



Studi Kestabilan Lereng Galian Dengan Perkuatan Geocell Di Kawasan Perumahan Koka, Kabupaten Minahasa

Alsetya D. Ladi^{#a}, Roski R. I. Legrans^{#b}, Jack H. Ticoh^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia

^aalsetyaladi021@student.student.ac.id, ^blegransroski@unsrat.ac.id, ^cjack.ticoh@unsrat.ac.id

Abstrak

Permasalahan kestabilan lereng pada pekerjaan galian dan timbunan merupakan aspek krusial dalam proyek konstruksi, karena ketidakstabilan lereng dapat menimbulkan risiko keselamatan, peningkatan biaya, serta gangguan terhadap keberlanjutan struktur di sekitarnya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas lereng galian yang diperkuat menggunakan geocell pada lokasi Perumahan Koka, Kabupaten Minahasa, yang didominasi oleh tanah berbutir berupa pasir bersih hingga pasir berlanau (clean sands to silty sands). Analisis dilakukan menggunakan metode Bishop Simplified dan pemodelan numerik PLAXIS 2D untuk mengevaluasi kinerja lereng setelah pemasangan geocell. Variasi kondisi muka air tanah (MAT) diterapkan pada kedalaman 1 m dan 2 m dari permukaan tanah untuk menilai pengaruh tekanan air pori terhadap kestabilan lereng. Model lereng memiliki tinggi 12 m dengan kemiringan 19°, dan diperkuat menggunakan tiga tipe geocell, yaitu MG100-660-HDPE, MG125-700-HDPE, dan MG150-740-HDPE. Evaluasi dilakukan pada kondisi statis dan dinamis, baik drained maupun undrained. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan geocell mampu meningkatkan faktor keamanan (FK) lereng pada kondisi drained sebesar 3,66% hingga 4,69%. Selain itu, deformasi lereng mengalami penurunan signifikan dengan persentase reduksi antara 4,19% hingga 63,45%. Peningkatan FK dan penurunan deformasi paling besar terjadi pada kondisi dinamis-drained dengan MAT 0 m ketika menggunakan geocell tipe MG150-740-HDPE. Secara umum, ketiga tipe geocell menunjukkan performa yang relatif serupa. Variasi MAT terbukti memengaruhi kestabilan lereng, di mana posisi muka air tanah yang lebih tinggi menyebabkan penurunan FK dan peningkatan deformasi akibat bertambahnya tekanan air pori dan berkurangnya tegangan efektif tanah.

Kata kunci: kestabilan lereng, geocell, muka air tanah, deformasi, faktor keamanan

1. Pendahuluan

Pembangunan kawasan perumahan umumnya memerlukan pekerjaan galian untuk menyesuaikan elevasi lahan. Namun, aktivitas galian pada lereng dapat menurunkan kestabilan tanah, terutama pada tanah lempung dan lanauan yang mudah mengalami kejemuhan sehingga kekuatan gesernya berkang secara signifikan. Hasil investigasi geoteknik di lokasi penelitian menunjukkan bahwa kondisi tanah didominasi oleh lempung, lanau, dan pasir berlanau, yang secara inheren memiliki potensi ketidakstabilan apabila tidak diberikan perkuatan yang memadai.

Berbagai penelitian sebelumnya telah menunjukkan efektivitas penggunaan material perkuatan dalam meningkatkan stabilitas lereng. Pramulandani & Hamdhan (2020) melaporkan bahwa penggunaan geocell mampu meningkatkan nilai safety factor rata-rata sekitar 7% dibandingkan kondisi tanpa perkuatan. Fitriani & Ashadi (2023) menemukan bahwa konfigurasi geocell dengan tinggi 20 cm dan jarak antar sel 25 cm merupakan kombinasi optimal untuk mengatasi potensi longsor pada lereng di wilayah Banten. Pada tanah lempung lunak di Kabupaten Kapuas, Fitriansyah (2024) menunjukkan bahwa penggunaan beberapa lapis geocell secara horizontal, dianalisis melalui metode Fellenius dan PLAXIS, sangat efektif dalam meningkatkan stabilitas lereng. Sebagai pembanding, penelitian Muzaidi & Anggarini (2023) menggunakan geotekstil dan menemukan bahwa jumlah lapis perkuatan serta kemiringan lereng

merupakan faktor dominan dalam menentukan nilai keamanan. Selain itu, studi tiga dimensi oleh Hamdhan & Eliza (2023) menunjukkan bahwa perkuatan bronjong (gabion) dapat meningkatkan faktor keamanan sekitar 9,5% pada lereng pasir berlanau dengan kemiringan 1:1.

