

STUDI PENGARUH PERKUATAN TANAH MENGGUNAKAN GEOGRID TERHADAP STABILITAS LERENG

Pradipa Agung Laksono^{1*} dan Aniek Prihatiningsih¹

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
pradipa.325200073@stu.untar.ac.id

Masuk: 12-02-2025, revisi: 13-02-2025, diterima untuk diterbitkan: 13-02-2025

ABSTRACT

Slope stability analysis is a critical aspect of geotechnical engineering to prevent catastrophic failures, especially in areas with weak soil or high loading conditions. This study investigates the effectiveness of geogrid reinforcement in enhancing slope stability. Geogrids, known for their tensile strength and soil interaction, provide lateral restraint and distribute loads effectively. Using numerical modeling, this research evaluates the factor of safety (FoS) and deformation characteristics of slopes reinforced with varying configurations of geogrids. The analysis incorporates parameters such as the number of geogrid layers, their placement depth, and tensile stiffness. Results indicate that geogrid reinforcement significantly improves the stability of slopes, with the FoS increasing by up to 35% in optimal configurations. Additionally, the study highlights the reduction in horizontal and vertical displacements, ensuring long-term performance. This research provides practical insights for designing reinforced slopes in challenging terrains, particularly for infrastructure development. The findings underscore the necessity of integrating geosynthetics into slope design to enhance safety, reduce risks, and optimize construction costs. Future studies could explore the interaction between geogrids and various soil types under dynamic loading.

Keywords: Slope stability, Geogrid reinforcement, Factor of safety, Numerical modeling, Soil reinforcement

ABSTRAK

Analisis stabilitas lereng merupakan aspek penting dalam rekayasa geoteknik untuk mencegah kegagalan yang berpotensi merusak, terutama di area dengan kondisi tanah lemah atau beban tinggi. Penelitian ini mengkaji efektivitas penggunaan geogrid dalam meningkatkan stabilitas lereng. Geogrid, yang dikenal karena kekuatan tariknya dan interaksinya dengan tanah, memberikan penahan lateral dan mendistribusikan beban secara efektif. Dengan menggunakan pemodelan numerik, penelitian ini mengevaluasi faktor keamanan (FoS) dan karakteristik deformasi lereng yang diperkuat dengan konfigurasi geogrid yang bervariasi. Analisis mencakup parameter seperti jumlah lapisan geogrid, kedalaman penempatan, dan kekakuan tariknya. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan geogrid secara signifikan meningkatkan stabilitas lereng, dengan FoS meningkat hingga 35% dalam konfigurasi optimal. Selain itu, penelitian ini menyoroti pengurangan perpindahan horizontal dan vertikal, sehingga memastikan kinerja jangka panjang. Penelitian ini memberikan wawasan praktis untuk perancangan lereng yang diperkuat pada medan yang menantang, khususnya untuk pembangunan infrastruktur. Temuan ini menegaskan pentingnya integrasi geosintetik dalam desain lereng untuk meningkatkan keamanan, mengurangi risiko, dan mengoptimalkan biaya konstruksi. Penelitian selanjutnya dapat mengeksplorasi interaksi antara geogrid dan berbagai jenis tanah di bawah beban dinamis.

Kata kunci: Stabilitas lereng, Perkuatan geogrid, Faktor keamanan, Pemodelan numerik, Perkuatan tanah

1. PENDAHULUAN

Stabilitas lereng adalah salah satu aspek penting dalam rekayasa geoteknik, karena berperan dalam memastikan keamanan struktur dan mencegah risiko keruntuhan, baik selama proses konstruksi maupun setelahnya. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan geogrid dengan modulus elastisitas yang lebih tinggi dapat meningkatkan kekuatan geser material lereng sekaligus mengurangi perpindahan lateral pada kolom penyangga. Hal ini terjadi karena geogrid yang lebih kaku mampu memberikan dukungan yang lebih efektif terhadap material di sekitarnya. Selain itu, faktor keamanan lereng juga terbukti meningkat seiring dengan bertambahnya rasio kekakuan antara geogrid dan material tanah, sehingga lereng menjadi lebih stabil dan tahan terhadap tekanan eksternal (Jasim, 2023).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai CBR dan modulus elastisitas (E) meningkat dengan adanya perkuatan geogrid dan mencapai nilai optimal ketika geogrid ditempatkan pada kedalaman tertentu, yaitu sekitar tiga perempat dari ketinggian benda uji. Ketinggian benda uji di laboratorium merepresentasikan ketebalan lapisan tanah dasar yang

dipadatkan di lapangan. Uji triaksial siklik juga mengungkapkan bahwa regangan elastis pada tanah tanpa perkuatan berkurang secara signifikan dengan adanya geogrid. Selain itu, geogrid terbukti berperan penting dalam mengurangi pembentukan alur pada sistem perkerasan karena mampu mengurangi regangan permanen pada tanah yang diperkuat dibandingkan dengan tanah tanpa perkuatan. (Kamel, Chandra, & Kumar, 2004)

