

ANALISIS STABILITAS DINDING PENAHAN TANAH TIPE *MECHANICALLY STABILIZED EARTH* (MSE) PADA JALAN LAYANG BANTAIAAN SUMATERA SELATAN

Erwin Ansori^{1*} dan Nurly Gofar²

¹Program Studi S2 Teknik Sipil, Program Pascasarjana, Universitas Bina Darma, Jl. Jendral Ahmad Yani No. 3, Seberang Ulu 1, Palembang 30111
*rwind2013@gmail.com

Masuk: 23-02-2025, revisi: 07-04-2025, diterima untuk diterbitkan: 02-05-2025

ABSTRACT

Mechanically Stabilized Earth (MSE) walls are an effective solution for improving the stability of vertical slope in civil infrastructure projects. This study aims to back-calculate the external and internal stability of MSE walls constructed behind the elevated part of a Flyover Bantaian in Muara Enim Regency, South Sumatra. Subsequently, the optimum design was proposed in terms of the required tensile strength and pull-out resistance of the reinforcement. Analytical and numerical analyses were adopted in this study. The results indicate that the MSE wall is safe against both external and internal failures under both static and seismic loads. The obtained safety factors comply with the SNI 8460-2017 standard. The MSE wall used geogrids with an initial tensile strength (T_u) of 100 kN/m as reinforcement. However, this study suggested that the minimum required tensile strength of the geogrid is 38.79 kN/m. This study contributes to optimizing design and reinforcement material selection to enhance the efficiency and safety of MSE wall structures.

Keywords: MSE Wall; external stability; internal stability; geogrid; safety factor

ABSTRAK

Dinding penahan *Mechanically Stabilized Earth* (MSE) merupakan solusi efektif untuk meningkatkan stabilitas timbunan tanah pada proyek infrastruktur sipil. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung kembali stabilitas eksternal dan internal dinding MSE yang dibangun di belakang bagian yang ditinggikan pada jalan layang Bantaian di Kabupaten Muara Enim, Sumatera Selatan. Selanjutnya desain optimum diusulkan dalam hal kekuatan tarik dan ketahanan terhadap cabutan (*pull-out*) bahan perkuatan. Analisis analitis dan numerik diadopsi dalam penelitian ini. Hasilnya menunjukkan bahwa dinding MSE aman terhadap kegagalan eksternal dan internal, baik di bawah beban statis maupun seismik. Faktor keamanan yang diperoleh mematuhi standar SNI 8460-2017. Dalam hal ini, dinding MSE menggunakan geogrid dengan kekuatan Tarik awal (T_u) 100 kN/m sebagai perkuatan. Namun, penelitian ini menunjukkan bahwa geogrid dengan kekuatan tarik minimum 38,79 kN/m cukup untuk digunakan sebagai perkuatan. Penelitian ini berkontribusi untuk optimasi desain dan mengusulkan desain yang lebih optimal dari segi kekuatan tulangan atau geogrid namun tetap menjaga keamanan struktur dinding MSE.

Kata kunci: Dinding penahan tanah MSE; stabilitas eksternal; stabilitas internal; geogrid; faktor keamanan

1. PENDAHULUAN

Dinding penahan tanah adalah salah satu komponen penting dalam pembangunan infrastruktur sipil, terutama pada kondisi dimana terdapat perbedaan elevasi yang signifikan. Sebagai contoh pada pembangunan jalan layang (*Fly over*), terdapat bagian yang ditinggikan, sehingga perlu adanya dinding penahan tanah di sisi kiri dan kanan bagian bawah yang ditinggikan tersebut. Dinding penahan tanah adalah suatu konstruksi yang mempunyai fungsi untuk menahan gaya tekanan aktif lateral dari tanah maupun air (Salim & Suhendra 2021). Beberapa jenis dinding penahan tanah konvensional yang umum digunakan seperti dinding penahan tipe gravitasi, dinding cantilever, dan *counterfort* memerlukan biaya yang besar, tumpuan yang berat dan tidak ramah lingkungan (Pons et al., 2018). Dinding ini juga merupakan tipe perkuatan pasif dimana kekuatannya hanya akan termobilisasi bila terjadi pergerakan tanah yang cukup besar (Gofar & Satyanaga, 2022). Sebagai alternatif telah dikembangkan metode yang lebih fleksibel termasuk *soil nailing*, *ground anchors*, *gabions*, *wire-meshes*, *shotcrete*, dan dinding penahan tanah yang diperkuat (*reinforced earth walls*). Sistem perkuatan ini bersifat aktif yaitu dapat berfungsi sebelum terjadi pergerakan tanah.

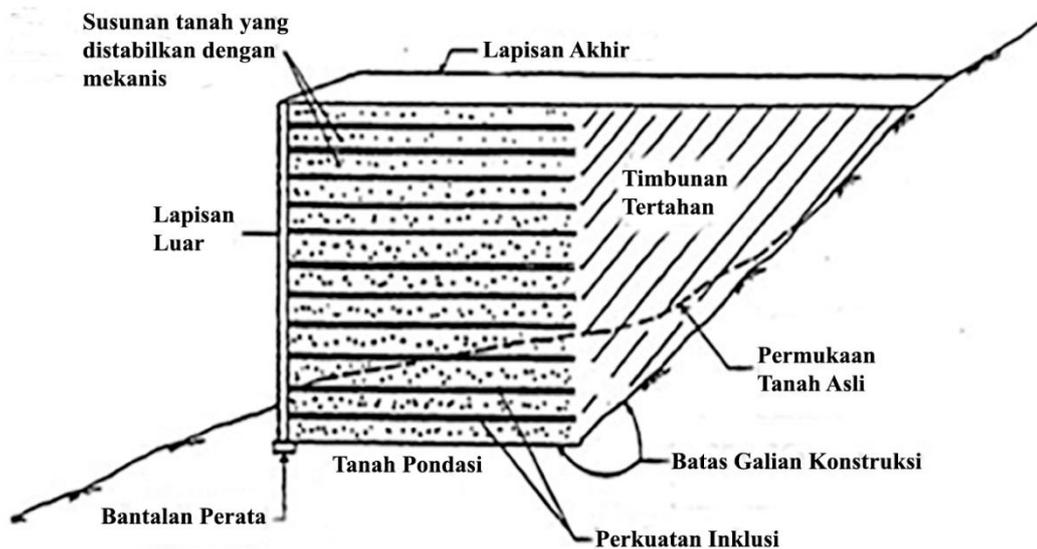
Salah satu sistem yang banyak digunakan adalah *Mechanically Stabilized Earth Wall* (selanjutnya disebut dinding MSE) (Berg, 2009). Dinding MSE merupakan dinding penahan tanah yang menggunakan perkuatan internal secara

berlapis dengan mekanisme friksi antara tanah dengan material perkuatan (Hidayat, 2021). Penggunaan dinding MSE menjadi pilihan alternatif dinding penahan tanah karena memerlukan biaya konstruksi yang relatif lebih murah (Gofar, 2008), secara teknis lebih mudah dikerjakan, dan memerlukan ruang konstruksi yang lebih kecil dibandingkan dengan dinding penahan tanah dengan tipe gravitasi ataupun *cantilever*.