Berdasarkan kajian terdahulu tersebut, geocell terbukti sebagai salah satu metode perkuatan yang efektif dalam meningkatkan stabilitas lereng, terutama pada tanah lempung dan lempung lunak. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada satu jenis geocell tanpa mengevaluasi pengaruh variasi modulus elastisitas terhadap performa lereng. Selain itu, kajian mengenai pengaruh muka air tanah (MAT) serta beban dinamis—seperti beban gempa—terhadap efektivitas geocell masih terbatas, khususnya pada konteks lereng galian di kawasan perumahan.

Sejalan dengan kebutuhan tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis kestabilan lereng galian di Perumahan Koka, Minahasa, dengan meninjau efektivitas perkuatan geocell pada berbagai kondisi geoteknik dan pembebangan. Analisis dilakukan pada kondisi drained dan undrained, dengan variasi muka air tanah (0 m, 1 m, dan 2 m), serta mempertimbangkan pengaruh beban statis maupun dinamis. Kondisi tanpa perkuatan dianalisis menggunakan metode Bishop Simplified, sedangkan kondisi dengan perkuatan dimodelkan secara numerik menggunakan PLAXIS 2D. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis yang relevan untuk meningkatkan keamanan lereng galian pada kawasan perumahan, terutama pada lokasi dengan potensi longsor akibat karakteristik tanah dan aktivitas pembangunan.

2. Metode Analisis

Penelitian ini berangkat dari kebutuhan untuk mengevaluasi kestabilan lereng galian pada Kawasan Perumahan Koka, khususnya terkait efektivitas perkuatan geocell dalam meningkatkan faktor keamanan dan mengurangi deformasi lereng. Permasalahan utama yang dikaji meliputi penentuan nilai faktor keamanan (FK) dan deformasi lereng sebelum dan sesudah penerapan perkuatan geocell, serta perbandingan kinerja lereng pada kedua kondisi tersebut. Lingkup penelitian mencakup analisis lereng galian menggunakan data sekunder dari lokasi penelitian, dengan penerapan tiga jenis geocell yang berbeda. Evaluasi dilakukan pada kondisi pembebangan statis dan dinamis, baik dalam keadaan drained maupun undrained, serta dengan variasi muka air tanah pada kedalaman 0 m, 1 m, dan 2 m. Analisis tanpa perkuatan dilakukan menggunakan metode Bishop Simplified, sedangkan kondisi dengan perkuatan dimodelkan secara numerik melalui PLAXIS 2D. Tujuan penelitian ini adalah menentukan kestabilan lereng dengan dan tanpa geocell, mengidentifikasi pengaruh variasi modulus elastisitas geocell berdasarkan tipe geocell terhadap nilai FK dan deformasi. Seluruh analisis difokuskan pada lereng galian yang berlokasi di Kawasan Perumahan Koka, Minahasa.



Gambar 1. Lokasi Penelitian (*sumber: Google Earth*)

3. Kajian Pustaka

3.1. Uji Sondir

Berdasarkan hasil penyelidikan tanah menggunakan uji sondir atau Cone Penetration Test (CPT), diperoleh dua parameter utama, yaitu hambatan konus (q_c) dan hambatan geser selubung atau hambatan setempat (f_s). Kedua parameter ini merupakan indikator penting untuk mengidentifikasi karakteristik tanah secara in-situ karena CPT mampu memberikan data kontinu terhadap kedalaman dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Nilai q_c menggambarkan resistansi tanah terhadap penetrasi ujung konus, sedangkan f_s menunjukkan besarnya geseran yang terjadi pada selubung konus selama proses penetrasi.