Namun, aplikasi geogrid dalam stabilisasi lereng memerlukan analisis yang cermat, termasuk desain geoteknik, karakteristik tanah, dan kondisi lingkungan. Beberapa tantangan utama meliputi identifikasi distribusi tegangan dalam tanah yang diperkuat dan pengaruh variasi beban terhadap performa geogrid. Untuk menjawab tantangan ini, studi ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas lereng dengan menggunakan simulasi numerik dan evaluasi faktor keamanan.

Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui peningkatan kuat geser tanah dari lereng sebelum diberikan geogrid dan setelah diberikan geogrid.

Pengertian Tanah

Tanah adalah lapisan paling atas dari kerak bumi yang mendukung kehidupan. Tanah terbentuk dari campuran bahan organik dan mineral yang dipengaruhi oleh organisme, iklim, proses geologi, dan reaksi kimia di permukaan bumi. Tanah berfungsi sebagai tempat tumbuh bagi tanaman darat dan berperan sebagai penyaring alami yang memengaruhi kualitas serta jumlah air di bumi. Selain itu, tanah menjadi habitat bagi berbagai mikroorganisme yang membantu menguraikan bahan organik dan mendaur ulang unsur-unsur kimia penting untuk keberlangsungan biosfer (Richter & Markewitz, 1995).

Klasifikasi tanah berdasarkan ukuran partikel dilakukan untuk membedakan jenis tanah berdasarkan besar kecilnya butiran penyusunnya. Tanah dengan partikel terkecil disebut lempung (clay), dengan ukuran kurang dari 0,002 mm. Lempung memiliki sifat plastis ketika basah, tidak permeabel, dan mampu menahan air dalam jumlah besar. Jenis tanah berikutnya adalah lanau (silt), yang memiliki ukuran partikel antara 0,002 hingga 0,05 mm menurut standar USDA atau 0,002 hingga 0,075 mm menurut standar USCS. Lanau memiliki partikel yang lebih besar dibandingkan lempung, tetapi masih sulit dilihat dengan mata telanjang. Sifatnya cenderung tidak plastis, dengan kemampuan menahan air sedang dan permeabilitas yang lebih tinggi dibandingkan lempung. Selanjutnya adalah pasir (sand), yang memiliki ukuran partikel 0,05 hingga 2 mm menurut USDA, atau 0,075 hingga 4,75 mm menurut USCS. Pasir memiliki partikel yang besar, tidak kohesif, dan sangat permeabel, sehingga memungkinkan air dan udara mudah mengalir melaluinya. Di atas pasir, terdapat tanah jenis kerikil (gravel) dengan ukuran partikel lebih besar dari 2 mm (USDA) atau 4,75 hingga 76,2 mm (USCS). Kerikil memiliki sifat kasar, tidak kohesif, dan sangat permeabel, sehingga biasanya digunakan untuk keperluan konstruksi. (Brady & Weil, 2017)

Klasifikasi tanah berfungsi untuk memahami karakteristik dan sifat tanah sehingga dapat digunakan secara optimal dalam berbagai bidang. Dalam bidang geoteknik, klasifikasi tanah membantu menentukan kestabilan tanah untuk konstruksi, seperti fondasi bangunan, jalan, atau bendungan. Dalam bidang pertanian, klasifikasi tanah digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian tanah dengan jenis tanaman tertentu serta untuk pengelolaan air dan nutrisi. Selain itu, dalam hidrologi, klasifikasi tanah berguna untuk mengidentifikasi kemampuan tanah menyerap dan mengalirkan air, yang penting dalam pengelolaan sumber daya air dan mitigasi banjir. Klasifikasi ini juga membantu dalam pelestarian lingkungan dengan mengidentifikasi tanah yang rentan terhadap erosi atau degradasi (Brady & Weil, 2017).

