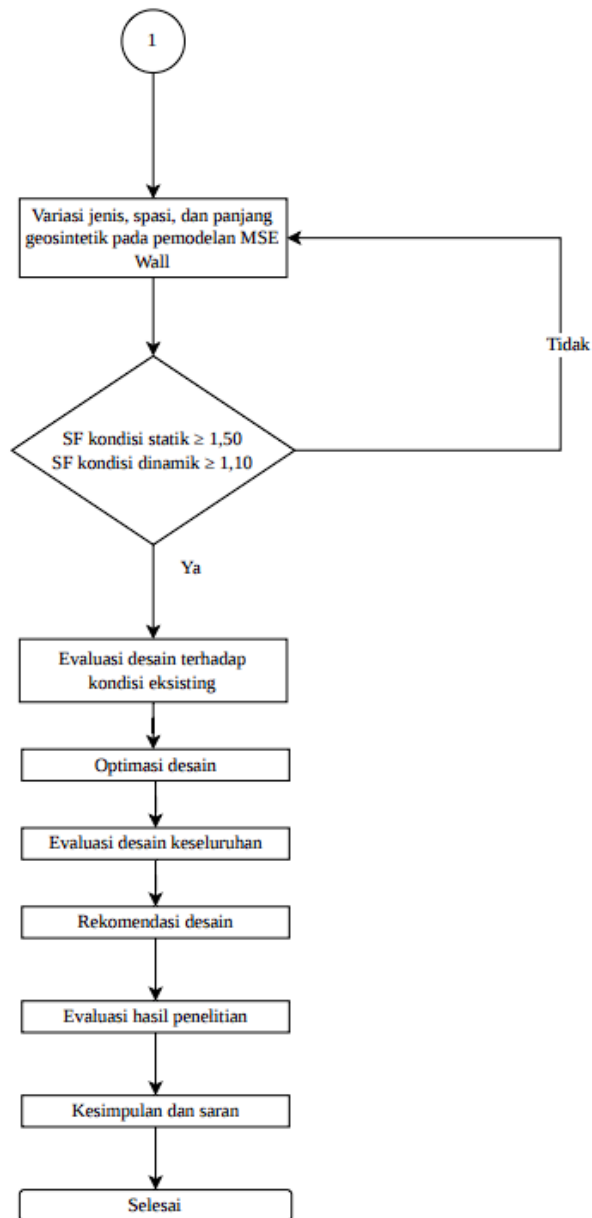
3.2 Alur Penelitian

Tahapan alur penelitian bertujuan untuk memastikan bahwa penelitian berjalan dengan sistematis, konsisten, dan menghasilkan data atau kesimpulan yang relevan dan valid. Berikut ini tahapan alur penelitian yang digunakan.

Alur penelitian ini dirancang secara berurutan dan saling berkaitan, di mana setiap tahap menjadi prasyarat bagi tahap berikutnya. Penyusunan alur penelitian juga mempertimbangkan ketersediaan data lapangan serta kompleksitas pemodelan numerik yang dilakukan, sehingga tahapan dapat disesuaikan dengan kondisi aktual di lapangan.

Secara garis besar, penelitian ini dimulai dari kajian pustaka yang mendalam untuk memahami teori dan standar yang berlaku, dilanjutkan dengan pengumpulan data lapangan dan dokumen proyek, kemudian dilakukan pemodelan dan analisis numerik menggunakan PLAXIS 2D. Hasil pemodelan selanjutnya dievaluasi dan dibahas secara komprehensif sebelum ditarik kesimpulan akhir. Seluruh rangkaian tahapan tersebut digambarkan dalam diagram alir pada Gambar 3.2 berikut.





Gambar 3.3 Alur penelitian.

Berdasarkan diagram tersebut, penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahap sebagai berikut:

3.2.1 Studi Literatur

Pada tahap ini peneliti mengumpulkan dan memahami berbagai literatur yang relevan dengan penelitian yang akan dilakukan.