Data q_c dan f_s selanjutnya dapat diolah melalui berbagai korelasi empiris untuk memperoleh parameter tanah yang lebih representatif bagi analisis geoteknik. Korelasi tersebut umumnya dikembangkan berdasarkan hasil penelitian laboratorium dan lapangan yang menghubungkan nilai q_c dan f_s dengan sifat-sifat tanah seperti kepadatan relatif (D_r), sudut geser dalam (ϕ'), modulus elastisitas (E_s), kohesi tak terdrainasi (c_u), serta klasifikasi tanah berdasarkan indeks perilaku (*Soil Behavior Type*). Selain itu, rasio geser konus (friction ratio, $R_f = f_s/q_c \times 100\%$) sering digunakan untuk membedakan jenis tanah berbutir kasar dan berbutir halus, sehingga membantu dalam interpretasi stratigrafi bawah permukaan.

Pemanfaatan korelasi empiris ini sangat penting karena CPT tidak secara langsung mengukur parameter mekanik tanah, tetapi memberikan data resistansi yang dapat dikonversi menjadi parameter desain melalui pendekatan empiris yang telah divalidasi secara luas. Dengan demikian, interpretasi q_c dan f_s memungkinkan perencanaan untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi tanah, yang selanjutnya digunakan dalam analisis stabilitas lereng, daya dukung tanah, penurunan, serta desain perkuatan tanah.

3.2. Metode Bishop Simplified

Method (LEM) yang paling banyak digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng, terutama pada kasus bidang gelincir berbentuk lingkaran. Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh Alan W. Bishop pada tahun 1955 sebagai bentuk penyederhanaan dari metode Bishop General yang lebih kompleks. Dalam konteks perencanaan geoteknik di Indonesia, metode ini juga direkomendasikan dalam SNI 8460:2017 tentang Perencanaan Teknis Lereng, karena dianggap mampu memberikan hasil yang cukup akurat dengan tingkat kompleksitas perhitungan yang masih dapat diterima.

Metode Bishop Simplified bekerja dengan membagi massa tanah di atas bidang gelincir menjadi sejumlah irisan vertikal (vertical slices). Setiap irisan dianggap sebagai elemen terpisah yang dianalisis berdasarkan keseimbangan gaya dan momen. Pendekatan ini berfokus pada keseimbangan momen terhadap pusat lingkaran bidang gelincir, sehingga faktor keamanan (Factor of Safety, FK) diperoleh dari hubungan antara gaya penahan (resisting forces) dan gaya penggerak (driving forces).

Pada setiap irisan, gaya-gaya yang diperhitungkan meliputi:

- Berat irisan tanah (W)
- Gaya normal pada bidang gelincir (N)
- Kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) tanah
- Tekanan air pori (u) pada bidang gelincir
- Komponen gaya geser yang menahan pergerakan (S)

Metode ini mengabaikan gaya geser antar irisan (inter-slice shear forces), sehingga persamaan keseimbangan menjadi lebih sederhana dan dapat diselesaikan secara iteratif. Walaupun demikian, Bishop menunjukkan bahwa pengabaian gaya geser antar irisan tidak mengurangi akurasi secara signifikan untuk kasus bidang gelincir berbentuk lingkaran.

Faktor keamanan (FK) dalam metode Bishop Simplified dihitung menggunakan persamaan iteratif berikut:

$$FK = \frac{\sum [cL + (W - uL)\tan\phi] \frac{1}{m_\alpha}}{\sum W \sin\alpha}$$

$$m_\alpha = \cos\alpha + \frac{\tan\varphi \sin\alpha}{F}$$

Karena FK muncul di kedua sisi persamaan, penyelesaiannya memerlukan iterasi numerik, biasanya menggunakan metode trial-and-error atau algoritma komputasi.

Metode Bishop memiliki keunggulan antara lain:

1. Akurasi tinggi untuk bidang gelincir berbentuk lingkaran;
2. Lebih sederhana dibandingkan metode keseimbangan umum (General Limit Equilibrium);
3. Stabil secara numerik, sehingga mudah diimplementasikan dalam perangkat lunak geoteknik;
4. Direkomendasikan oleh standar internasional dan nasional, termasuk SNI 8460:2017;
5. Cocok untuk analisis lereng alami, galian, timbunan, dan lereng dengan perkuatan.

