

Studi Parametrik Pengaruh Spasi, Panjang, dan Kuat Tarik *Geogrid* Terhadap *Mechanically Stabilized Earth Wall* di Boyolali

Budijanto Widjaja¹, Ignatius Tommy Pratama^{1,*}, Daniel Sutanto¹

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung¹

Koresponden*, Email: tommyignatius@unpar.ac.id

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	24 Februari 2023	<i>Failures of a mechanically stabilized earth wall (MSE wall) could be caused by design errors and a lack of references on using cohesive backfill material. Thus, a series of parametric studies were performed to investigate the effects of a biaxial geogrid's vertical spacing, length, and tensile strength, each of which varied in three values, on the global stability of an MSE wall with a 15 m high cohesive backfill material in Boyolali. The finite element and limit equilibrium methods were used to obtain the global safety factors and the location of the weakest slip surfaces. Then, the soils' stress-strain response was modeled by the Mohr-Coulomb material model. The results show that reducing the geogrid's vertical spacing and increasing the geogrid's length and tensile strength increased the global safety factors. Furthermore, shorter spacing, longer length, and higher tensile strength of the geogrid also affected the location of the weakest slip surface.</i>
Diperbaiki	08 Mei 2023	
Disetujui	30 November 2023	

Keywords: MSE Wall, slope stability, geogrid, finite element method

Abstrak

Kegagalan dinding penahan tanah yang distabilkan secara mekanis (*mechanically stabilized earth retaining wall*, dinding MSE) dapat terjadi karena kesalahan desain dan kurangnya referensi terkait penggunaan tanah kohesif sebagai bahan timbunan. Maka, serangkaian studi parametrik dilakukan pada studi ini untuk menyelidiki efek jarak vertikal, panjang, dan kekuatan tarik *geogrid* biaksial, masing-masing divariasikan dalam tiga nilai, pada stabilitas global dinding MSE dengan ketinggian material timbunan tanah kohesif 15 m di Boyolali. Metode elemen hingga dan metode kesetimbangan batas digunakan dalam penelitian ini untuk mendapatkan faktor keamanan global dinding dan lokasi bidang gelincir terlemah. Selain itu, model material Mohr-Coulomb digunakan untuk memodelkan respon tegangan-regangan pada tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengurangan jarak vertikal *geogrid* dan peningkatan panjang *geogrid* dan kekuatan tarik meningkatkan nilai faktor keamanan global dinding MSE. Selain itu, jarak yang lebih pendek, panjang yang lebih panjang, dan kekuatan tarik *geogrid* yang lebih tinggi juga memengaruhi lokasi bidang gelincir terlemah.

Kata kunci: dinding MSE, kestabilan lereng, *geogrid*, metode elemen hingga

1. Pendahuluan

Dinding tanah yang distabilkan secara mekanis (*mechanically stabilized earth wall*) atau dinding MSE adalah struktur dinding penahan yang terdiri dari lapisan tanah timbunan yang dipadatkan dan elemen penguat tarik seperti *geogrid*, yang dipasang pada permukaan dinding. Koerner menjelaskan bahwa dibandingkan dengan jenis sistem dinding penahan tanah lainnya, terutama sistem dinding penahan tanah kaku, dinding MSE relatif lebih ringan, lebih fleksibel, lebih mudah untuk dibangun, dan lebih hemat biaya [1]. Di dalam FHWA-NHI-10-024 menunjukkan manfaat menggunakan dinding MSE adalah dinding MSE dapat menoleransi penurunan dan penurunan diferensial yang lebih besar dibandingkan dengan dinding penahan kantilever [2]. Namun, terlepas dari keunggulan dinding MSE, masih terdapat beberapa kegagalan dinding MSE karena berbagai aspek. Koerner dan Koerner menyatakan masih terdapat 82

kasus dinding MSE yang mengalami kegagalan dimana 76% kasus kegagalan dinding MSE dengan material timbunan tanah kohesif, 83% kasus menggunakan material perkuatan *geogrid*, dan 95% kejadian terjadi akibat kesalahan desain [3]. Kegagalan tersebut diduga karena kurangnya referensi tentang penggunaan tanah kohesif sebagai bahan tanah timbunan meskipun banyak standar desain seperti FHWA-NHI-10-024 [2] dan SNI 8460-2017 [4] telah dikembangkan. Oleh karena itu, penelitian penggunaan tanah kohesif dan material timbunan lainnya dalam desain dan konstruksi dinding MSE masih diperlukan.

Beberapa penelitian terdahulu terkait dengan stabilitas global dinding MSE telah dilakukan oleh Ozcelik, dkk. [5], Nasvi dan Krishnya [6], dan Chairullah, dkk. [7]. membandingkan efek jarak vertikal *geogrid* terhadap faktor keamanan (FK) global dinding MSE dengan tanah timbunan kohesif dan non kohesif homogen. Hasil studi Ozcelik, dkk.

[5] dan Chairullah, dkk. [7] menunjukkan bahwa faktor keamanan global meningkat dengan berkurangnya jarak vertikal antar *geogrid*. Ozcelik, dkk. [5] juga mempelajari efek panjang *geogrid* pada stabilitas global dinding MSE dan menemukan peningkatan faktor keamanan global seiring dengan bertambahnya panjang *geogrid*. Selain itu, Ozcelik, dkk. [5] dan Nasvi dan Krishnya [6] mempresentasikan dalam makalah mereka bahwa faktor keamanan global meningkat dengan meningkatnya kekuatan tarik maksimum *geogrid*. Namun, kenaikannya tidak signifikan apabila dibandingkan dengan kenaikan faktor keamanan global terhadap variasi jarak vertikal dan panjang *geogrid*. Berdasarkan hasil studi literatur, hasil penelitian terdahulu (Ozcelik, dkk. [5], Nasvi dan Krishnya [6]) dapat lebih dikembangkan seperti dengan mempertimbangkan keberadaan dinding muka (*wall facing*) dan tahap konstruksi lereng yang diperkuat *geogrid*. Hasil penelitian sebelumnya juga memerlukan verifikasi lebih lanjut dengan melakukan analisis pada kondisi lereng alami.