Seperti diperlihatkan pada Gambar 1, dinding MSE terdiri dari tiga komponen yaitu tanah pengisi (*backfill*), perkuatan (*reinforcement*) and penutup (*facing*). Tanah berkualitas baik digunakan sebagai tanah pengisi pada bagian belakang dinding penahan tanah. Tanah ini harus memenuhi syarat yang berlaku pada tanah timbunan yang baik yaitu tanah granular, karena tanah granular cenderung memiliki kekuatan yang tinggi, serta dapat meluluskan air dengan cepat (Batara & Gofar, 2024). Selain itu tanah granular juga mudah dipadatkan. Namun penelitian yang dilakukan oleh Salim dan Suhendra (2021) menunjukkan bahwa tanah lokal (tanah merah yang berasal dari lokasi konstruksi) dapat digunakan secara efektif sebagai material pengisi dalam MSE Wall. Penelitian lanjutan oleh Aziza & Suhendra (2022) dengan memvariasikan jenis tanah pengisi (*backfill*), jarak perkuatan dan kekuatan tarik perkuatan menyimpulkan bahwa penggunaan tanah lempung sebagai tanah pengisi cenderung lebih stabil dalam menahan gaya lateral dibandingkan dengan jenis tanah pasir. Namun penelitian oleh Hidayat (2021) menyimpulkan bahwa penggunaan tanah granular tetap lebih baik terutama untuk dinding yang terpapar dengan curah hujan karena tanah granular dapat meluluskan air lebih cepat sehingga menghindari peningkatan tekanan air pori yang berpotensi mengurangi kekuatan tanah.

Dimensi MSE Wall direncanakan berdasarkan tinggi tanah yang ditahannya (H). Dalam disain awal, digunakan lebar dinding sebesar $L = 0.7H$ (Berg, 2009). Lebar ini juga menjadi dasar penentuan awal panjang perkuatan yang diperlukan. Material perkuatan biasanya dipasang pada setiap ketebalan tertentu. Batang baja (*metal strip*) atau geosintetik tipe geogrid umum digunakan sebagai perkuatan (*reinforcement*). Geogrid dipilih sebagai bahan perkuatan MSE Wall karena kekuatan tarik dan modulus yang tinggi serta lobang pada geogrid dapat meningkatkan gaya gesek antara perkuatan dan tanah, sehingga dapat menahan tekanan cabut dengan lebih baik (Gofar, 2008).

Sebagai penutup muka dinding digunakan berbagai bentuk modul yang terbuat dari beton atau bahan lainnya yang tahan terhadap sinar ultraviolet dan berbagai hal yang dapat mengganggu kekuatannya. Geosintetik dari tipe geotekstil maupun geogrid juga dapat digunakan sebagai bahan penutup MSE Wall. Pada dinding penahan tanah tipe Geobarrier (GBS) digunakan penutup berupa tanaman sehingga dinding terlihat natural dan estetik (Rahardjo et al. 2019).



Gambar 1. Komponen *Mechanically Stabilized Earth Wall* (Berg, 2009)

Studi mengenai stabilitas MSE Wall sebagai dinding penahan tanah pada jalan layang telah dilakukan oleh Salim dan Suhendra (2021). Analisis dilakukan secara analitis menggunakan metode yang dipaparkan dalam Manual FHWA (Berg, 2009) dan pemodelan menggunakan metode elemen hingga (FEM). Hasil analisis menunjukkan bahwa panjang penjangkaran minimum untuk tanah pengisi pasir $L = 0,66 H$ dan untuk bahan pengisi dari tanah merah $L = 0,60 H$. Analisis menggunakan FEM menunjukkan bahwa deformasi vertikal dan horizontal maksimum yang terjadi pada dinding MSE dengan material timbunan tanah merah lebih kecil dari pada pasir.

SNI 8460-2017 mensyaratkan bahwa analisis stabilitas dinding MSE harus dilakukan dengan mempertimbangkan gaya gempa jika lereng galian atau timbunan direncanakan dibangun di dekat area pemukiman atau dibangun dengan kriteria kepentingan strategis yaitu dengan kondisi tidak boleh mengalami keruntuhan atau terputusnya jalur transportasi setelah terjadi gempa rencana. Didalam SNI 8460-2017 juga disebutkan bahwasanya gempa rencana untuk lereng galian dan timbunan ditetapkan dengan kemungkinan terlewati besarnya dengan periode ulang 1000 tahun dengan mengacu kepada peta gempa yang tercantum dalam SNI 1726:2019 (Badan Standarisasi Nasional, 2019). Dalam hal ini digunakan model pseudostatik dimana FK harus lebih besar dari 1,1. Standar ini digunakan untuk memastikan bahwa dinding MSE dan material geosintetik yang digunakan dalam perencanaan untuk menahan beban dan gaya yang akan diterima selama masa konstruksi, memenuhi standar keamanan minimum yang diterapkan oleh SNI.

Dinding MSE dipilih sebagai penahan pada pembangunan Jalan Layang (*Flyover*) Bantaian yang merupakan bagian dari ruas jalan Prabumulih – Muara Enim Sumatera Selatan (Gambar 2). Dinding MSE direncanakan untuk menahan peninggian tanah di sebelah kiri dan kanan jalan. Artikel ini membahas hasil analisis kembali (*back-analysis*) stabilitas eksternal dan internal dinding MSE yang digunakan dengan menggunakan data data perencanaan yang di dapat dari kontraktor pelaksana. Selanjutnya analisis juga dilakukan untuk mendapatkan disain optimum dalam hal penggunaan material perkuatan dari sisi kekuatan tarik (*tensile strength*) dan cabutan (*pull-out*).



Gambar 2. Lokasi Flyover Bantaian

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan analisis kembali dinding penahan tanah tipe MSE yang dibangun di bawah jalan layang Bantaian, Sumatra Selatan. Penelitian dimulai dengan pengumpulan data yang berkaitan dengan konstruksi yang ditinjau. Data-data ini berupa data sekunder karena didapatkan dari kontraktor pelaksana yaitu data *Engineering Drawing*, laporan perhitungan struktur dinding MSE dan data pengujian tanah *Boring Log*. Setelah data terkumpul maka dilakukan analisis ulang terhadap stabilitas konstruksi berdasarkan kriteria yang diberikan dalam Pedoman Perancangan Geoteknik SNI 8460-2017. Dalam hal ini dilakukan analisis stabilitas eksternal dan internal konstruksi dinding MSE. Hasil yang diharapkan adalah bahwa konstruksi yang ada memiliki keamanan yang cukup untuk menanggung beban statis maupun dinamis dan mengusulkan tipe perkuatan yang optimum untuk desain yang ada.