3.3. Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga (Finite Element Method/FEM) merupakan pendekatan numerik yang banyak digunakan dalam analisis geoteknik modern, termasuk evaluasi kestabilan lereng. Prinsip dasar metode ini adalah membagi massa tanah menjadi sejumlah elemen-elemen kecil (finite elements) yang saling terhubung melalui titik-titik nodal. Setiap elemen dianalisis berdasarkan hubungan tegangan-regangan yang diturunkan dari hukum mekanika tanah dan teori elastisitas/plastisitas, sehingga perilaku tanah dapat dimodelkan secara lebih realistik dibandingkan metode keseimbangan batas (Limit Equilibrium Method/LEM).

Dalam FEM, perilaku tanah direpresentasikan melalui model konstitutif seperti Mohr-Coulomb, Hardening Soil, atau Soft Soil, yang memungkinkan simulasi:

- Distribusi tegangan dan regangan di seluruh tubuh lereng
 - Perubahan deformasi akibat pembebahan atau perubahan kondisi hidrogeologi
 - Perkembangan zona plastis yang mengindikasikan potensi keruntuhan
 - Interaksi antara tanah dan struktur perkuatan, seperti geocell, geogrid, atau dinding penahan
- Dengan demikian, FEM tidak hanya memberikan nilai Faktor Keamanan (FK), tetapi juga memberikan gambaran mekanisme keruntuhan yang lebih komprehensif.

Dalam praktiknya, FEM banyak diimplementasikan melalui perangkat lunak geoteknik seperti PLAXIS 2D, yang dirancang khusus untuk analisis deformasi dan stabilitas tanah. PLAXIS 2D mampu menangani:

- Geometri lereng yang kompleks
- Variasi stratigrafi tanah yang tidak seragam
- Kondisi muka air tanah (MAT) yang berubah-ubah
- Pembebahan statis dan dinamis, termasuk beban gempa
- Perkuatan tanah, seperti geocell, geogrid, dan paku tanah

3.4. Geocell

Geocell merupakan salah satu jenis material geosintetik yang dirancang dalam bentuk struktur tiga dimensi menyerupai pola sarang lebah (*honeycomb structure*). Material ini umumnya terbuat dari strip polimer seperti High-Density Polyethylene (HDPE), Polypropylene (PP), atau kombinasi polimer lainnya yang disambung menggunakan teknik ultrasonik sehingga membentuk sel-sel terbuka yang fleksibel namun memiliki kekakuan tinggi ketika direntangkan.

Secara fungsional, geocell bekerja dengan cara menjebak dan mengonfinen material pengisi di dalam sel-selnya. Ketika sel-sel tersebut diisi dengan tanah, pasir, batu pecah, atau bahkan beton, terbentuklah suatu sistem komposit tanah-geosintetik yang memiliki kekakuan dan kapasitas dukung lebih tinggi dibandingkan material tanah asli. Mekanisme ini dikenal sebagai konfinemen lateral, yaitu kemampuan geocell untuk menahan pergerakan lateral material pengisi sehingga meningkatkan kekuatan geser dan mengurangi deformasi.

Penggunaan geocell telah terbukti efektif dalam berbagai aplikasi geoteknik, seperti:

- Stabilisasi lereng, baik pada lereng galian maupun timbunan
- Perkuatan tanah dasar (subgrade reinforcement) pada jalan raya dan area industri
- Perlindungan erosi pada permukaan lereng atau saluran air
- Perkuatan struktur penahan tanah
- Perkuatan pondasi dangkal

Keunggulan utama geocell terletak pada kemampuannya untuk meningkatkan modulus kekakuan tanah, mengurangi deformasi vertikal, serta meningkatkan faktor keamanan lereng melalui distribusi tegangan yang lebih merata. Selain itu, struktur tiga dimensinya memungkinkan geocell bekerja lebih efektif dibandingkan geosintetik dua dimensi seperti geogrid, terutama pada tanah berbutir seperti pasir bersih hingga pasir berlanau.

Dalam konteks analisis kestabilan lereng, geocell berperan sebagai elemen perkuatan yang meningkatkan resistansi terhadap gaya geser dan mengurangi potensi pergerakan massa tanah. Efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh jenis material pengisi, tinggi sel, ketebalan strip polimer, serta konfigurasi pemasangan di lapangan.