Kasus dinding MSE yang digunakan dalam penelitian ini akan dibangun pada lereng alami di Mojosoongo, Boyolali. Dengan demikian, serangkaian studi parametrik dilakukan untuk menyelidiki efek jarak vertikal, panjang, dan kekuatan tarik dari *geogrid* biaksial pada FK global minimum dinding MSE dan lokasi bidang gelincir terlemah. Kemudian, rangkaian konstruksi dan muka dinding disimulasikan dan dimodelkan dalam program numerik berbasis metode elemen hingga dan kesetimbangan batas.

Struktur makalah ini disusun sebagai berikut. Pertama, kondisi lokasi studi kasus diuraikan. Kedua, metode analisis, parameter yang digunakan dalam analisis, dan rencana analisis dijelaskan secara singkat. Akhirnya, tren perubahan FK global dan lokasi bidang gelincir terlemah terhadap variasi jarak vertikal, panjang, dan kekuatan tarik dari *geogrid* biaksial dibahas.

2. Metode

Dinding MSE akan dibangun di area yang direncanakan untuk pabrik beton pracetak di Mojosoongo, Boyolali dengan ketinggian sekitar 15 m dan kemiringan sekitar 83°. **Gambar 1** menunjukkan kondisi lereng eksisting pada Agustus 2021. Secara umum, menurut klasifikasi kemiringan lereng oleh Elewa dan Qaddah [8], kemiringan di wilayah proyek ini relatif curam, dengan kemiringan lebih besar dari 30°. Penyelidikan tanah awal di daerah ini terdiri dari tiga (3) uji sondir (*Cone Penetration Test*, CPT) dan satu (1) uji penetrasi *Standard Penetration Test* (SPT). Namun, dalam studi ini, hanya satu CPT yang dilambangkan sebagai S-1 dan satu SPT, yaitu BH-01 digunakan untuk mengidentifikasi

stratifikasi tanah di lapangan dan memperkirakan parameter tanah yang diperlukan untuk analisis numerik. Hal ini dilakukan karena lokasi CPT dan SPT terpilih relatif dekat dengan potongan penampang lereng yang akan dianalisis.

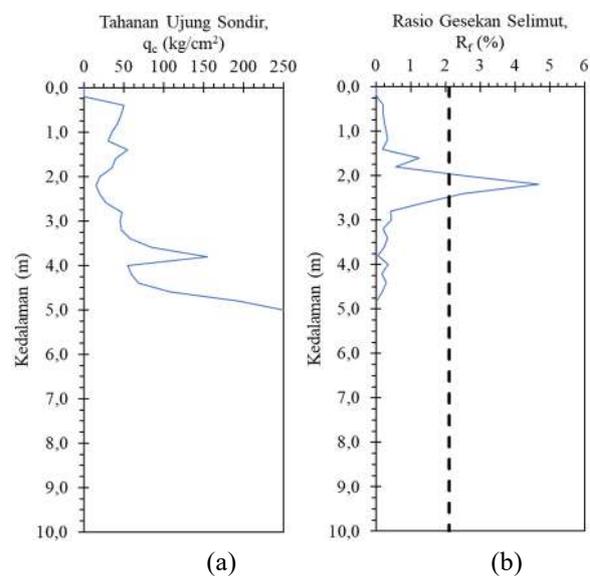


(a)



(b)

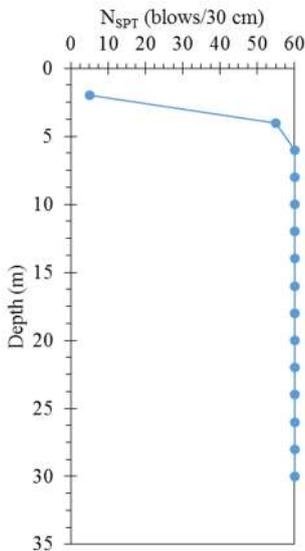
Gambar 1. (a) Foto Kondisi Lereng Galian dan (b) Foto Udara Lokasi Proyek pada Agustus 2021



Gambar 2. Profil (a) q_c terhadap Kedalaman dan (b) R_f terhadap Kedalaman

Pengujian CPT dilakukan di lereng atas dimana pabrik beton pracetak akan dibangun dan SPT dilakukan di dekat jalan dan ujung kaki lereng. **Gambar 2** menunjukkan profil tahanan ujung sondir (q_c) terhadap kedalaman dan rasio

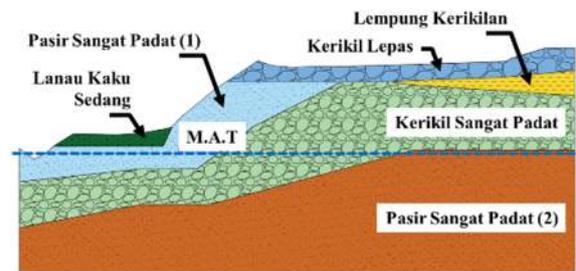
gesekan selimut (R_f) terhadap kedalaman CPT. Kemudian, **Gambar 3** menampilkan profil nilai SPT (N_{SPT}) terhadap kedalaman. Menurut **Gambar 2a** dan **Gambar 2b**, serta sistem klasifikasi tanah Schmertmann [9], jenis tanah di lokasi studi didominasi oleh tanah pasir dengan lensa lempung di kedalaman sekitar 2,2 m di bawah permukaan tanah. Pada uji bor dan SPT juga didapatkan jenis tanah yang relatif serupa, yaitu tanah pasir dan lanau dengan beberapa bongkahan batu. Kemudian, profil N_{SPT} vs kedalaman seperti pada **Gambar 3** menunjukkan bahwa kerapatan tanah pasir relatif lepas (*loose*) hingga sangat padat (*very dense*), dengan nilai N_{SPT} berkisar antara 5 hingga >60 pukulan/30 cm. Selain itu, menurut hasil pengamatan lapangan dan penyelidikan tanah, muka air tanah berada pada kedalaman kurang lebih - 6 m di bawah permukaan tanah di BH-01. **Gambar 4** mengilustrasikan estimasi stratifikasi tanah sebelum dan sesudah pembangunan dinding MSE.