Pengertian Stabilitas Lereng

Stabilitas lereng adalah kemampuan suatu lereng untuk tetap dalam keadaan seimbang dan tidak mengalami keruntuhan atau longsor akibat pengaruh gaya-gaya yang bekerja padanya. Faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas lereng meliputi kemiringan lereng, jenis material penyusun lereng, kadar air, beban tambahan seperti aktivitas manusia, serta vegetasi yang ada di lereng tersebut. Dalam analisis geoteknik, stabilitas lereng sering dihitung dengan menggunakan faktor keamanan yang menunjukkan perbandingan antara gaya penahan dan gaya penggerak. Jika faktor keamanan lebih besar dari satu, lereng dianggap stabil, sedangkan jika kurang dari satu, lereng berisiko mengalami keruntuhan. Pengelolaan stabilitas lereng penting untuk mencegah bencana geoteknik pada proyek konstruksi dan infrastruktur lainnya (Das, 2010)

Stabilitas lereng sangat penting dalam berbagai bidang seperti pertambangan, teknik sipil, dan perencanaan kota karena berhubungan langsung dengan keselamatan dan keberlanjutan pembangunan. Stabilitas lereng menentukan apakah suatu lereng dapat menahan gaya yang mendorong pergerakan tanah atau batuan, yang jika tidak stabil dapat menyebabkan longsor dan kerusakan infrastruktur

Analisis dan evaluasi stabilitas lereng merupakan aspek penting dalam rekayasa geoteknik. Hal utama dalam pemodelan dan perancangan lereng adalah memastikan keamanan dan keandalan selama masa pakainya. Dalam menganalisis stabilitas tanah atau batuan, semua potensi jenis keruntuhan harus diperhatikan. Pemodelan kestabilan lereng memerlukan pertimbangan terhadap lapisan tanah, keberadaan dan kemiringan diskontinuitas, aliran rembesan, distribusi tekanan air pori, kestabilan jangka pendek maupun panjang, serta jenis keruntuhan (seperti permukaan lingkaran, non-lingkaran, tumbangan, atau aliran) dengan penerapan metode numerik (Harabinová & Panulinová, 2020).

Analisis stabilitas lereng dilakukan pada berbagai proyek geoteknik untuk mengevaluasi stabilitas global suatu lereng. Analisis ini berfokus pada potensi keruntuhan geser dalam massa tanah, tetapi tidak memberikan gambaran tentang deformasi lereng. Biasanya, analisis ini dilakukan pada lereng potong atau timbunan dengan ketinggian ≥ 10 kaki, atau yang berada di atas tanah lunak. Hal serupa juga diterapkan pada dinding penahan, baik sistem permanen maupun sementara, dengan ketinggian ≥ 5 kaki atau yang dibangun di atas tanah lunak. Selain itu, analisis stabilitas lereng dilakukan pada fondasi dangkal dan dalam untuk struktur yang berada di atas atau dekat lereng. Analisis ini juga berguna untuk mengevaluasi lereng yang pernah mengalami kerusakan, dengan meninjau potensi mekanisme keruntuhan melalui analisis balik. Hasilnya dapat digunakan untuk merancang langkah-langkah mitigasi guna memperbaiki kegagalan tersebut. (Small, 2016)

Pengertian Lereng

Lereng adalah permukaan tanah yang memiliki kemiringan tertentu, yang terbentuk akibat proses geologis alami seperti erosi, pengendapan, dan aktivitas tektonik, atau melalui aktivitas manusia seperti penambangan dan pembangunan infrastruktur. Lereng dapat ditemukan di berbagai lingkungan, mulai dari kawasan pegunungan hingga tepi sungai, dengan kemiringan yang bervariasi. Tingkat kemiringan ini memengaruhi stabilitas lereng, yang menjadi perhatian utama dalam bidang geoteknik. Ketidakstabilan lereng dapat menyebabkan tanah longsor, yang berpotensi menimbulkan kerusakan infrastruktur dan mengancam keselamatan manusia (Brady & Weil, 2017).

Lereng merupakan elemen penting dalam sistem geologi, ekologi, dan infrastruktur, yang sering menjadi fokus kajian di berbagai bidang ilmu. Dalam bidang geoteknik, stabilitas lereng menjadi isu utama karena longsor dapat mengancam keselamatan manusia dan infrastruktur. Menurut (Das, 2010), stabilitas lereng bergantung pada sifat fisik tanah, kemiringan lereng, dan pengaruh air tanah. Secara hidrologis, lereng memengaruhi pola aliran permukaan dan erosi tanah. Lereng dan intensitas hujan menentukan laju erosi serta pembentukan pola drainase (Horton, 1945). Dalam konteks pertanian, Pentingnya teknik konservasi seperti terasering untuk meminimalkan erosi dan mempertahankan produktivitas lahan miring. Kajian ini menunjukkan bahwa pemahaman multidisiplin terhadap lereng sangat penting untuk menjaga keberlanjutan ekosistem dan mencegah bencana (Montgomery, 2007).