Tabel 1. Ringkasan Mekanisme Perkuatan Geocell

Mekanisme	Penjelasan
Konfinemen lateral	Menahan pergerakan tanah dalam sel, meningkatkan kekuatan geser
Distribusi beban	Beban vertikal disebarluaskan ke area lebih luas, mengurangi tegangan lokal.
Interlocking	Material pengisi terkunci dalam sel → meningkatkan kekakuan.
Reduksi deformasi	Mengurangi pergerakan lateral dan vertikal lereng.
Peningkatan stabilitas global	Lapisan geocell bekerja sebagai elemen perkuatan lereng.



Gambar 2. Geocell

4. Hasil dan Pembahasan

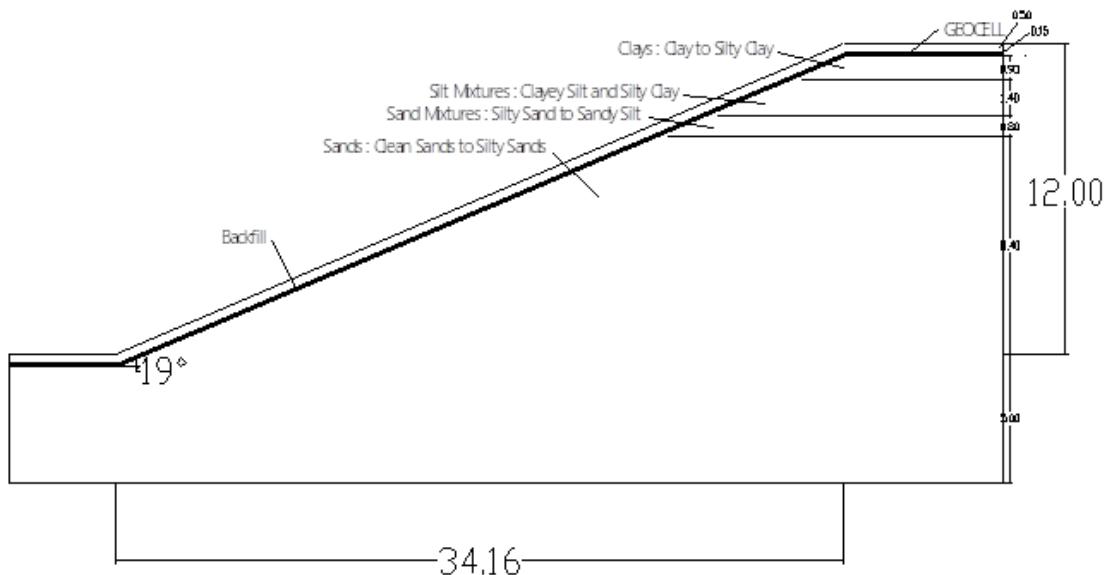
4.1. Deskripsi Tanah

Tabel 1. Data Tanah

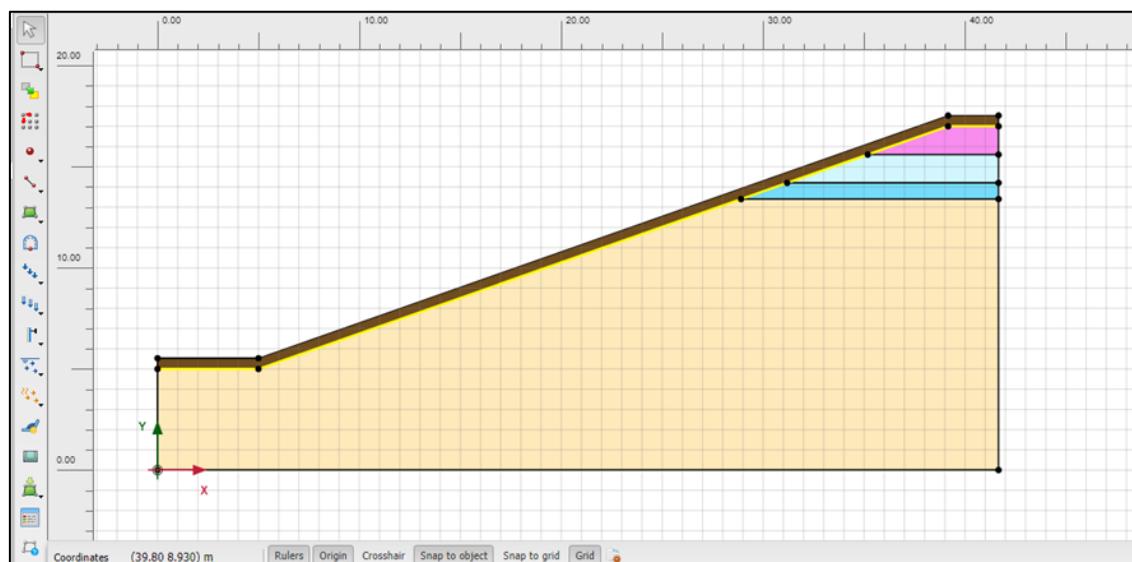
Kedalaman (m)	γ kN/m ³	φ °	c_u kN/m ²	Zone	<i>Soil Description</i>
0,00 – 1,40	13,24	24,55	43,22	3	<i>Clays : Clay to Silty Clay</i>
1,60 – 2,80	18,11	34,54	80,28	4	<i>Silt Mixtures : Clayey Silt and Silty Clay</i>
3,00 – 3,60	18,78	38,57	39,70	5	<i>Sand Mixtures : Silty Sand to Sandy Silt</i>
3,80 – 4,20	19,38	41,13	61,43	6	<i>Sands : Clean Sand to Silty Sands</i>

Hasil investigasi tanah menunjukkan bahwa lapisan tanah pada lokasi penelitian terdiri dari empat zona utama dengan karakteristik fisik dan mekanik yang berbeda. Pada kedalaman 0,00–

1,40 m, tanah didominasi oleh lempung hingga lempung berlanau dengan berat isi 13,24 kN/m³, sudut geser dalam 24,55°, dan kuat geser tak terdrainasi (c_u) sebesar 43,22 kN/m². Lapisan berikutnya pada kedalaman 1,60–2,80 