Literatur diperoleh dari buku, jurnal, artikel, dan laporan penelitian terdahulu. Studi literatur diperlukan untuk memahami:

- a. Karakteristik *Mechanically Stabilized Earth Wall (MSE Wall)*.
- b. Prinsip kerja dan aplikasi geosintetik sebagai material perkuatan tanah.
- c. Faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas dinding penahan tanah.
- d. Pemodelan geoteknik menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D.

3.2.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan setelah studi literatur, meliputi data primer dan sekunder.

1. Data primer: hasil uji tanah dasar (SPT dan laboratorium), serta data uji tanah timbunan yang diperoleh dari konsultan proyek.
2. Data sekunder: gambar kerja proyek *Flyover* Jababeka IX, hasil investigasi tanah terdahulu, data muka air tanah, peta zonasi gempa, data spektra gempa wilayah Bekasi, serta penelitian sebelumnya yang relevan.

3.2.3 Pemodelan dan Analisis Data

Tahap ini dilakukan dengan membuat model dinding penahan tanah tipe *MSE Wall* menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D. Analisis dilakukan dengan dua variasi:

- a. Variasi panjang perkuatan geosintetik sebanyak 3 jenis yaitu 7 m, 8 m dan penuh (8,5 m)
- b. Variasi jenis material geosintetik sebanyak 2 jenis geosintetik yaitu Hibritex LP105 dan LP155
- c. Variasi spasi perkuatan geosintetik sebanyak 2 jenis yaitu 0,4 m dan 0,6 m
- d. Jenis penutup muka (*modullar block*) yaitu Maccaferri Macwall *Block*

Kombinasi ketiga parameter variasi tersebut menghasilkan 12 skenario pemodelan yang masing-masing diberi kode V1 hingga V12. Kode variasi ini merepresentasikan kombinasi unik antara spasi vertikal geogrid, panjang geogrid, dan tipe geogrid yang digunakan.

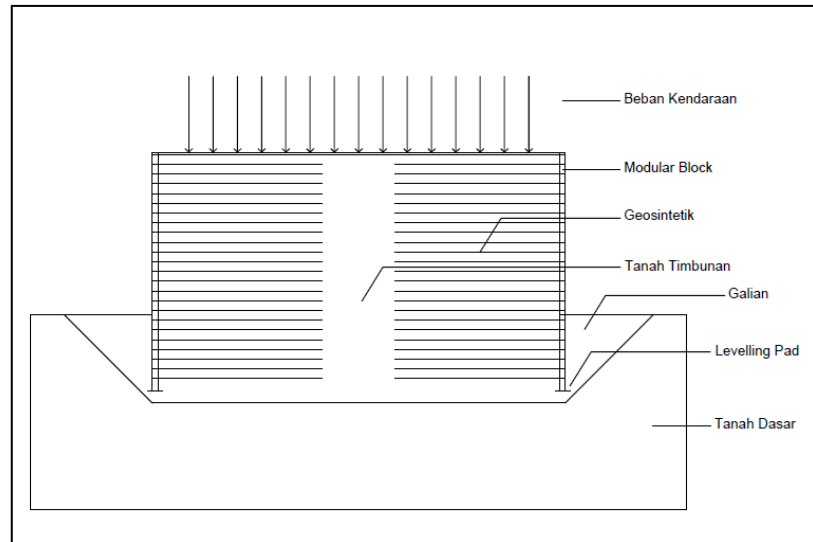
Secara berurutan, variasi V1 hingga V6 menggunakan tipe geogrid Hibritex LP105, sedangkan V7 hingga V12 menggunakan tipe geogrid Hibritex LP155. Dalam setiap kelompok tipe geogrid, variasi dibedakan berdasarkan kombinasi spasi vertikal (0,4 m dan 0,6 m) dan panjang geogrid (7 m, 8 m, dan 8,5 m)