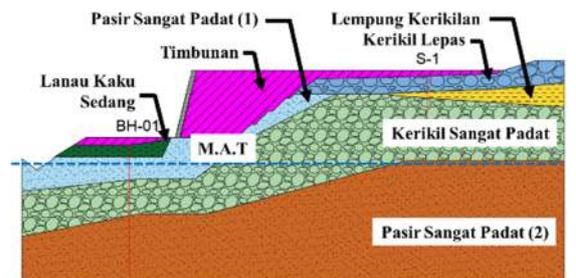
Gambar 3. Profil N_{SPT} vs. Kedalaman

Penelitian ini menggunakan dua metode analisis yaitu metode elemen hingga (MEH) dan metode kesetimbangan batas (MKB). Kedua metode numerik tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Sebagai contoh, MKB dapat menunjukkan banyak bidang gelincir, tetapi tidak dapat memberikan informasi tentang deformasi lereng. Sementara itu, MEH dapat memberikan besaran dan profil deformasi, serta dapat mensimulasikan proses konstruksi. Namun, pendekatan MEH hanya dapat menunjukkan bidang gelincir terlemah di mana kemungkinan terjadi kegagalan lereng. Oleh karena itu, penelitian ini juga bertujuan untuk membandingkan pengaruh variasi jarak vertikal, panjang, dan kekuatan tarik *geogrid* terhadap faktor keamanan global

(FK) dan lokasi bidang gelincir yang diperoleh dari analisis numerik menggunakan MKB dan MEH.

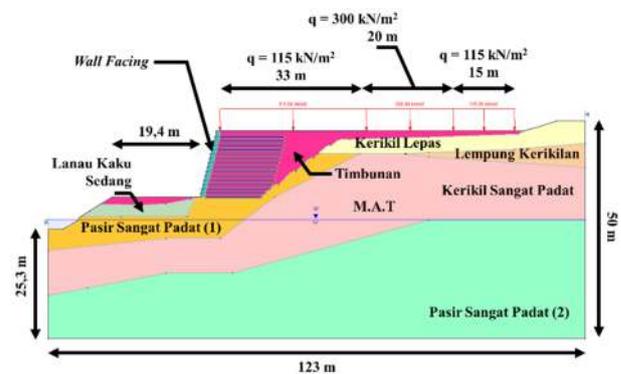


(a)



(b)

Gambar 4. Stratifikasi Tanah (a) Sebelum dan (b) Sesudah Pembangunan Dinding MSE



Gambar 5. Model Potongan Lereng dengan Dinding MSE pada Program SLIDE

Meskipun MEH dan MKB menyatakan keamanan lereng melalui FK, kedua metode menggunakan pendekatan yang berbeda dalam menghitung nilai FK. MKB secara umum mendefinisikan FK sebagai rasio antara gaya penahan dan gaya penggerak. Dalam penelitian ini, perangkat lunak berbasis MKB, SLIDE digunakan untuk menghitung FK global dari dinding MSE berdasarkan metode Bishop yang disederhanakan, atau selanjutnya disebut sebagai metode Bishop [10] dan untuk memperkirakan bidang geser. Metode Bishop bukanlah metode yang paling akurat untuk menghitung FK berbasis MKB karena tidak sepenuhnya memenuhi kesetimbangan statis, khususnya kesetimbangan gaya

vertikal. Namun, metode Bishop dapat masih memberikan nilai FK yang relatif akurat [11].

Model kekuatan tanah yang digunakan dalam analisis menggunakan program SLIDE adalah model Mohr-Coulomb dimana kekuatan geser tanah merupakan fungsi dari kohesi efektif (c'), sudut geser efektif internal (ϕ'), dan tegangan efektif (σ'). Muka air tanah dimodelkan pada ketinggian -6 m. Selanjutnya, SLIDE memiliki dua jenis metode dukungan: dukungan aktif dan dukungan pasif. Studi ini menggunakan dukungan pasif untuk *geogrid* dimana komponen normal (T_N) dan komponen geser (T_S) memberikan kekuatan tambahan terhadap gaya penahan. Arah kekuatan tarik *geogrid* diasumsikan sejajar dengan *geogrid*. Penampang tipikal lereng dan model dinding MSE di SLIDE ditunjukkan pada **Gambar 5**.

Tabel 1. Parameter Dasar dan Kekuatan Tanah untuk Analisis Numerik Menggunakan SLIDE dan Program Elemen Hingga 2D

Jenis Tanah	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	S_u (kN/m ²)	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)
Kerikil Lepas	18,0	16,5	-	-	33
Lantau Medium	18,0	17,0	40	-	-
Lempung Kerikilan Pasir	19,0	18,0	75	-	-
Sangat Padat (1)	22,0	21,0	-	2	42
Kerikil Sangat Padat Pasir	23,0	22,0	-	-	43
Sangat Padat (2)	23,0	23,0	-	-	43
Timbunan	19,0	18,0	110	-	-

Program elemen hingga dua dimensi (2D) juga digunakan dalam penelitian ini untuk memodelkan proses konstruksi dinding MSE dan untuk mendapatkan nilai FK dan memperkirakan bidang gelincir terlemah. Program elemen hingga menghitung nilai FK menggunakan metode reduksi $c-\phi$. Kemudian, perilaku tegangan-regangan tanah pada analisis ini dimodelkan dengan mengadopsi model material Mohr-Coulomb. Tipe drainase *Undrained B* kemudian digunakan untuk tanah kohesif seperti tanah lanau dan lempung dan *Drained* untuk tanah tak berkohesi seperti tanah pasir. Perlu diperhatikan bahwa jenis analisis menggunakan tipe *Un-*

drained B mengadopsi jenis analisis efektif yang menggunakan kuat geser tak terdrainase dan kekakuan efektif sebagai input parameter kekuatan dan kekakuan tanah.