Penelitian dilakukan dalam dua tahapan yaitu (1) menganalisis stabilitas dinding MSE pada kondisi eksisting dan (2) mendapatkan disain optimum dari segi penggunaan material perkuatan. Tahapan pertama dilakukan dengan menggunakan metode analitis untuk perhitungan stabilitas eksternal (Guling, Geser, Daya Dukung Pondasi) dan analisis numerik menggunakan perangkat lunak SLOPE/W (Geoslope International, 2018) untuk perhitungan stabilitas global dimana keseluruhan dinding MSE dianggap sebagai satu kesatuan dan bidang runtuh di luar area dinding penahan tanah. Selanjutnya dilakukan analisis stabilitas internal (*tensile Strength* dan *pull out*) dengan

menganggap bidang runtuh terletak di dalam dinding tubuh penahan tanah. Tahapan ke dua adalah dengan menggunakan konfigurasi MSE Wall yang sama dengan tahapan pertama, namun memvariasikan penggunaan material perkuatan dari sisi kekuatan tarik (*tensile strength*) dan cabutan (*pull-out*) untuk menyarankan disain optimum. Variasi karakteristik perkuatan material perkuatan diberikan pada Tabel 1.

Table 1. Geogrid yang digunakan pada studi kasus dan variasi yang digunakan dalam penelitian

		Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Variasi 4	Variasi 5
	Unit	Miragrid GX 40/40	Miragrid GX 60/30	Miragrid GX 80/30	Miragrid GX 100/30	Miragrid GX 130/30
Kekuatan Tarik awal (<i>tensile strength</i>) T_u	KN/m	40	60	80	100	130
Kekutan Tarik yang diizinkan $R_t = T_a$	KN/m	22	33	44	55	72

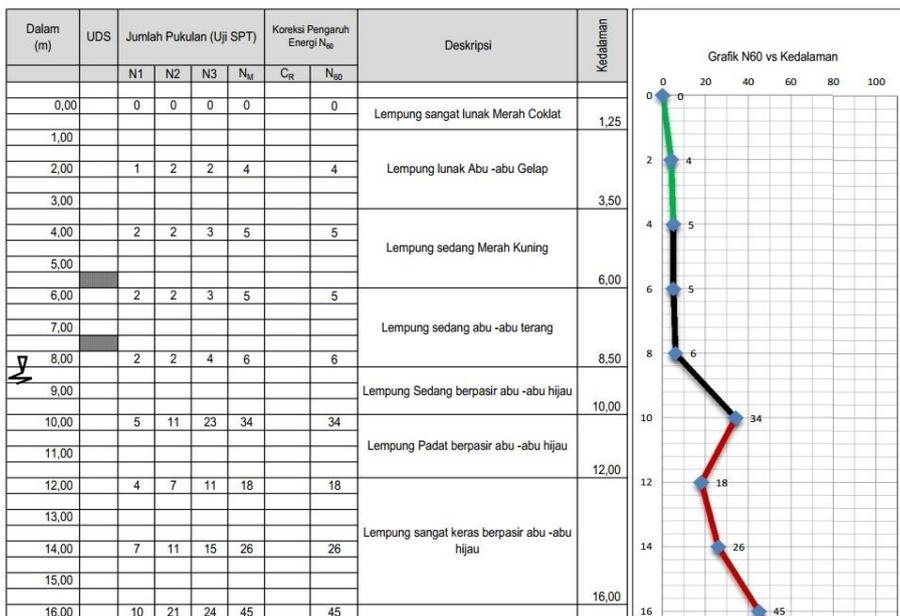
Pengumpulan Data

Parameter tanah yang harus diidentifikasi dalam perencanaan dinding MSE adalah (1) parameter tanah dasar dan (2) parameter tanah timbunan. Untuk parameter tanah dasar, digunakan hasil penyelidikan lapangan yaitu Standard Penetration Test (NSPT) (Gambar 3) yang dikorelasikan dengan parameter - parameter disain sesuai dengan standar yang berlaku (SNI). Dari bor-log yang ditampilkan pada Gambar 3, dapat disimpulkan bahwa tanah berupa lempung lunak sampai pada kedalaman 8 m. Di bawahnya sampai kedalaman 16 m berupa tanah lempung dengan konsistensi padat dan mengandung pasir. Untuk mendapatkan nilai kekuatan geser dilakukan dengan pendekatan korelasi antara NSPT Lempung dengan *Undrained Cohesion* (C_u) untuk tanah alluvial (Krisnanto et al, 2023). Nilai C_u untuk setiap lapisan disajikan pada Tabel 2.

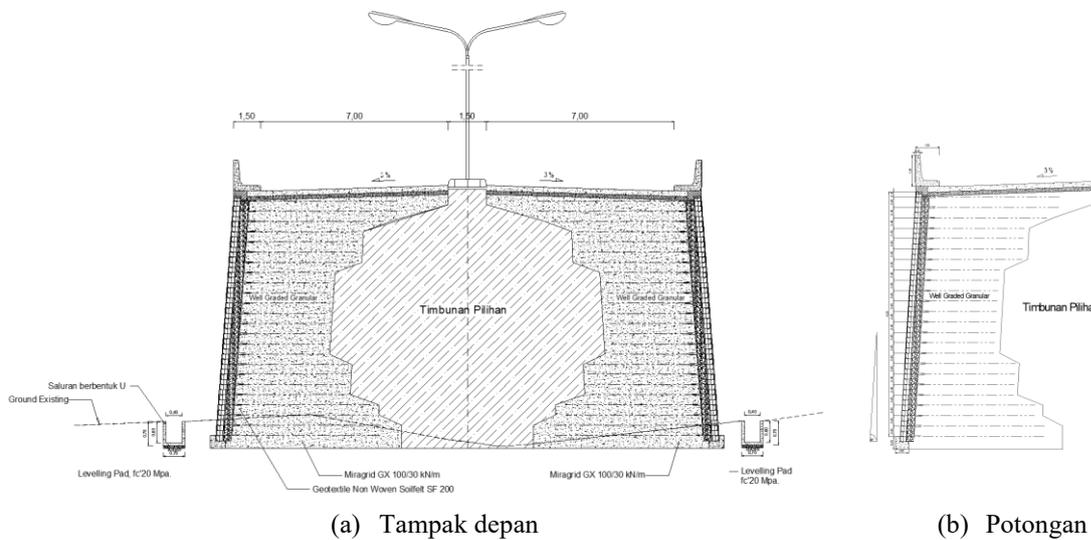
Gambar 4 memperlihatkan konfigurasi dinding MSE yang digunakan pada Flyover Bantaian. Material yang digunakan sebagai sistem dinding MSE pada proyek ini adalah *CornerStone® Wall Solution™ System* (Wall Solution™ Inc., 1992) yaitu dinding beton segmental disusun vertical yang terintegrasi dengan perkuatan geosintetik, dan material timbunan yang dipadatkan sehingga menciptakan kesatuan dalam keseluruhan system. Dapat dilihat dari Gambar 4, bahwa ada dua jenis tanah pengisi dalam konstruksi ini yaitu: tanah granular yang digunakan pada bagian yang diperkuat (*reinforced zone*) dan tanah timbunan pilihan yang digunakan pada bagian belakang dinding (*retained zone*). Sifat tanah granular dan tanah timbunan terpilih diperlihatkan pada Tabel 3.