Sehingga analisis akan menghasilkan variasi berupa

Tabel 3.1 Variasi pemodelan MSE *Wall*

| Kode Variasi | Spasi Geogrid (m) | Panjang Geogrid (m) | Tipe Geogrid |
|---------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| V1 | 0,4 | 7 | Hibritex LP105 |
| V2 | 0,4 | 8 | Hibritex LP105 |
| V3 | 0,4 | 8,5 | Hibritex LP105 |
| V4 | 0,6 | 7 | Hibritex LP105 |
| V5 | 0,6 | 8 | Hibritex LP105 |
| V6 | 0,6 | 8,5 | Hibritex LP105 |
| V7 | 0,4 | 7 | Hibritex LP155 |
| V8 | 0,4 | 8 | Hibritex LP155 |
| V9 | 0,4 | 8,5 | Hibritex LP155 |
| V10 | 0,6 | 7 | Hibritex LP155 |
| V11 | 0,6 | 8 | Hibritex LP155 |
| V12 | 0,6 | 8,5 | Hibritex LP155 |

Evaluasi dilakukan berdasarkan nilai faktor keamanan (SF) dengan batasan minimal SF statik $\geq 1,50$ dan SF dinamik $\geq 1,10$.



Gambar 3.4 Pemodelan MSE *Wall*.

3.2.4 Evaluasi Hasil dan Pembahasan

Hasil pemodelan dibandingkan untuk menilai pengaruh variasi panjang, jenis geosintetik dan jenis *modular block* terhadap stabilitas MSE *Wall*. Analisis yang dilakukan meliputi:

- a. Faktor keamanan (*safety factor*).
- b. Pola deformasi.
- c. Kondisi bidang gelincir.

3.2.5 Kesimpulan dan Saran

Pada tahap akhir, peneliti menarik kesimpulan dari hasil analisis mengenai efektivitas variasi panjang, spasi vertikal dan jenis geosintetik dalam meningkatkan stabilitas dan deformasi MSE *Wall*. Kesimpulan ini kemudian digunakan untuk memberikan saran perencanaan perkuatan pada proyek sejenis di masa depan.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Dari perhitungan yang dilakukan, hasil untuk stabilitas eksternal kondisi statis yaitu stabilitas geser terpenuhi dengan $SF = 1,408 > 1,0$, sehingga struktur aman terhadap geser. Stabilitas guling terpenuhi karena eksentrisitas yang terjadi ($e = 1,053$ m) lebih kecil dari batas izin (e maksimal = 2,125 m), sehingga struktur aman terhadap guling. Stabilitas kuat dukung terpenuhi karena kapasitas dukung terfaktor ($q_R = 436,436$ kN/m²) lebih besar dari tekanan yang bekerja ($\sigma_v = 224,481$ kN/m²), sehingga struktur aman terhadap kuat dukung.
2. Dari perhitungan yang dilakukan, hasil untuk stabilitas eksternal kondisi gempa yaitu stabilitas geser akibat gempa terpenuhi karena tahanan geser ($R_r = 633,101$ kN/m) lebih besar dari gaya gempa ($T_{HF} = 473,438$ kN/m), sehingga struktur aman terhadap geser gempa. Stabilitas guling akibat gempa terpenuhi karena kontrol eksentrisitas (5,788 m) masih di bawah batas izin (6,800 m), sehingga struktur aman terhadap guling gempa. Stabilitas kuat dukung akibat gempa terpenuhi karena kapasitas dukung terfaktor ($q_R = 436,436$ kN/m²) lebih besar dari tekanan gempa ($\sigma_v = 384,348$ kN/m²), sehingga struktur aman terhadap kuat dukung gempa.
3. Berdasarkan analisis stabilitas internal kondisi statis, stabilitas tarik terpenuhi karena tahanan tarik terfaktor ($T_r = 40,107$ kN/m) lebih besar dari gaya tarik maksimum pada seluruh 25 lapisan (T_{max} maks = 30,489 kN/m), sehingga seluruh perkuatan aman terhadap putus.