Model material Mohr-Coulomb mensyaratkan berat isi jenuh (γ_{sat}), berat isi natural (γ_{unsat}), kuat geser tak terdrainase (s_u), kohesi efektif (c'), sudut geser dalam (ϕ'), modulus Young efektif (E'), dan rasio Poisson (ν') sebagai parameter tanah. Perhatikan bahwa tanah timbunan yang digunakan dalam penelitian ini dikategorikan sebagai tanah kohesif. Dengan demikian, model material Mohr-Coulomb dengan *Undrained B* juga diadopsi untuk mensimulasikan perilaku tegangan-regangan dari tanah timbunan. **Tabel 1** dan **Tabel 2** menunjukkan parameter dasar, kekuatan tanah, dan kekakuan tanah secara berturut-turut untuk tanah eksisting dan tanah timbunan yang digunakan dalam analisis numerik.

Tabel 2. Parameter Kekakuan Tanah untuk Analisis Numerik Menggunakan Program Elemen Hingga 2D

Jenis Tanah	E' (kN/m ²)	ν'
Kerikil Lepas	10000	0,35
Lantau Medium	20000	0,35
Lempung Kerikilan	37500	0,35
Pasir Sangat Padat (1)	159000	0,35
Kerikil Sangat Padat	174000	0,35
Pasir Sangat Padat (2)	174000	0,35
Timbunan	50000	0,35

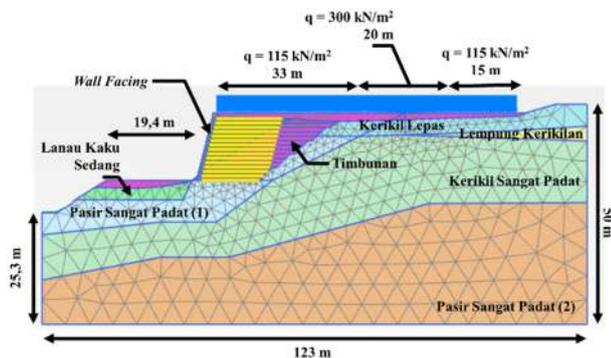
Geogrid disimulasikan sebagai material elastoplastik dalam analisis numerik berbasis metode elemen hingga 2D karena *geogrid* dalam penelitian ini diasumsikan sebagai *geogrid* biaksial. Dalam kondisi pemodelan ini, kekakuan aksial, dilambangkan sebagai EA, di mana E adalah modulus elastisitas *geogrid*, A adalah luas penampang *geogrid*, dan gaya tarik aksial maksimum (N_p) adalah parameter masukan yang diperlukan untuk *geogrid*. Nilai N_p pada penelitian ini diasumsikan sama dengan kuat tarik *geogrid* yang diizinkan (T_{all}). Kemudian, tiga kekuatan tarik *geogrid* yang berbeda diadopsi dalam penelitian ini yaitu 108 kN/m, 138,6 kN/m, dan 200 kN/m. Seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan 1, T_{all} diperoleh dengan membagi kekuatan tarik ultimit *geogrid* (T_{ult}) dengan faktor kerusakan instalasi (RF_{ID}), faktor reduksi rayapan/*creep* (RF_{CR}), faktor reduksi daya tahan (RF_{CBD}), dan faktor keamanan (FK) sebesar 1,5. Menurut katalog produk dari produsen *geogrid*, nilai yang digunakan untuk RF_{ID} , RF_{CR} , dan RF_{CBD} masing-masing adalah 1,05, 1,58, dan 1,1. **Tabel 3** mencantumkan parameter input untuk *geogrid* pada program elemen hingga 2D dan SLIDE dengan c_{pu} adalah adhesi kekuatan tarik (*pullout strength adhesion*) dan

ϕ_{pu} adalah friksi kuat tarik (*pullout strength friction*). *Strip coverage* merepresentasikan jarak antar lajur *geogrid*. *Strip coverage* bernilai 100% mengindikasikan *geogrid* dipasang secara kontinu atau tidak terdapat celah antar lajur *geogrid*.

$$T_{all} = \frac{T_{ult}}{SF} \times \left(\frac{1}{RF_{ID} \times RF_{CR} \times RF_{CBD}} \right) \quad (1)$$

Tabel 3. Parameter Input *Geogrid*

T_{ult} (kN/m)	T_{all} (kN/m)	Strip Coverage (%)	c_{pu} (kN/m ²)	ϕ_{pu} (°)	EA (kN/m)
108,0	39,5	100	88	0	798,1
138,6	50,6	100	88	0	1012,7
200,0	73,1	100	88	0	1461,3



Gambar 6. Model Potongan Lereng dengan Dinding MSE pada Program Elemen Hingga 2D

Gambar 6 menunjukkan model kemiringan dan dinding MSE yang digunakan untuk analisis numerik menggunakan metode elemen hingga 2D. Kepadatan *mesh* yang digunakan dalam analisis adalah halus (*fine*). Kemudian, elemen antarmuka (*interface element*) antara tanah dan struktur tidak dimodelkan di dalam analisis. Beban tambahan (q) yang terletak di atas dinding MSE juga disimulasikan. Besarnya beban permukaan adalah 115 kN/m² untuk beban kerja dan lalu lintas dan 300 kN/m² untuk beban gudang dan beban kerja. Lokasi beban juga disajikan pada **Gambar 6**. Simulasi urutan konstruksi dinding MSE dalam analisis elemen hingga dimulai dengan menggali lereng eksisting dengan mengadopsi sistem terasering dan kemiringan 37°, serta interval ketinggian 3 m. Material *geogrid* dan timbunan ditempatkan secara bertahap dengan ketebalan antar lapisan adalah 1 m hingga mencapai ketinggian dinding yang diinginkan, yaitu 15 m. Beban tambahan ditempatkan di atas dinding MSE pada tahap akhir konstruksi.