Pengertian Geogrid

Geogrid merupakan material geosintetik berbahan polimer yang memiliki beragam aplikasi dalam bidang transportasi, infrastruktur, dan rekayasa struktur. Material ini secara luas digunakan dalam stabilisasi tanah, seperti penguatan dinding, perkuatan tanah di bawah permukaan, atau tanggul, dengan potensi yang terus berkembang dalam aplikasi penginderaan jarak jauh. Kemajuan dalam teknologi manufaktur telah memungkinkan pembuatan geogrid dalam berbagai konfigurasi, seperti uniaxial, biaxial, dan triaxial. Desain yang fleksibel ini memungkinkan geogrid disesuaikan dengan kapasitas beban yang diperlukan. Misalnya, geogrid biaxial cocok untuk beban yang bekerja pada dua arah utama, sementara geogrid uniaxial lebih optimal untuk beban tinggi pada satu arah dan sering digunakan pada dinding tanah yang distabilkan secara mekanis. Baru-baru ini, geogrid triaxial yang menawarkan kapasitas beban lebih merata ke berbagai arah telah diperkenalkan untuk memperkuat lapisan dasar. Beragam struktur, polimer, dan geometri geogrid memberikan banyak pilihan bagi perancang, meskipun hal ini juga menimbulkan tantangan dalam hal pemilihan, karakterisasi, dan daya tahan jangka panjang (Al-Barqawi, Aqel, & Wayne, 2021).

Kelemahan tanah dalam menahan kuat tarik dapat diatasi dengan meningkatkan stabilitas lereng menggunakan material seperti tulangan logam, geotekstil, atau geogrid yang ditempatkan di dalam lereng. Elemen berkekuatan tinggi ini membentuk struktur yang dikenal sebagai lereng diperkuat. Meskipun awalnya menggunakan strip atau tulangan logam, material tersebut kini telah banyak digantikan oleh geosintetik. Pada lereng yang diperkuat, stabilitas ditingkatkan melalui pemanfaatan kekuatan geogrid dalam analisis kesetimbangan batas atau metode elemen hingga yang dikenal sebagai pendekatan gaya. Geogrid, yang terbuat dari polimer berkekuatan tinggi, memiliki struktur grid dengan ruang yang cukup untuk menciptakan interaksi yang kuat dengan tanah. Berdasarkan komposisi kimianya, geogrid tersedia dalam bentuk polietilen, poliester, atau polipropilen. Dengan kekuatan tariknya yang tinggi, geogrid memiliki peran signifikan dalam perkuatan tanah dan secara luas digunakan untuk meningkatkan stabilitas lereng (Keskin, 2022).

Pengertian perangkat lunak analisis geoteknik 2D berbasis elemen hingga

Perangkat lunak analisis geoteknik 2D berbasis elemen hingga adalah alat yang digunakan untuk memodelkan dan menganalisis masalah geoteknik dengan menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method, FEM) dalam dua dimensi. Metode ini memungkinkan simulasi dan analisis yang akurat terhadap berbagai fenomena geoteknik seperti aliran fluida, transfer panas, interaksi tanah-struktur, stabilitas lereng, dan deformasi tanah.

Salah satu contoh dari perangkat lunak analisis geoteknik 2D berbasis elemen hingga adalah MIDAS GTS NX yang digunakan dalam penelitian ini. GTS NX adalah perangkat lunak canggih yang memungkinkan pengguna melakukan analisis berbagai jenis masalah geoteknik dalam satu platform terpadu. Perangkat lunak ini mendukung beragam proyek teknik geoteknik, termasuk analisis sistem fondasi, galian dalam dengan berbagai metode penyanggaan, terowongan dengan geometri kompleks, perhitungan konsolidasi dan filtrasi, analisis dinamika tanah, serta evaluasi stabilitas lereng. Keunggulan lain dari GTS NX adalah kemampuannya untuk melakukan analisis baik dalam format 2D maupun 3D, sehingga memberikan fleksibilitas tinggi dalam menyelesaikan permasalahan geoteknik yang kompleks. Hal ini menjadikan GTS NX sebagai alat yang efektif dan serbaguna untuk mendukung penelitian dan perancangan geoteknik (Koryagina, 2021).