Stabilitas cabut terpenuhi karena panjang geogrid terpasang (7 m) jauh lebih besar dari panjang minimum yang dibutuhkan ($L_{min} = 0,249-0,578$ m) pada seluruh lapisan, sehingga seluruh perkuatan aman terhadap cabut. Pada kondisi gempa, stabilitas tarik terpenuhi karena tahanan geogrid (100 kN/m) jauh melampaui gaya tarik gempa ($T_{max} = 13,668$ kN/m), sehingga seluruh perkuatan aman terhadap putus akibat gempa, untuk stabilitas cabut terpenuhi karena panjang terpasang (7 m) lebih besar dari panjang minimum dinamik (2,322 m), sehingga seluruh perkuatan aman terhadap cabut akibat gempa.

4. Nilai Faktor Keamanan (SF) pada kondisi statis cenderung mengalami penurunan seiring dengan peningkatan beban *surchage* dari 10, 15, 20, 25 dan 30 kPa. Meskipun demikian, seluruh variasi masih berada dalam batas aman yang dipersyaratkan.
5. Nilai Faktor Keamanan (SF) pada kondisi gempa cenderung mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan beban *surchage* dari 10, 15, 20, 25 dan 30 kPa walau peningkatannya tidak signifikan.
6. Berdasarkan hasil analisis, seluruh 12 variasi perkuatan menghasilkan nilai SF statis pada kondisi operasional antara 1,824 hingga 3,121, melampaui nilai minimum SF > 1,5 yang disyaratkan SNI 8460:2017. Nilai SF gempa berkisar antara 1,218 hingga 1,503, memenuhi batas minimum SF > 1,1 yang disyaratkan. Stabilitas lereng pada seluruh tahap konstruksi juga terpenuhi dengan nilai SF yang semakin meningkat seiring bertambahnya lapisan perkuatan, sehingga seluruh variasi dinyatakan aman terhadap kelongsoran pada kondisi statis maupun gempa.
7. Berdasarkan hasil analisis deformasi lateral pada seluruh variasi, nilai δ_h maksimum berkisar antara 6,08 mm (Variasi 9) hingga 8,11 mm (Variasi 4), dengan rasio δ_h/H antara 0,062% hingga 0,083%. Seluruh nilai tersebut berada jauh di bawah batas 1% yang direkomendasikan FHWA (2009), sehingga seluruh variasi

dinyatakan aman terhadap deformasi lateral berlebih. Dari hasil analisis, panjang geogrid merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap deformasi lateral, di mana semakin panjang geogrid maka semakin kecil pergeseran yang terjadi pada muka dinding.

8. Berdasarkan hasil analisis secara keseluruhan, Variasi 9 (Geogrid LP155, panjang 8,5 m, spasi 0,4 m) direkomendasikan sebagai konfigurasi paling optimal karena menghasilkan SF statis tertinggi (3,121), SF gempa tertinggi (1,503), sekaligus deformasi lateral terkecil (6,08 mm) dan penurunan terkecil (17,67 mm) di antara seluruh variasi. Variasi 3 (LP105, 8,5 m, spasi 0,4 m) merupakan alternatif terbaik dari sisi efisiensi biaya material, sedangkan Variasi 12 (LP155, 8,5 m, spasi 0,6 m) dapat dipertimbangkan sebagai opsi konstruksi yang lebih efisien dengan hasil yang hampir setara Variasi 9 namun membutuhkan jumlah lapisan lebih sedikit.
9. Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, peningkatan beban sebesar 10–30 kPa tidak menyebabkan penurunan nilai faktor keamanan (SF) yang signifikan pada lereng yang dianalisis. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh beban tambahan relatif kecil dibandingkan faktor lainnya.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan terhadap stabilitas dan deformasi struktur *Mechanically Stabilized Earth (MSE) Wall*, maka beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan analisis perbandingan biaya (*cost analysis*) terhadap variasi konfigurasi geogrid yang digunakan. Perhitungan volume total geogrid pada masing-masing skenario desain dapat dibandingkan terhadap kinerja stabilitas dan deformasi yang dihasilkan, sehingga diperoleh konfigurasi yang paling efisien secara teknis maupun ekonomis.
2. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan analisis menggunakan variasi parameter tanah yang lebih beragam, model

konstitutif tanah yang lebih kompleks, serta mempertimbangkan kondisi konstruksi bertahap (*staged construction*) yang lebih mendekati kondisi lapangan agar hasil simulasi semakin representatif.