Pekerjaan : Pembangunan Fly Over Kereta Api Bantaian
 Kode titik : BH 01 - ABD 1
 Lokasi : Perlintasan Kereta Api Bantaian Kec. Gunung Megang
 MAT : 2,25 Meter

Tanggal Mulai : 10 Maret 2023
 Tanggal Selesai : 13 Maret 2023
 Operator : S.G Tambunan



Gambar 3. Borelog hasil penyelidikan tanah pada *Borehole 01*



Gambar 4. Tampak depan dan samping dinding MSE pada Flyover Bantaian (BPJNSS (2015) DED Pembangunan Fly Over Kereta Api Bantaian Sumatra Selatan)

Table 2. Berat jenis dan kuat geser tanah pondasi berdasarkan korelasi dengan nilai SPT

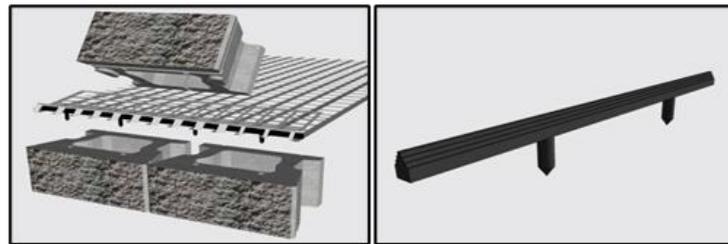
Kedalaman (m)	Berat jenis (γ) kN/m ³	Sudut geser dalam (ϕ')	Kohesi (c) kPa
0 – 2,00	15,04	0	24
2,00 – 4,00	15,04	0	30
4,00 – 8,00	15,04	0	36
8,00 – 10,00	15,04	0	120
10,00 – 12,00	15,04	0	150
12,00 – 14,00	15,04	0	130
14,00 – 16,00	15,04	0	250

Table 3. Parameter tanah pengisi pada bagian yang diperkuat dan tanpa diperkuat

Deskripsi	Unit	Reinforced Zone	Retained Zone
Jenis tanah	-	Granular dengan PI <6%	Timbunan Pilihan
Berat isi	kN/m ³	19,9	18,0
Cohesion (c)	kPa	2	60
Friction Angle (ϕ)	°	32	5

Material geogrid berfungsi sebagai perkuatan utama dalam system dinding MSE pada konstruksi Flyover Bantaian. Jenis geogrid yang digunakan dalam konstruksi MSE Wall ini adalah Miragrid GX 100/30 dengan kuat tarik initial (T_u) 100 kN/m.

Dinding MSE ini berfungsi menahan jalan layang di atasnya. Dengan demikian beban lalu lintas harus dipertimbangkan selain dari berat sendiri konstruksi jalan. Beban kerja yang digunakan dalam analisis ini sesuai dengan SNI 8460 (2017) untuk jalan Kelas I yaitu beban lalu lintas sebesar 15 kPa dan beban di luar jalan (bangunan disekitar lereng) sebesar 10 kPa. Material penutup yang digunakan sebagai *facing* adalah dinding beton segmental disusun vertical yang terintegrasi dengan perkuatan geogrid melalui sambungan yang unik. Gambar 5 memperlihatkan dinding beton segmental dan system sambungan dengan perkuatan geogrid.



Gambar 5. Penutup (facing) yang digunakan dan sistem sambungan dengan perkuatan geogrid (Wall Soluton Inc, 1992)

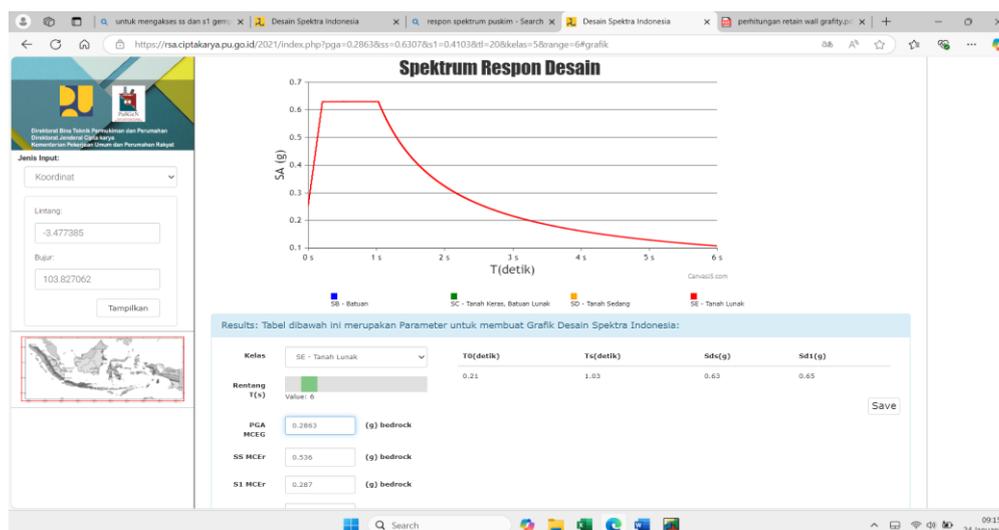
Kriteria Desain

Standar Persyaratan kestabilan dinding MSE dengan perkuatan geosintetik yang disarankan SNI 8460-2017, Sub 10.5.5.1 dan Sub 10.5.5.5. adalah Faktor Keamanan Statis dan Faktor keamanan seismik/Gempa selanjutnya di nyatakan sebagai FK. FK statis adalah FK dalam kondisi statis (tidak terbebani gempa). FK statis untuk dinding penahan tanah tipe MSE diberikan pada Tabel 4. FK seismik adalah FK dalam kondisi terbebani oleh percepatan gempa. Berdasarkan SNI 8460:2017, Sub 7.5.1.1, Dalam hal ini digunakan model pseudostatik dimana FK harus lebih besar dari 1,1. Standar ini digunakan untuk memastikan bahwa dinding MSE dan material geosintetik yang digunakan dalam perencanaan untuk menahan beban dan gaya yang akan diterima selama masa konstruksi, memenuhi standar keamanan minimum yang diterapkan oleh SNI 8460-2027.