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak analisis geoteknik yaitu MIDAS GTS NX menggunakan metode SRM (*strenght reduction method*) karena pendekatan ini dapat secara langsung mempertimbangkan perilaku nonlinier material tanah, distribusi tekanan air pori, dan kondisi geometri kompleks. SRM bekerja dengan mengurangi parameter kekuatan geser tanah, seperti kohesi dan sudut geser dalam, hingga kondisi keruntuhan tercapai, sehingga memberikan faktor keamanan yang lebih akurat. Selain itu, metode ini dapat diintegrasikan dengan analisis elemen hingga, memungkinkan evaluasi yang lebih rinci terhadap mekanisme keruntuhan dan distribusi regangan dalam lereng. Fleksibilitas dan kemampuannya untuk menangani berbagai kondisi lereng membuat SRM unggul dibandingkan metode konvensional. Untuk data-data yang digunakan dalam perencanaan perkuatan lereng menggunakan geogrid di dapat dari sebuah proyek di Banten. Penelitian ini difokuskan untuk mencari *factor of safety* (FoS) dari lereng yang diuji.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut merupakan data-data yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat di Tabel 1 dan Tabel 2

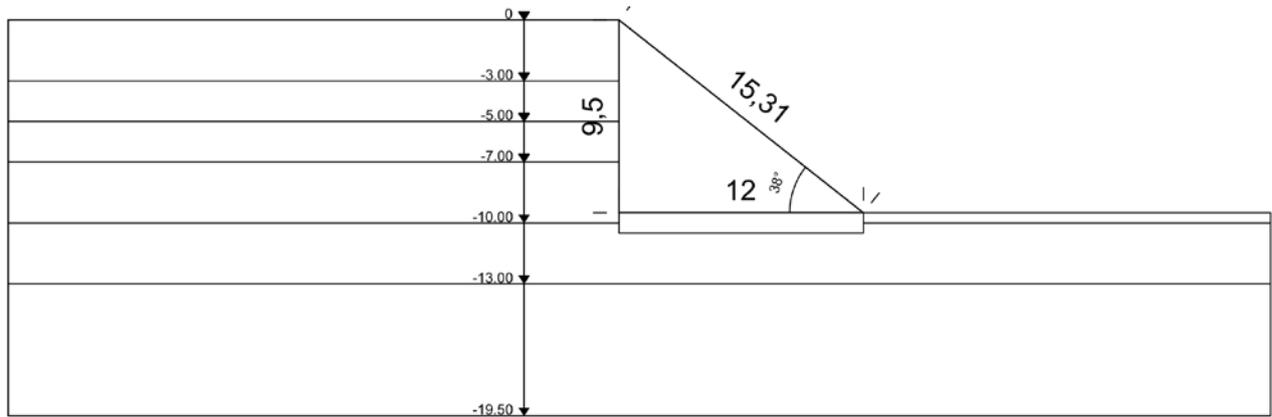
Tabel 1. Data tanah

	1,5-2	3,5-4	5,5-6	7,5-8
Modulus elastis	13000 kN/m ²	11500 kN/m ²	12000 kN/m ²	11000 kN/m ²
poisson ratio	0,35	0,33	0,34	0,32
Unit weight	15,91 kN/m ³	13,89 kN/m ³	13,89 kN/m ³	14,5 kN/m ³
Unit weight saturated	15,91 kN/m ³	14,5 kN/m ³	14,5 kN/m ³	15 kN/m ³
initial void ratio	1,667	2,113	2,134	2,344
cohesion	28,44 kN/m ²	26,96 kN/m ²	25,49 kN/m ²	22,5 kN/m ²
frictional angle	4	3	3	9