3. Melakukan analisis model desain menggunakan model tanah yang lebih *advanced* seperti *hardening soil*, *soft soil*, dan *soft soil creep* untuk mendapatkan hasil analisis yang lebih teliti dan akurat dengan keadaan sebenarnya di lapangan mengingat model tanah Mohr-Coulomb mengasumsikan hubungan yang linier antara tegangan normal dan tegangan geser sehingga tidak selalu cocok dengan kompleksitas perilaku tanah lempung.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2007). *LRFD bridge design specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Afriani, L. (2014). *Kuat Geser Tanah*. Penerbit Graha Ilmu. Yogyakarta.
- Ansori, E., Pascasarjana, P., & Darma, U. B. (2025). *Analisis Stabilitas Dinding Penahan Tanah Tipe Mechanically Stabilized Earth (Mse) Pada Jalan Layang Bantaian Sumatera*. 8(3), 659–670.
- ASTM International. (2020). *Standard terminology for geosynthetics (ASTM D4439-20)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4439-20>
- Aziza, C., & Suhendra, A. (2022). *Analisis Deformasi Lateral Mse Wall Dengan Perkuatan Geogrid Terhadap Variasi Jenis Material Timbunan*. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 5(1), 153–168. <https://doi.org/10.24912/jmts.v5i1.16652>
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *Persyaratan perancangan geoteknik (SNI 8460:2017)*. Badan Standardisasi Nasional.
- Berg, R., Christopher, B., & Samtani, N. (2009). *Design And Construction Of Mechanically Stabilized Earth Walls And Reinforced Soil Slopes—Volume I*. Federal High Way Administration (FHWA), I(November). <https://doi.org/FHWA-NHI-10-024> & [FHWA-NHI-10-025](https://doi.org/FHWA-NHI-10-025)
- Bowles, J. E. (1984). *Physical and Geotechnical Properties of Soils*. Mc-Graw Hill Book Company.
- Bowles, J.E. (1995). *Foundation Analysis and Design*. Kogakhusa: McGraw-Hill.
- Çelik, S. (2017). Comparison of Mohr-Coulomb and hardening soil models numerical estimation of ground surface settlement caused by tunneling. *Iğdır University Journal of the Institute of Science and Technology*, 7(4), 95–102.
- Das, B. M. (1994). *Principles of Geotechnical Engineering Third Edition*. McGraw Hill Book Company.
- Departemen Pekerjaan Umum. (2005). *Rekayasa Penanganan Keruntuhan Lereng pada Tanah Residual dan Batuan*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Direktorat Bina Teknik. (2009). *Modul Pelatihan Geosintetik Volume 4: Perencanaan dan Pelaksanaan Dinding Penahan Tanah yang Diperkuat*

Geosintetik. Direktorat Jendral Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum., 4.

Dunn, L. I., Anderson, L. R. & Kiefer, F. W. (1980). *Fundamentals of Geotechnical Analysis*. Utah State University.

Elias, V., Christopher, B. R., & Berg, R. R. (2001). *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes: Design and Construction Guidelines* (FHWA-NHI-00-043). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
<https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/48689>

FHWA. (2003). *Soil Nail Walls*. U.S. Department of Transportation.

Federal Highway Administration (FHWA). (2009). *Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I* (FHWA-NHI-10-024). National Highway Institute.
<https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/nhi10024/nhi10024.pdf>

Hammad, M. S., Hassan, M. A., & Fayed, A. L. (2025). Study of the global factor of safety for mechanically stabilized earth wall (MSE) using numerical modelling. *Materials Research Proceedings*, 48, 475–485.
<https://doi.org/10.21741/9781644903414-52>

Hardiyatmo, H. C. (2012). *Mekanika Tanah 1 Edisi Ke Enam*. Gadjah Mada University Press.