m berupa campuran lanau, yaitu *clayey silt* dan *silty clay*, dengan berat isi 18,11 kN/m³, sudut geser 34,54°, dan c_u sebesar 80,28 kN/m². Pada kedalaman 3,00–3,60 m ditemukan material campuran pasir berlanau hingga lanau berpasir (*silty sand–sandy silt*) dengan berat isi 18,78 kN/m³, sudut geser 38,57°, dan c_u sebesar 39,70 kN/m². Lapisan terdalam pada kedalaman 3,80–4,20 m merupakan pasir bersih hingga pasir berlanau dengan berat isi 19,38 kN/m³, sudut geser 41,13°, dan c_u sebesar 61,43 kN/m². Variasi karakteristik ini menunjukkan adanya perubahan signifikan dalam kekuatan geser dan jenis tanah seiring bertambahnya kedalaman, yang penting untuk analisis kestabilan lereng dan pemodelan numerik.



Gambar 3. Potongan Lereng Galian di Lokasi Studi dan Penempatan Perkuatan Lereng dengan Geocell



Gambar 4. Potongan Lereng Galian dengan Perkuatan Geocell pada PLAXIS 2D

4.2. Kestabilan Lereng Galian

Penelitian ini mengevaluasi efektivitas perkuatan geocell terhadap kestabilan lereng galian dengan membandingkan nilai deformasi dan faktor keamanan (SF) pada berbagai kondisi muka air tanah (MAT), jenis pembebanan (statis dan dinamis), serta kondisi analisis (drained dan

undrained). Perbandingan dilakukan antara kondisi tanpa perkuatan (menggunakan metode Bishop dan PLAXIS 2D) dan kondisi dengan perkuatan menggunakan tiga tipe geocell berbasis HDPE: MG100-660, MG125-700, dan MG150-740.