Metode studi parametrik untuk penelitian ini dibagi menjadi tiga kelompok berdasarkan variasi parameter *geogrid*. **Tabel 4** merangkum variasi yang digunakan dalam

penelitian ini beserta tujuannya dengan s_v adalah jarak vertikal antar *geogrid* dan L_e adalah panjang *geogrid*. Tujuan membagi menjadi tiga (3) kelompok adalah untuk memahami efek perubahan parameter *geogrid* yang disebutkan pada **Tabel 4** terhadap faktor keamanan global minimum dinding MSE dan lokasi bidang gelincir terlemah. Selain itu, analisis stabilitas numerik pada dinding tanpa *geogrid* juga dilakukan untuk membandingkan faktor keamanan global dan lokasi bidang gelincir terlemah untuk dinding dengan dan tanpa *geogrid*.

Tabel 4. Variasi Parameter Input *Geogrid*

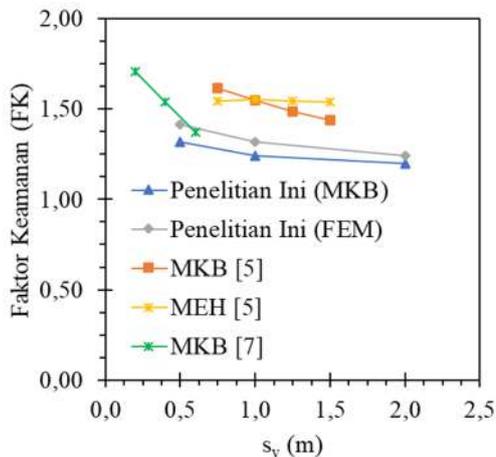
Variasi Parameter Geogrid			Tujuan
s_v (m)	L_e (m)	T_{ult} (kN/m)	
0,5, 1, dan 2	15	138,6	Menyelidiki pengaruh jarak vertikal <i>geogrid</i> pada faktor keamanan global minimum dinding MSE dan lokasi bidang gelincir terlemah.
1	15, 17,5 dan 20	138,6	Menyelidiki pengaruh panjang <i>geogrid</i> terhadap faktor keamanan global minimum dinding MSE dan lokasi bidang gelincir terlemah.
1	15	108, 138,6, dan 200	Menyelidiki pengaruh kekuatan tarik <i>geogrid</i> terhadap faktor keamanan global minimum dinding MSE dan lokasi bidang gelincir terlemah.

3. Hasil dan Pembahasan

Kestabilan Internal dan Eksternal Dinding MSE

Sebelum analisis stabilitas global menggunakan program numerik dilakukan, perhitungan dan evaluasi terhadap kestabilan internal dan eksternal dinding MSE dengan menggunakan metode konvensional dilakukan. Stabilitas eksternal dinding MSE meliputi faktor keamanan (FK) terhadap geser (*sliding*), guling (*overturning*), dan daya dukung diperiksa mengikuti standar desain nasional, SNI 8460-2017 [4]. Nilai FK masing-masing adalah 1,80, 4,66, dan 58,24 untuk stabilitas terhadap geser, guling, dan daya dukung secara

berturut-turut. Kemudian, berdasarkan hasil analisis stabilitas internal dinding dengan FK minimal 1,5, nilai yang dibutuhkan adalah 0,5 m-1 m untuk jarak vertikal *geogrid*, 15 m untuk panjang *geogrid*, dan 138,6 kN/m untuk kekuatan tarik maksimum *geogrid*.



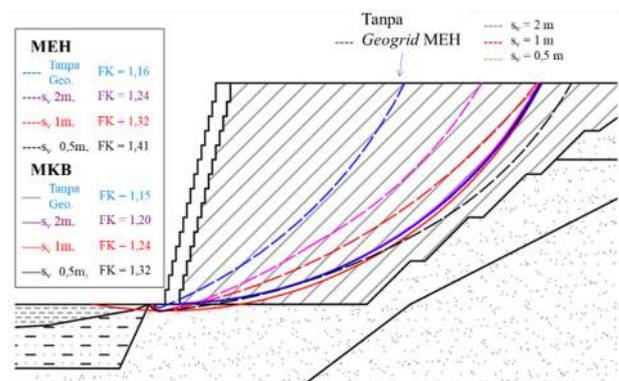
Gambar 7. Perbandingan Tren Pengaruh s_v terhadap Nilai FK Hasil Penelitian Ini dengan Hasil Terpublikasi

Pengaruh Spasi Vertikal Geogrid

Gambar 7 menampilkan perbandingan antara hasil penelitian ini dengan hasil penelitian terdahulu. Hasil analisis pada **Gambar 7** menunjukkan bahwa nilai FK terhadap kestabilan global dinding MSE, atau disebut FK global meningkat seiring dengan penurunan jarak vertikal antar *geogrid*. Nilai FK untuk jarak vertikal *geogrid* 0,5 m, 1 m, dan 2 m berturut-turut adalah 1,32, 1,24, 1,20 untuk analisis menggunakan MKB dan 1,41, 1,32, dan 1,24 untuk analisis menggunakan MEH. Nilai FK untuk dinding MSE juga lebih tinggi dibandingkan dinding tanpa perkuatan *geogrid*. Nilai FK untuk dinding tanpa *geogrid* adalah 1,16 berdasarkan hasil analisis menggunakan MEH; sedangkan untuk analisis menggunakan MKB sama dengan 1,15. Kemudian, tren perubahan nilai FK terhadap s_v relatif serupa dengan temuan Ozcelik, dkk. [5] dan Chairullah, dkk. [7] di mana terjadi peningkatan faktor keamanan seiring dengan penurunan jarak vertikal *geogrid* meskipun nilai FK yang diperoleh relatif berbeda. Nilai FK pada penelitian ini yang berbeda dengan penelitian terdahulu dapat disebabkan oleh berbagai hal, seperti perbedaan parameter tanah, konfigurasi panjang *geogrid*, dan dimensi dinding MSE yang digunakan.