Disain respons spektra untuk kondisi proyek yang di analisis di berikan pada Gambar 6. Berdasarkan Gambar 6, percepatan batuan dasar $S_s = 0.536g$ dan $S_l = 0.287g$, maka nilai koefisien kecepatan horizontal $k_h = 0.536/9.81 = 0.055$ dan nilai koefisien kecepatan vertikal $k_v = 0.287/9.81 = 0.029$ (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2017).

Tabel 4. Persyaratan stabilitas eksternal dinding MSE (SNI 8460-2017)

Potensi kegagalan		FK
Eksternal	Geser lateral pada dasar	$\geq 1,5$
	Eksentritas resul gaya-gaya (momen guling)	≥ 2
	Eksentritas	$e \leq L/6 = 1,17$
	Daya Dukung	$\geq 2,5$
	Stabilitas Global	$\geq 1,3$
Internal	Tahanan Cabut (Pull Out)	1,5
	Tekanan Tarik Tarik ijin Melalui Perkuatan	1,5

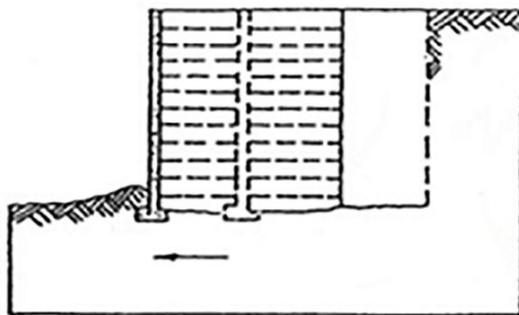


Gambar 6. Desain Respon Spektra Indonesia (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

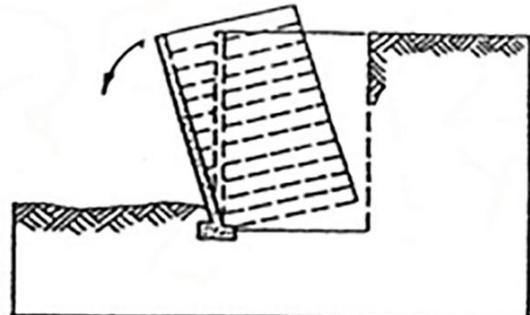
Analisis Stabilitas Eksternal

Analisis stabilitas dilakukan dinding MSE tertinggi seperti ditunjukkan pada Gambar 4 dengan ketinggian 9,4 m dan lebar 7 m. Analisis stabilitas eksternal dilakukan terhadap kestabilan dinding MSE terhadap bahaya geser, guling, dan daya dukung tanah pondasi, dan stabilitas lereng (Gambar 7). Untuk stabilitas dinding terhadap geser, guling dan daya dukung pondasi, analisis dilakukan secara analitis mengikuti metode FHWA (Berg, 2009), sedangkan analisis stabilitas global menggunakan program SLOPE/W (Geoslope International, 2018). Analisis stabilitas dilakukan untuk kondisi statik dan dengan memperhitungkan gaya gempa (seismik).



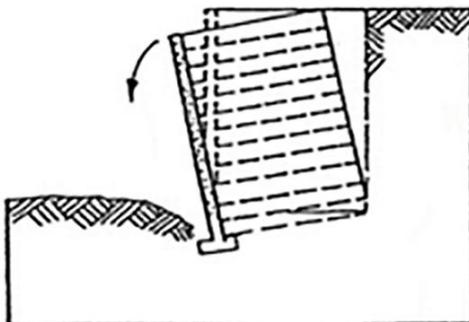
(a) Geser

$$Fk_{geser} = \frac{\sum V}{\sum H} \geq 1.5$$



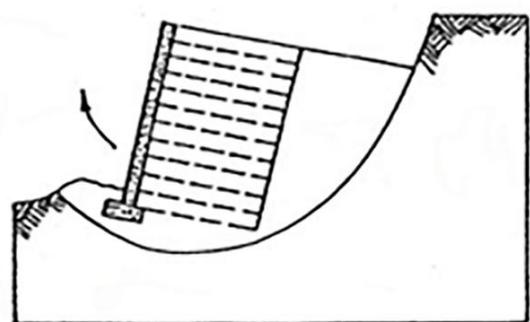
(b) Guling

$$Fk_{guling} = \frac{\sum MT}{\sum MG} \geq 2.0$$



(c) Daya Dukung

$$Fk \text{ (bearing)} = \frac{q_{ult}}{\sigma_{vb}} \geq 2.5$$



(d) Global

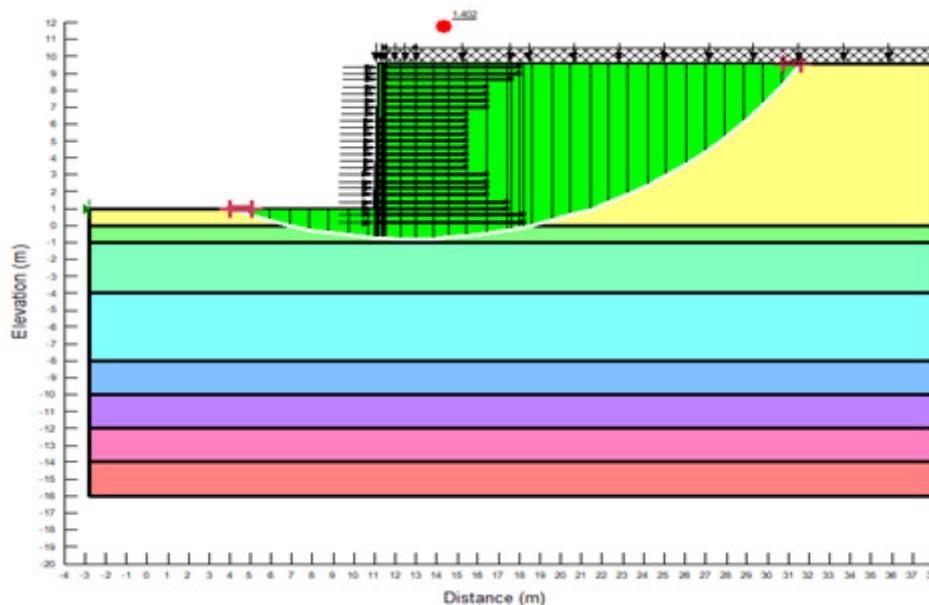
Fk Global dianalisis dengan SLOPE/W Metode Bishop dimana persyaratan:

$$Fk_{global} \text{ Statis} \geq 1.3$$

$$Fk_{global} \text{ Dinamic} \geq 1.1$$

Gambar 7. Analisis stabilitas eksternal dinding MSE (Berg, 2009)