Tabel 2. Data tanah dan material lainnya

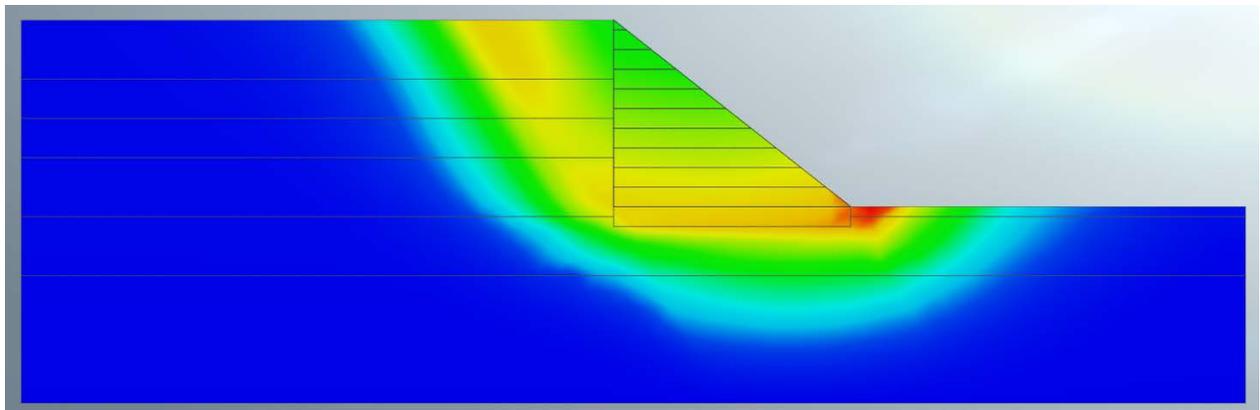
	11,5-12	13,5-14	FILLER	URUG
Modulus elastis	10500 kN/m ²	10000 kN/m ²	25000 kN/m ²	30000 kN/m ²
poisson ratio	0,31	0,3	0,3	0,3
Unit weight	15,66 kN/m ³	16,98 kN/m ³	18 kN/m ³	17,5 kN/m ³
Unit weight saturated	16 kN/m ³	17,2 kN/m ³	20 kN/m ³	20 kN/m ³
initial void ratio	1,874	1,347	0,65	0,6
cohesion	22,5 kN/m ²	22,5 kN/m ²	50 kN/m ²	0 kN/m ²
frictional angle	9	9	35	36

Berikut merupakan geometri lereng yang digunakan dalam penelitian ini, ditunjukkan di dalam gambar 1

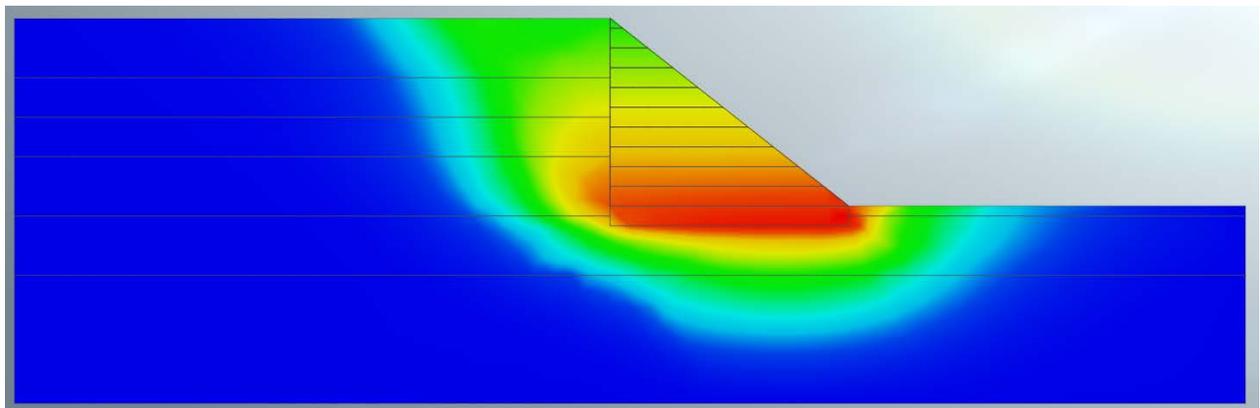


Gambar 1. Geometri Lereng

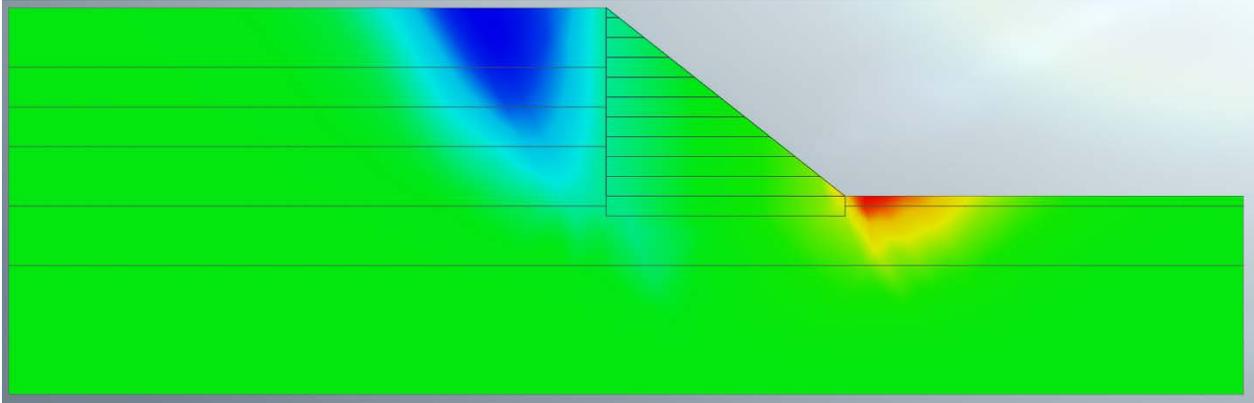
Berikut merupakan hasil analisis perkuatan lereng menggunakan geogrid menggunakan perangkat lunak geoteknik MIDAS GTS NX.