Pem pemasangan *geogrid* ke sistem dinding penahan tanah akan meningkatkan gaya penahan yang muncul akibat gesekan antara tanah dan *geogrid*. Semakin kecil jarak vertikal antar *geogrid*, maka semakin banyak lapisan *geogrid* yang dapat di pasang dan semakin banyak pula gaya penahan

yang dihasilkan. Hal ini mengakibatkan peningkatan nilai FK global. Selanjutnya, perubahan jarak vertikal antar *geogrid* juga memengaruhi pembentukan bidang gelincir terlemah pada dinding MSE. **Gambar 8** menunjukkan nilai FK global dan bidang gelincir terlemah yang diperoleh dari analisis numerik berbasis MEH dan MKB. Spasi vertikal yang lebih besar menyebabkan bidang gelincir terlemah bergerak lebih dekat ke permukaan dinding dengan nilai FK global yang semakin mengecil. Kecenderungan ini terlihat pada bidang gelincir terlemah yang diperoleh dari analisis menggunakan MEH. Namun, tren perubahan lokasi bidang gelincir terlemah terhadap s_v tidak cukup jelas pada hasil analisis dengan menggunakan MKB. Walaupun demikian, nilai FK global berdasarkan hasil analisis menggunakan MKB tetap menurun seiring dengan meningkatnya nilai s_v . Perubahan lokasi bidang gelincir terlemah dapat disebabkan oleh gaya penahan yang diberikan oleh *geogrid* berkurang saat bidang gelincir terlemah menjauhi permukaan dinding MSE.



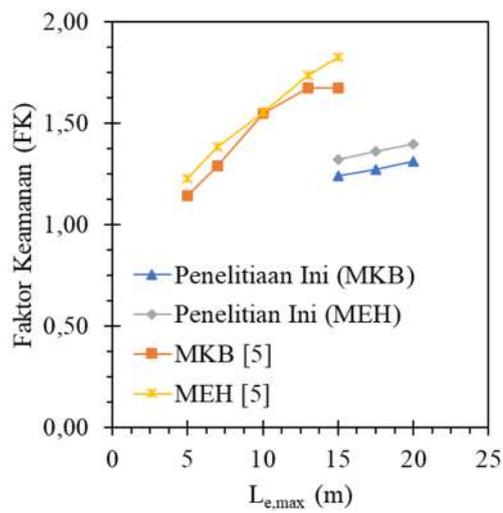
Gambar 8. Bidang Gelincir Terlemah untuk Setiap Variasi s_v untuk Dinding dengan dan tanpa *Geogrid*

Pengaruh Panjang Geogrid

Studi ini menemukan bahwa semakin panjang L_e maksimum ($L_{e,max}$), maka semakin tinggi nilai FK global. **Gambar 9** membandingkan nilai FK global dari penelitian ini terhadap hasil penelitian Ozcelik, dkk. [5]. Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 9**, nilai FK untuk $L_{e,max} = 15$ m, 17,5 m, dan 20 m masing-masing adalah 1,24, 1,27, dan 1,31 untuk analisis menggunakan MKB dan 1,32, 1,36, dan 1,40 untuk analisis menggunakan MEH. Serupa dengan temuan sebelumnya terkait pengaruh s_v terhadap nilai FK global, nilai FK global untuk dinding tanpa *geogrid* lebih rendah dari nilai FK global untuk dinding dengan perkuatan *geogrid*. Selain itu, nilai FK global yang diperoleh dari analisis berbasis MKB relatif lebih konservatif dibandingkan dengan yang diperoleh dari analisis menggunakan MEH.

Hubungan antara nilai FK dan $L_{e,max}$ dapat dikaitkan dengan gaya aksial maksimum yang dapat didukung oleh

geogrid. Semakin besar nilai $L_{e,max}$, maka semakin besar gaya aksial yang dapat didukung. Sehingga, jika *geogrid* dapat mendukung lebih banyak gaya aksial, nilai FK global akan meningkat. Ozcelik, dkk. [5] juga menemukan bahwa penambahan panjang *geogrid* akan meningkatkan nilai FK, namun kemiringan trennya cukup berbeda dengan hasil penelitian ini. Hal ini dapat terjadi karena pada penelitian ini panjang *geogrid* tidak diperpanjang pada semua lapisan karena keterbatasan ruang.



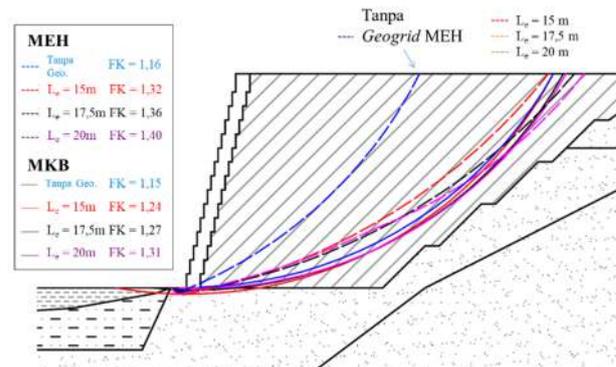
Gambar 9. Perbandingan Tren Pengaruh L_e terhadap Nilai FK Hasil Penelitian Ini dengan Hasil Terpublikasi

Gambar 10 menyajikan lokasi bidang gelincir terlemah yang diperoleh dari analisis dengan menggunakan MEH dan MKB untuk dinding dengan dan tanpa perkuatan *geogrid*. Bidang gelincir terlemah yang diperoleh dari analisis numerik berbasis MEH dan MKB relatif serupa untuk setiap nilai $L_{e,max}$. Selain itu, hasil dari kedua metode analisis juga sepakat bahwa menambah panjang *geogrid* akan memindahkan lokasi bidang gelincir terlemah menjauh dari permukaan dinding yang diiringi dengan peningkatan nilai FK global. Hal ini dapat disebabkan oleh seiring dengan bertambahnya panjang *geogrid*, gaya penahan juga akan meningkat. Namun, sebagai konsekuensi, gaya pendorong yang dapat didistribusikan ke *geogrid* dan kekuatan geser antarmuka yang dimobilisasi ke panjang *geogrid* yang tersisa juga semakin terbatas. Dengan demikian, penambahan panjang *geogrid* tidak lagi bermanfaat bagi stabilitas global dinding MSE.