Gambar 8 memperlihatkan analisis stabilitas lereng secara global menggunakan SLOPE/W untuk kondisi gempa. Hasil analisis menunjukkan bahwa dinding MSE aman terhadap kegagalan lereng secara global dengan FK statik dan dinamik berturut turut sebesar 1,753 (>1,3 menurut SNI 8460, 2017) dan 1,402 (>1,1 menurut SNI 1726:2019). Hasil analisis untuk stabilitas terhadap geser, guling dan daya dukung pondasi disajikan dalam Tabel 6. Dapat disimpulkan bahwa berdasarkan hasil perhitungan angka keamanan tidak ada potensi kegagalan eksternal, struktur dinding MSE di Flyover Bantaian terhadap Guling, Geser, Daya dukung Pondasi dan stabilitas lereng secara global.



Gambar 8. Output Geostudio Stabilitas global dengan pertimbangan beban gempa (dinamik)

Tabel 6. Rekapitulasi FK minimum untuk potensi kegagalan eksternal.

No	Potensi Kegagalan Eksternal	Stabilitas Statis	FK	Ket	Stabilitas Dinamis	FK	Ket
1	Geser Lateral pada dasar	3,871	$\geq 1,5$	Aman	3,46	$\geq 1,5$	Aman
2	Eksentritas result gaya-gaya (momen Guling)	3,65	≥ 2	Aman	3,3	≥ 2	Aman
3	Eksentritas Daya Dukung	0,63	$e \leq L/6 = 1,17$	Aman	0,74	$e \leq L/6 = 1,17$	Aman
4	Stabilitas Global	2,7	$\geq 2,5$	Aman	2,6	$\geq 2,5$	Aman
		1,753	$\geq 1,3$	Aman	1,402	$\geq 1,3$	Aman

Analisis Stabilitas Internal

Analisis stabilitas internal dilakukan terhadap kekuatan tarik perkuatan geogrid (*tensile strength*) dan tahanan setiap lapisan perkuatan terhadap cabutan (*pull-out*). Tensile strength mengacu pada kemampuan geogrid untuk menahan gaya tarik yang diberikan oleh tanah atau beban lainnya. *Pull-out* adalah gaya yang diperlukan untuk menarik geogrid keluar dari tanah atau agregat. *Pull-out resistance* adalah kemampuan geogrid untuk menahan gaya pull out dan tetap berada di tempatnya. Dalam hal ini dilakukan analisis secara analitis mengikuti prosedur yang diberikan dalam manual FHWA (Berg, 2009). Berikut adalah rumus yang digunakan dalam analisis stabilitas internal.

Analisis stabilitas internal terhadap tarikan :

$$T_{i\max} = 1/2 \cdot (q_{ai} + q_{a(i+1)}) \cdot s_{vi}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

dimana:

n = jumlah perkuatan

s_{vi} = panjang distribusi tekanan lateral aktif

$$FSrp = \frac{T_a}{T_{\max}} \geq 1.5 \quad (2)$$

dengan:

T_a = characteristic initial strength material

Analisis stabilitas internal terhadap cabutan :

$$T_{po} = 2F^* \cdot \alpha_{se} \cdot R_c \cdot \sigma_z \cdot L_a = 2C_i \cdot R_c \cdot \sigma_z \cdot L_a \quad (3)$$

dimana:

α_{se} = faktor koreksi tipe perkuatan (perkuatan baja = 1,0; geogrid = 0,8; geotextile = 0,8)

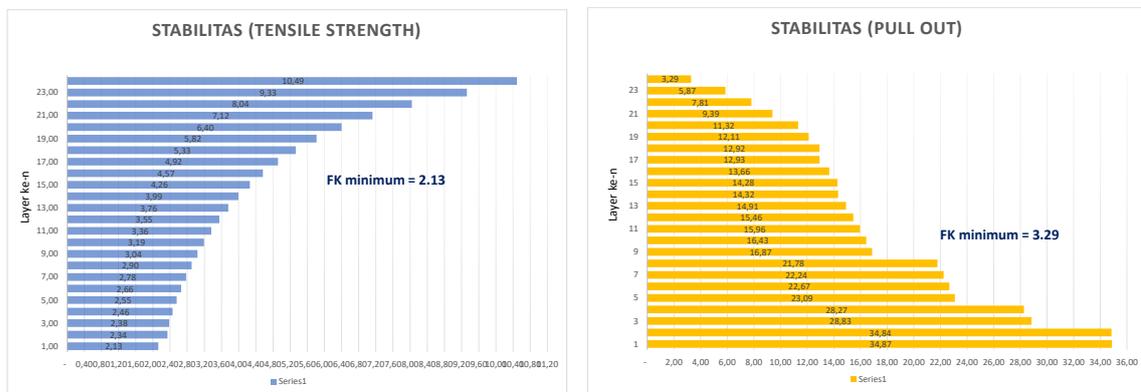
- R_c = persentase cakupan kekuatan
- σ_z = tegangan vertikal kekuatan pada kedalaman z dari atas dinding
- L_a = panjang kekuatan pada tanah timbunan
- F^* = faktor gesekan tarik.

Nilai F^* =

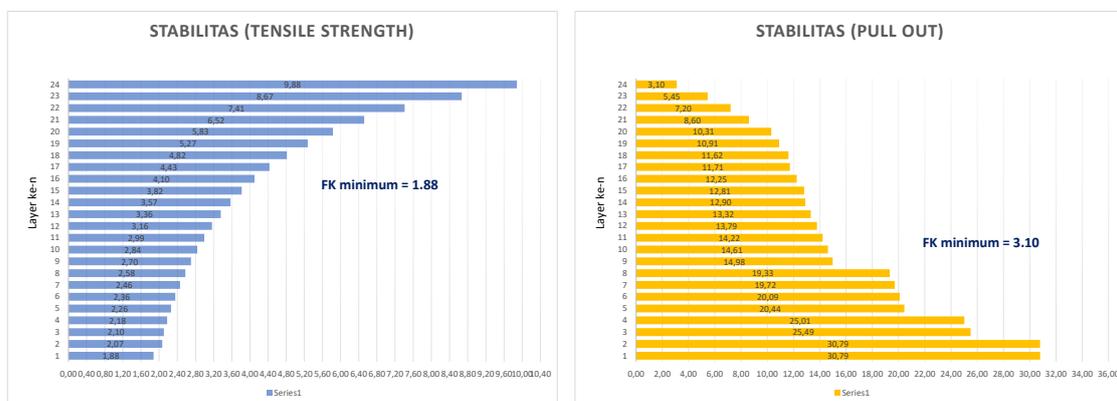
$$FS_{po} = \frac{T_{PO}}{T_{max}} \geq 1.5 \quad (4)$$