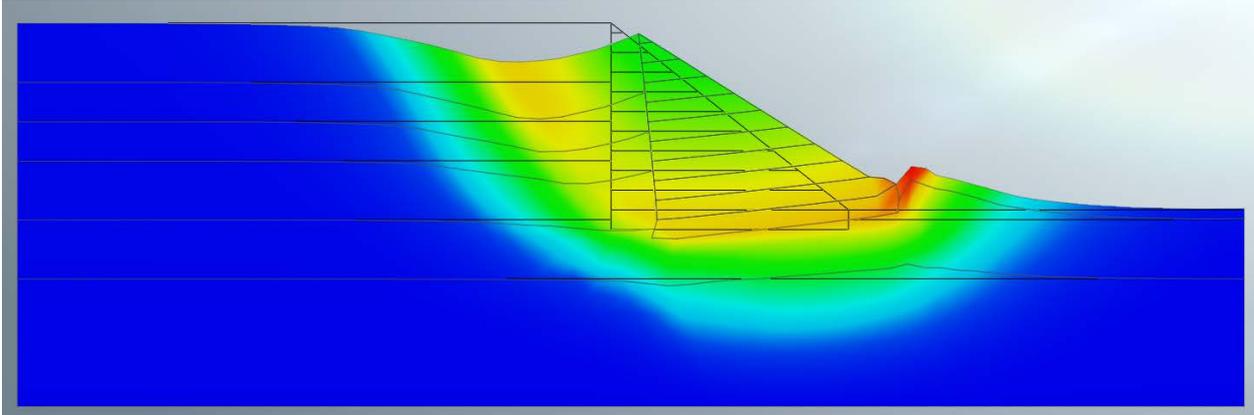
Gambar 2. Total Translasi



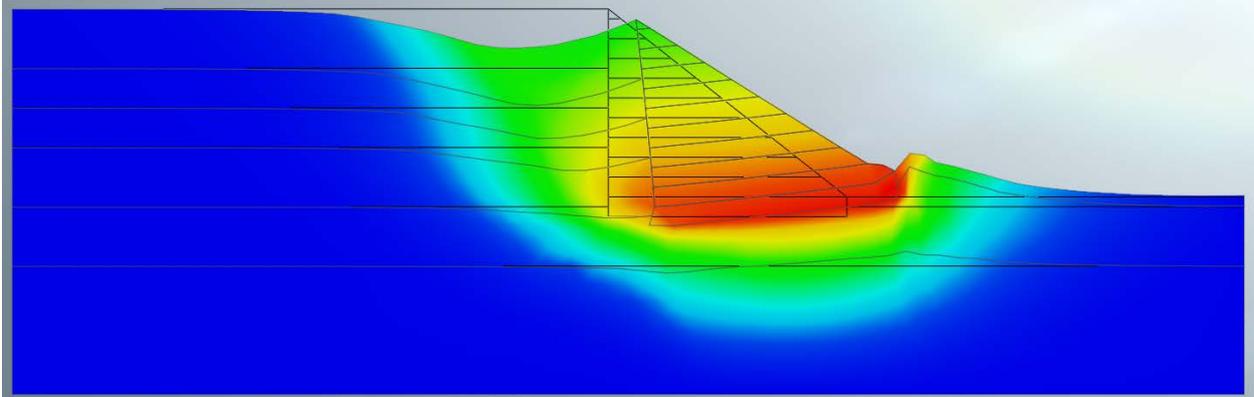
Gambar 3. Translasi Arah X



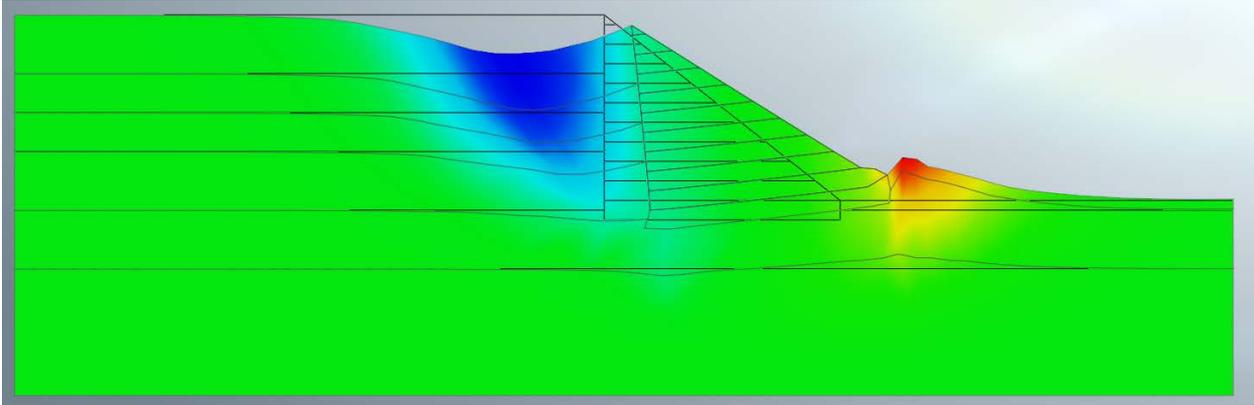
Gambar 4. Translasi Arah Y



Gambar 5. Total Translasi *Deformed*



Gambar 6. Translasi Arah X *Deformed*



Gambar 7. Translasi Arah Y *Deformed*

Didapatkan hasil *safety factor* sebesar 1.25 untuk lereng yang tidak menggunakan geogrid, dan 1.3265 untuk lereng yang sudah diberikan geogrid. Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4 merupakan hasil dalam bentuk *undeformed*, sementara Gambar 5, Gambar 6, dan Gambar 7 merupakan hasil dalam bentuk *deformed*

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa kestabilan lereng menggunakan geogrid, didapatkan hasil *Safety Factor* dari analisa stabilitas lereng menggunakan geogrid adalah 1.3265 menggunakan geogrid, dan 1.25 tanpa menggunakan geogrid. Terjadi kenaikan 6.12% dari *safety factor awal* dan setelah diberikan geogrid

Saran

Untuk menambah *safety factor* dari lereng ini disarankan untuk mengganti tanah di belakang dan di depan lereng dengan tanah timbunan atau pasir urug, karena tanah asli yang digunakan untuk lereng tidak bisa menahan bebannya. Selanjutnya perlu dilakukan pengujian menggunakan bahan geosintetik lainnya seperti geotextile, geomats dan juga geomembrane untuk dijadikan bahan pembanding.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Barqawi, M., Aqel, R., & Wayne, M. (2021). *Polymer Geogrids: A Review of Material, Design and Structure Relationships*. Materials. doi:<https://doi.org/10.3390/ma14164745>
- Brady, & Weil. (2017). *The Nature and Properties of Soils*. Pearson Education.