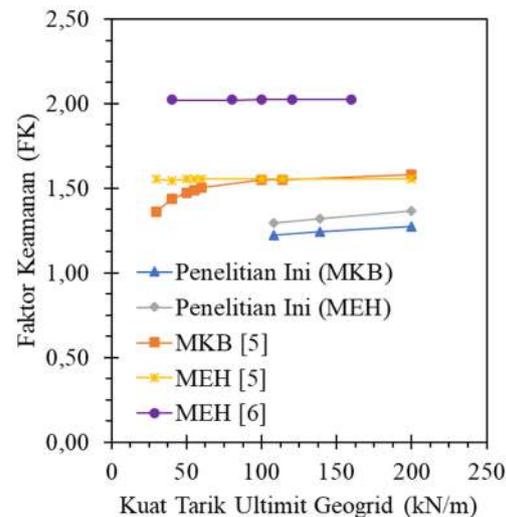
Pengaruh Kuat Tarik Maksimum Geogrid

Gambar 11 menampilkan perbandingan nilai FK global yang diperoleh pada penelitian ini dengan hasil penelitian terdahulu. Berdasarkan hasil analisis stabilitas global dinding MSE dengan T_{ult} *geogrid* sebesar 108 kN/m, 138,6 kN/m, dan 200 kN/m, diperoleh nilai FK global sebesar 1,22, 1,24, dan 1,28 untuk analisis menggunakan MKB, dan 1,29, 1,32 dan 1,37 untuk analisis dengan menggunakan MEH. Berdasarkan hasil analisis numerik, variasi T_{ult} tidak memberikan

pengaruh signifikan terhadap nilai FK global. Temuan ini juga dipaparkan oleh Ozcelik, dkk. [5] dan Gör, dkk. [12] dimana peningkatan nilai FK global akibat peningkatan kekuatan tarik *geogrid* sangat terbatas.



Gambar 10. Bidang Gelincir Terlemah untuk Setiap Variasi L_e untuk Dinding dengan dan tanpa *Geogrid*



Gambar 11. Perbandingan Tren Pengaruh T_{ult} terhadap Nilai FK Hasil Penelitian Ini dengan Hasil Terpublikasi

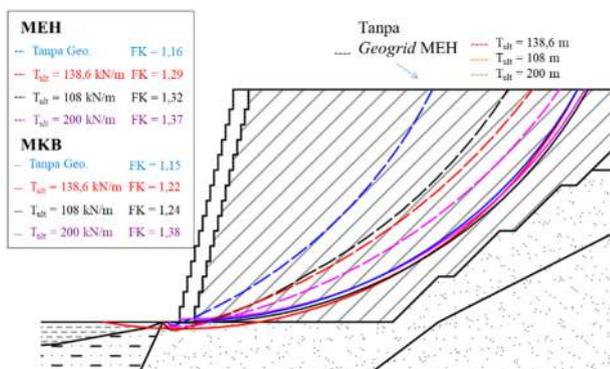
Pengaruh Kuat Tarik Maksimum Geogrid

Gambar 11 menampilkan perbandingan nilai FK global yang diperoleh pada penelitian ini dengan hasil penelitian terdahulu. Berdasarkan hasil analisis stabilitas global dinding MSE dengan T_{ult} *geogrid* sebesar 108 kN/m, 138,6 kN/m, dan 200 kN/m, diperoleh nilai FK global sebesar 1,22, 1,24, dan 1,28 untuk analisis menggunakan MKB, dan 1,29, 1,32 dan 1,37 untuk analisis dengan menggunakan MEH. Berdasarkan hasil analisis numerik, variasi T_{ult} tidak memberikan

pengaruh signifikan terhadap nilai FK global. Temuan ini juga dipaparkan oleh Ozcelik, dkk. [5] dan Gör, dkk. [12] dimana peningkatan nilai FK global akibat peningkatan kekuatan tarik *geogrid* sangat terbatas.

Namun, peningkatan nilai T_{ult} masih dianggap dapat meningkatkan nilai FK global karena gaya dalam vektor tangensial yang bekerja pada bidang gelincir masih memberikan kontribusi pada peningkatan nilai FK. Variasi T_{ult} dengan rentang yang lebih lebar diperlukan guna mengetahui pengaruh T_{ult} pada FK global secara lebih komprehensif. Sebagai catatan tambahan, perbedaan besar nilai FK global pada penelitian ini dengan hasil dari penelitian terdahulu dapat diakibatkan oleh berbagai hal, seperti parameter tanah, model dinding, dan pemodelan *geogrid*. Namun, tren perubahan nilai FK terhadap T_{ult} pada penelitian ini masih relatif konsisten terhadap hasil penelitian terdahulu.