Hardiyatmo, H. C. (2014a). *Analisis dan Perancangan Fondasi I*. Gadjah Mada University Press.

Hardiyatmo, H. C. (2014b). *Mekanika Tanah 2 Edisi Kelima*. Gadjah Mada University Press.

Jababeka. (2024). *Jababeka Industrial Estate*. PT Jababeka Tbk.
<https://www.jababeka.com/land-development/industrial/>

Keystone Retaining Wall Systems. (n.d.). *Keystone modular block unit: Standard unit technical specifications*.

Lestari, D. A. (2018). *Optimasi Desain Fondasi Jembatan Menggunakan Dinding MSE (Mechanically Stabilized Earth Walls)* [Skripsi, Universitas Gadjah Mada]. ETD Universitas Gadjah Mada.
<http://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/160407>

Melo, C., & Sharma, S. (2004). *Seismic Coefficients for Pseudostatic Slope Analysis*. 13th World Conference on Earthquake Engineering, 369, 15.

Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). *The Analysis of The Stability of General Slip Surfaces*. *Geotechnique*, 15(1), 79–93.
<https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>

- Muhardi, M., & Ridwan, A. (2024). *Evaluasi Alternatif Perbaikan Lereng Menggunakan Metode Elemen Hingga*. *SAINSTEK*, 12(1), 93–101. <https://doi.org/10.35583/js.v12i1.251>
- Murashev, A. K. (2003). *Guidelines for design and construction of geosynthetic-reinforced soil structures in New Zealand* (Research Report 239). NZ Transport Agency.
- Nedderman, R. (2005). *Statics and Kinematics of Granular Materials*. Cambridge University Press.
- Noor, A. M. (2021). *Study of Behavior Mechanically Stabilized Earth Wall (Mse-Wall) With Sand on the Model Test in the Laboratory*. *Cerucuk*, 5(2), 87. <https://doi.org/10.20527/crc.v5i2.4315>
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- PT Maccaferri Indonesia. (n.d.). *MacWall segmental retaining wall system: Technical data sheet*.
- PT Tetrasa Geosinindo. (2019). *Product Guide and Application*.
- Rankine, W., 1857. The Stability of Loose Earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, pp. 9-27.
- Schmertmann, J. H. (1970). *Static Cone to Compute Static Settlement Over Sand*. *Soil Mechanics and Foundations*, 1011–1035.
- Silaban, M. E., & Pratama, M. F. D. (2025). *Stability Analysis Of Embankment Soil Slopes In The International School Project*. *Jurnal Pensil : Pendidikan Teknik Sipil*, 14(1), 89–106. <https://doi.org/10.21009/jpensil.v14i1.48584>
- Suhendro, B. (2000). *Metode Elemen Hingga Dan Aplikasinya* (1st ed.)
- Suryolelono, K.B. (2003). *Bencana Alam Tanah Longsor Perspektif Ilmu Geoteknik*. Yogyakarta, Universitas Gadjah Mada.
- Syah, A., & Alami, F. (2024). Geotechnical investigation, landslide mechanism and countermeasure on the road above the soft-medium clay. *Journal of Civil Engineering and Planning*, 5(1), 79–88. <https://doi.org/10.37253/jcep.v5i1.9373>
- Terzaghi, K. (1987). *Mekanika Tanah Dalam Praktek Rekayasa Jilid 2*. Erlangga, 1–373.
- Tomar, A., Lohar, J., & Shrivastava, N. (2024). Parametric study of mechanically stabilised earth wall using PLAXIS. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1326(1), Article 012126. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1326/1/012126>

Wood, J. H., & Elms, D. G. (1990). *Seismic design of bridge abutments and retaining walls* (Road Research Unit Bulletin 84, Vol. 2). NZ Transport Agency.