Konfigurasi dinding MSE dengan panjang kekuatan yang bervariasi diperlihatkan pada Gambar 4b. Tinggi dinding 9,4 m dan lebar adalah setengah dari lebar jalan yaitu 7 m. Jarak vertikal antara kekuatan sama dengan tinggi penutup muka yakni 0,4 m. Perkuatan geogrid dengan tipe Miragdrid GX 100/30 digunakan dalam analisis ini. Panjang kekuatan bervariasi dengan panjang maximum pada bagian atas dan bawah sedangkan panjang minimum pada bagian tengah tinggi dinding. Hal ini sesuai dengan analisis terdahulu dimana lapisan perkuatan bagian atas rentan terhadap cabutan sedangkan lapisan perkuatan bagian bawah rentan terhadap tarikan (Gofar, 2008). Persentase cakupan geogrid, $R_c = 100\%$.

Hasil analisis dalam konteks FK setiap lapisan diberikan pada Gambar 9 (statis) dan Gambar 10 (dengan pertimbangan beban gempa). Hasil ini membuktikan penelitian terdahulu (Gofar, 2008) bahwa perkuatan yang lebih panjang diperlukan untuk lapisan bagian atas karena tahanan terhadap cabutan di bagian atas sangat kecil. Sedangkan perkuatan yang lebih panjang diperlukan di bagian bawah untuk menahan tarik karena tekanan lateral yang harus ditahan makin besar seiring dengan kedalaman lapisan perkuatan itu sendiri. Dari hasil analisis di atas didapatkan bahwa FK minimum untuk cabutan (*pull-out*) pada lapisan paling atas adalah 2.13, sedangkan untuk kondisi dengan pertimbangan beban gempa adalah 1.88. Penurunan FK cabutan untuk kondisi dinamik adalah karena gempa memberikan beban lateral tambahan terhadap dinding penahan tanah sedangkan kapasitas gesekan antara geogrid dan tanah tetap atau dapat berkurang akibat getaran.



Gambar 9. Grafik FK terhadap posisi perkuatan (statis)



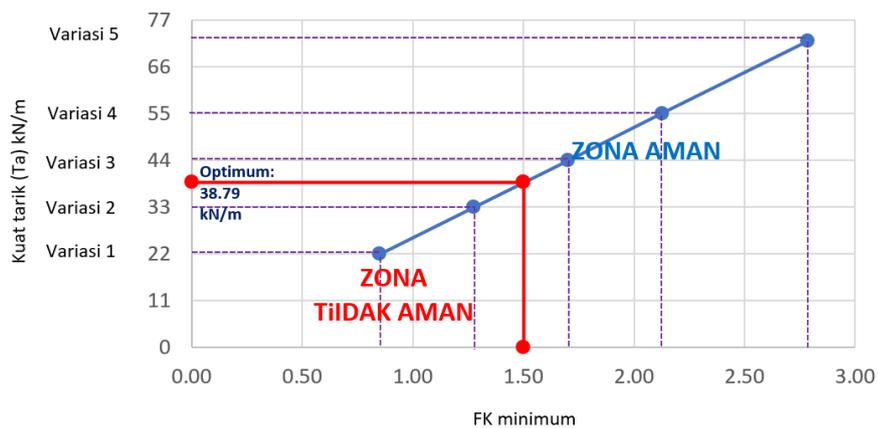
Gambar 10. Grafik FK terhadap posisi perkuatan (dengan pertimbangan beban gempa)

Variasi Faktor keamanan dengan Kuat Tarik Geogrid

Hasil analisis di atas menunjukkan bahwa dinding MSE dengan konfigurasi yang digunakan pada konstruksi Flyover Bantaian yang ditinjau memiliki stabilitas yang baik terhadap kegagalan eksternal maupun internal. FK minimum yang didapatkan untuk stabilitas terhadap Tarik pada kondisi gempa adalah 1.88 sedangkan untuk cabutan adalah 3,10. Analisis lanjutan dilakukan untuk mendapatkan kondisi optimal dengan memvariasikan tipe geogrid yang digunakan seperti diperlihatkan pada Tabel 7. Faktor kewanan minimum yang didapatkan untuk variasi kekuatan tarik geogrid juga diperlihatkan pada Tabel 7. Hubungan antara faktor kewanan dengan kuat tarik geogrid diperlihatkan pada Gambar 11. Dengan menetapkan FK minimum untuk tarik pada kondisi statis sebesar 1,5 (SNI 8460-2017) . Maka didapatkan bahwa nilai optimum kekuatan tarik geogrid untuk perkuatan dinding adalah 38,79 kN/m. Sehubungan dengan ini maka nilai pull-out maximum adalah 601.07 kN/m.

Tabel 7. FK minimum untuk variasi kuat Tarik geogrid.

Variasi	Tipe Geogrid	Kuat Tarik (Ta) kN/m	FK Minimum
1	Miragrid GX 40/40	22	0,85
2	Miragrid GX 60/30	33	1,28
3	Miragrid GX 80/30	44	1,7
4	Miragrid GX 100/30	55	2,13
5	Miragrid GX 130/30	72	2,78

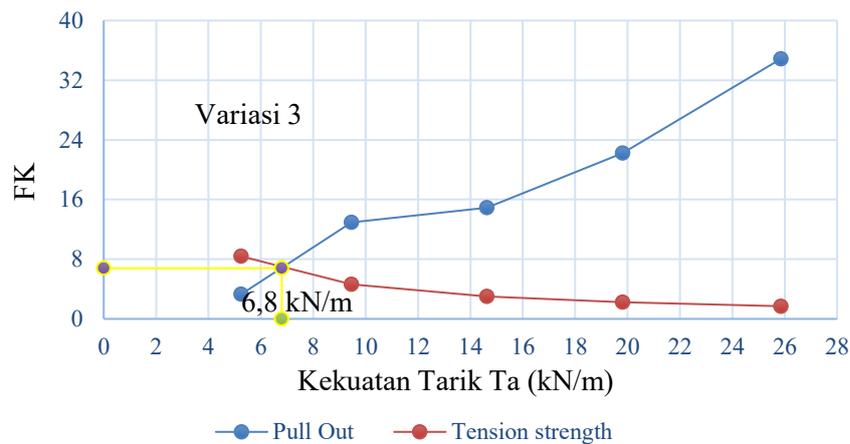


Gambar 11. Grafik hubungan antara kuat Tarik dan FK minimum

Persimpangan atau perpotongan antara kurva tensile strength dan pull out disebut "Titik Keseimbangan" atau "Titik Ekuilibrium". Titik ini menunjukkan kondisi di mana gaya tarik dan gaya cabutan pada geogrid mencapai keseimbangan. Pada titik ini, geogrid tidak mengalami pergerakan atau deformasi lebih lanjut. Satuan Titik Ekuilibrium Geogrid dinyatakan dalam satuan gaya per satuan panjang (kN/m). Hasil perhitungan titik ekuilibrium untuk ditampilkan pada Tabel 8 dan Gambar 12. Hasil analisis untuk semua variasi dan semua kondisi diperlihatkan pada Tabel 9.