Kemudian, hasil analisis dengan menggunakan MEH menunjukkan bahwa akibat tidak adanya peningkatan tegangan geser/gaya pendorong, peningkatan T_{ult} juga tidak memberikan pengaruh signifikan pada deformasi horizontal *geogrid* dan gaya aksial yang bekerja di *geogrid*. Gaya aksial yang bekerja pada *geogrid* juga jauh lebih kecil dibandingkan dengan nilai T_{ult} . Perlu diperhatikan bahwa input nilai T_{ult} pada program numerik merupakan nilai maksimum yang dapat dicapai pada saat proses pembebanan. Dengan demikian, hasil ini mengindikasikan bahwa nilai T_{ult} tidak sepenuhnya termobilisasi. Namun, peningkatan T_{ult} tetap mengakibatkan besar gaya aksial maksimum yang bekerja pada *geogrid* relatif meningkat, yaitu dari 4,8 kN/m untuk *geogrid* dengan $T_{ult} = 108$ kN/m dan 8,7 kN/m untuk *geogrid* dengan $T_{ult} = 200$ kN/m. Hal ini disebabkan oleh peningkatan kekakuan aksial *geogrid* (EA) di mana semakin kaku suatu struktur, maka semakin besar beban yang diterima.



Gambar 12. Bidang Gelincir Terlemah untuk Setiap Variasi T_{ult} untuk Dinding dengan dan tanpa *Geogrid*

Gambar 12 menyajikan posisi bidang gelincir terlemah yang diperoleh dari analisis elemen hingga dan kesetimbangan batas. Bidang gelincir terlemah yang terbentuk karena variasi kekuatan *geogrid* mengikuti pola serupa dengan yang ditemukan pada dua variasi sebelumnya. Semakin besar kekuatan tarik *geogrid*, bidang gelincir terlemah bergerak menjauhi dinding. Hal ini terlihat dari hasil analisis yang diperoleh dari analisis dengan menggunakan metode numerik berbasis MEH. Untuk analisis menggunakan metode kesetimbangan batas, bidang gelincir terlemah terbentuk pada posisi yang relatif dekat terlepas dari perbedaan kekuatan tarik *geogrid*.

4. Simpulan

Dari hasil beberapa analisis dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Analisis numerik berbasis metode elemen hingga dan kesetimbangan batas mampu memprediksi nilai faktor keamanan global dan lokasi bidang gelincir terlemah dengan hasil yang relatif serupa.
- Penggunaan dinding MSE dengan perkuatan *geogrid* dapat meningkatkan nilai faktor keamanan global dan juga mengubah lokasi bidang gelincir terlemah menjauhi permukaan dinding.
- Memperpendek jarak vertikal antar *geogrid*, memperpanjang panjang *geogrid*, dan meningkatkan kekuatan tarik *geogrid* mampu meningkatkan faktor keamanan global dinding MSE. Namun, memperpendek jarak vertikal antar *geogrid* mampu memberikan peningkatan nilai faktor keamanan global dan perubahan lokasi bidang gelincir terlemah paling signifikan.

Akhirnya, hasil penelitian ini dapat diterapkan untuk menilai kestabilan jangka pendek kasus dinding MSE dengan *geogrid* biaksial yang dipasang pada material timbunan berupa tanah kohesif. Namun, perhatikan bahwa penelitian ini tidak mempertimbangkan keamanan dan deformasi pada kondisi dinding MSE dengan beban gempa, muka air tanah yang tinggi, dan rembesan, serta tidak mempertimbangkan kinerja *geogrid* dalam desain jangka panjang. Dengan demikian, studi lebih lanjut masih diperlukan untuk mengevaluasi keamanan global dan deformasi dinding MSE di bawah kondisi pembebanan yang berbeda

Daftar Pustaka

- [1] R. M. Koerner, *Designing With Geosynthetics*, 5th ed. New Jersey: Pearson - Prentice Hall, 2005.
- [2] R. Berg, B. Christopher, and N. Samtani, "Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes—Volume I," *Federal High*

- Way Administration (FHWA)*, vol. I, no. November, 2009, doi: FHWA-NHI-10-024 & FHWA-NHI-10-025.
- [3] R. M. Koerner and G. R. Koerner, "A data base, statistics and recommendations regarding 171 failed geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth (MSE) walls," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 40, pp. 20–27, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.geotexmem.2013.06.001.
- [4] BSN, "Persyaratan Perancangan Geoteknik SNI 8460:2017," *Badan Standarisasi Nasional*, p. 2017, 2017.
- [5] G. Ozcelik, O. Pasaoglu, and N. Huvaj, "Analyses of reinforced soil slopes with limit equilibrium and finite element methods," in *10th International Conference on Geosynthetics, ICG 2014*, 2014.
- [6] M. C. M. Nasvi and S. Krishnya, "Stability Analysis of Colombo–Katunayake Expressway (CKE) Using Finite Element and Limit Equilibrium Methods," *Indian Geotechnical Journal*, vol. 49, no. 6, pp. 620–634, Dec. 2019, doi: 10.1007/s40098-019-00357-7.
- [7] B. Chairullah, H. Yunita, M. Munirwansyah, and R. Ambiya, "Effect of vertical distance of geogrid layers on slope stability," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 933, p. 012046, Sep. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/933/1/012046.
- [8] H. H. Elewa and A. A. Qaddah, "Groundwater potentiality mapping in the Sinai Peninsula, Egypt, using remote sensing and GIS-watershed-based modeling," *Hydrogeol J*, vol. 19, no. 3, pp. 613–628, May 2011, doi: 10.1007/s10040-011-0703-8.
- [9] John. Schertmann, *Guidelines for cone penetration test: performance and design*. 1977.
- [10] A. W. Bishop, "The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes," *Géotechnique*, vol. 5, no. 1, pp. 7–17, Mar. 1955, doi: 10.1680/geot.1955.5.1.7.
- [11] J. M. Duncan, S. G. Wright, and T. L. Brandon, "Soil Strength and Slope Stability, 2nd Edition," *John Wiley & Sons*, 2014.
- [12] M. Gör, N. R. Taher, H. S. Aksoy, and H. A. Awlla, "Effect of Geogrid Inclusion on the Slope Stability," in *the V-International European Conference on Interdisciplinary Scientific Research*, Valencia, Jan. 2022, pp. 275–286.

Halaman ini sengaja dikosongkan