- Das. (2010). *Principle of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning.
- Harabinová, S., & Panulinová, E. (2020). *Modelling of ensuring slope stability*. MATEC Web of Conferences. doi:<https://doi.org/10.1051/mateconf/202031300030>
- Horton. (1945). *Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology*. Geological Society of America. doi:[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- Jasim, O. H. (2023). *Using Geogrid Encased Granular Columns for Embankment's Slope Protection: 3D-Finite Difference Analysis*. Applied Sciences. doi:<https://doi.org/10.3390/app13042448>
- Kamel, M., Chandra, S., & Kumar, P. (2004). *Behaviour of Subgrade Soil Reinforced with Geogrid*. Taylor & Francis. doi:<https://doi.org/10.1080/1029843042000327122>
- Keskin, M. S. (2022). *Stability of MSW Landfill Slopes Reinforced with Geogrids*. Applied Sciences. doi:<https://doi.org/10.3390/app122211866>
- Koryagina. (2021). *Informatization Of Construction Management As A Basis For Preventing Man-Made Accidents*. Construction Materials and Products. doi:<https://doi.org/10.34031/2618-7183-2021-4-4-11-31>
- Montgomery. (2007). *Soil Erosion and Agricultural Sustainability*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Proceedings of the National Academy of Sciences. doi:<https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104>
- Richter, D., & Markewitz, D. (1995). *How Deep Is Soil? Soil, the zone of the earth's crust that is biologically active, is much deeper than has been thought by many ecologists* (Vol. 45). BioScience. doi:<https://doi.org/10.2307/1312764>
- Small, J. (2016). *Geomechanics in Soil, Rock, and Environmental Engineering*. Taylor & Francis. doi:<https://doi.org/10.1201/9781315382272>