Tabel 8. Titik ekuilibrium pada variasi 3

Lapisan (t) (m)	T _{PO}	T _{max}	T _a	FK	FK
	kN/m	kN/m	kN/m	Cabutan	Tarik
1	858,47	25,86	44	33,20	1,70
6	468,37	20,68	44	22,65	2,13
12	239,30	15,50	44	15,44	2,84
18	147,49	10,32	44	14,29	4,26
24	17,25	5,24	44	3,29	8,39
Nilai Titik Ekuilibrium (dari Gambar 11)					
Gaya dalam perkuatan		6,8	kN/m		
Stabilitas (FK)		6,8			



Gambar 12. Titik ekuilibrium pada variasi 3

Tabel 9. Rekapitulasi Hasil Analisis Variasi 1 – 5

Sampel	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Variasi 4	Variasi 5					
Property	Miragrid GX 40/40	Miragrid GX 60/30	Miragrid GX 80/30	Miragrid GX 100/30	Miragrid GX 130/30					
Characteristic Initial Strength T_u	40	60	80	100	130					
Characteristic Initial Strength $R_t = T_a$	22	33	44	55	72					
	Statik	Dina mik	Statik	Dina mik	Statik	Dina mik				
Titik Ekuilibrium	5,50	5,90	6,20	6,70	6,80	7,40	7,40	8,00	8	8,80
Stabilitas (FK)	4,00	3,90	5,50	5,30	6,80	6,50	8,10	7,50	9,50	9,0
Kriteria (FK)	1,5	1,1	1,5	1,1	1,5	1,1	1,5	1,1	1,5	1,1
Tensile Strength	0,85	0,75	1,28	1,13	1,70	1,5	2,13	1,88	2,78	2,46
Pull Out Resistance	3,29	3,10	3,29	3,10	3,29	3,10	3,29	3,10	3,29	3,10
	Tidak Aman		Tidak Aman		Aman		Aman		Aman	

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang dilakukan terhadap dinding MSE yang digunakan untuk menahan sisi kiri dan kanan jalan layang Flyover Bantaian di Muara Enim, Sumatra Selatan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Disain dinding MSE dan konfigurasi perkuatan (panjang dan jarak) memenuhi kriteria keamanan dari segi kegagalan eksternal maupun internal.
2. Dinding MSE yang digunakan aman apabila terjadi beban gempa dengan FK minimum 1,402 untuk stabilitas global.
3. Dari perhitungan stabilitas internal diperoleh gaya tarik maksimum dan kebutuhan kapasitas tarik geogrid sebesar 38,79 kN/m, lebih kecil daripada kekuatan Tarik yang tersedia (untuk tipe GX100/30) yaitu $T_u = 100$ kN/m dan $T_a = 55$ kN/m. Geogrid Tipe GX 80/30 dengan $T_u = 100$ kN/m dan $T_a = 55$ kN/m dapat digunakan sebagai perkuatan.
4. Geogrid merupakan perkuatan yang dapat di andalkan untuk konstruksi MSE karena konfiguranya memungkinkan adanya tahanan terhadap cabutan yang optimum.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada PT. Ricky Kencana Sukses Mandiri yang telah memberikan ijin penelitian dilokasi FO Bantaian.

DAFTAR PUSTAKA

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.

- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *Persyaratan perancangan geoteknik* (SNI 8460:2017). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung* (SNI 1726:2019). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Balai Besar Pelaksanaan Jalan Sumatra Selatan BPJNSS (2015) DED Pembangunan Fly Over Kereta Api Bantaian Sumatra Selatan
- Batara, M. & Gofar, N. (2024). Pengaruh penggantian tanah dan lapisan geotekstil terhadap deformasi dan stabilitas lereng timbunan di atas tanah lunak. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 7(3), 915-924
- Berg. (2009). Federal Highway Administration Manual: Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, FHWA-NHI-10-024 FHWA GEC 011 – Volume I U. S. Department of Transportation Publication.
- Wall Solution™ Inc. (1992): Cornerstone® : Calgary, Canada
- Geo-Slope International Ltd. (2018b) *SLOPE/W for Slope Stability Analysis*. Calgary, Canada
- Gofar, N. & Satyanaga, A. (2022). Sustainable retaining structure incorporating recycled concrete aggregate. *Indonesian Geotechnical Journal*, 1(3), 19-27
- Gofar, N. (2008) Geosynthetic Reinforced Soil Structure. IN N. Gofar & K.A. Kassim. *Ground Improvement and Stabilization*, Universiti Teknologi Malaysia.
- Hidayat, W. (2021). Analisis stabilitas dinding penahan tanah tipe mechanically stabilized earth (mse) wall terhadap curah hujan. *Ge-STRAM: Jurnal Perencanaan Dan Rekayasa Sipil*, 4(2), 69-76.
- Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. Manual Aplikasi RSA 2021*.
- Krisnanto, S., Irsyam, M., Kartiko, R. D., Sitepu, A. R. H., Fathoni, M. A., Nurjanah, I. A., ... & Alatas, I. M. (2023). Variability of N-SPT-correlated undrained shear strength of alluvial deposit in Doplang Region, Central Java, Indonesia. *Journal of Engineering & Technological Sciences*, 55(6), 647-658
- Pons, J. J., Penadés-Plà, V., Yepes, V., & Martí, J. V. (2018). Life cycle assessment of earth-retaining walls: An environmental comparison. *Journal of Cleaner Production*, 192, 411-420.
- Rahardjo, H., Satyanaga, A., Gofar, N., Leong, E. C., Kew, J. H., Wang, C. L., & Wong, J. L. H. (2019). Geobarrier system for protection against rainfall-induced slope failure. *ISSMGE International Journal of Geoengineering Case Histories*, 5(1), 26-42.
- Salim, Y., & Suhendra, A. (2021). Analisis stabilitas back-to-back mechanically stabilized earth walls (studi kasus jalan layang di Sulawesi Selatan). *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 4(3), 657-670.