1. Kondisi Statis – Drained

Pada kondisi drained statis, nilai SF tanpa geocell berkisar antara 2,38–2,44 (Bishop) dan 2,56–2,73 (PLAXIS), dengan deformasi antara 0,340–0,631 m. Setelah penerapan geocell, nilai SF meningkat menjadi 2,68–2,83, dan deformasi bervariasi tergantung jenis geocell. Menariknya, geocell MG125 dan MG150 menunjukkan deformasi yang lebih kecil (0,340–0,631 m) dibandingkan MG100 (0,575–0,758 m), meskipun nilai SF relatif seragam. Hal ini menunjukkan bahwa modulus elastisitas geocell berpengaruh terhadap deformasi, meskipun tidak signifikan terhadap SF.

2. Kondisi Statis – Undrained

Pada kondisi undrained statis, nilai SF tanpa geocell adalah 1,62 (Bishop) dan 1,69–1,73 (PLAXIS), dengan deformasi antara 1,527–1,887 m. Setelah perkuatan, nilai SF meningkat sedikit menjadi 1,69–1,73, namun deformasi cenderung lebih besar pada MG100 (hingga 2,067 m) dibandingkan MG125 dan MG150 (1,527–1,887 m). Meskipun peningkatan SF tidak signifikan, pengurangan deformasi pada geocell dengan modulus lebih tinggi tetap konsisten, menunjukkan kontribusi terhadap kekakuan sistem.

3. Kondisi Dinamis – Drained

Pada pembebanan dinamis dengan analisis drained, nilai SF tanpa geocell berkisar antara 1,83–1,88 (Bishop) dan 2,56–2,66 (PLAXIS), dengan deformasi antara 0,724–1,637 m. Setelah perkuatan, SF meningkat menjadi 2,67–2,83, dan deformasi menurun drastis, terutama pada MG125 dan MG150 (0,355–0,667 m). MG100 menunjukkan deformasi lebih tinggi (0,461–2,067 m), mengindikasikan bahwa geocell dengan modulus lebih tinggi lebih efektif dalam meredam deformasi akibat beban dinamis.

4. Kondisi Dinamis – Undrained

Pada kondisi dinamis–undrained, nilai SF tanpa geocell adalah 1,28 (Bishop) dan 1,71 (PLAXIS), dengan deformasi sekitar 1,703 m. Setelah perkuatan, nilai SF tetap berada di kisaran 1,69–1,71, namun deformasi menurun menjadi 1,421–1,473 m pada MG125 dan MG150. MG100 menunjukkan deformasi sedikit lebih tinggi. Meskipun peningkatan SF terbatas, pengurangan deformasi tetap menjadi indikator efektivitas perkuatan.

Tabel 2. Faktor Keamanan (FK) Lereng - sebelum dan sesudah menggunakan Perkuatan

Kondisi	MAT	SNI (min SF)	Tanpa Geocell (Bishop)	Tanpa Geocell (PLAXIS 2d)		GEOCELL			
				DEF (m)	SF	DEF (m)	SF	DEF (m)	SF
Statis-Drained	0	1,25	2,38	0,496	2,56	0,602	2,68	0,496	2,67
	1		2,41	0,340	2,64	0,575	2,75	0,340	2,75
	2		2,44	0,631	2,73	0,758	2,83	0,631	2,83
Statis-Undrained	0	1,1	1,62	1,703	1,71	1,839	1,69	1,703	1,69
	1		1,62	1,527	1,73	1,956	1,71	1,527	1,71
	2		1,62	1,887	1,75	2,035	1,73	1,887	1,73
Dinamis-Drained	0		1,83	0,724	2,56	0,461	2,67	0,355	2,68
	1		1,85	1,543	2,63	1,956	2,74	0,564	2,74
	2		1,88	1,637	2,73	1,916	2,83	0,667	2,83
Dinamis- Undrained	0		1,28	1,703	1,71	1,473	1,69	1,421	1,69
	1		1,28	1,527	1,73	1,788	1,71	1,463	1,71
	2		1,28	1,887	1,75	2,035	1,73	1,682	1,73

5. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan geocell sebagai perkuatan pada lereng galian dengan karakteristik tanah pasir bersih hingga pasir berlanau di Perumahan Koka, Kabupaten Minahasa, mampu meningkatkan stabilitas lereng secara signifikan. Analisis menggunakan metode Bishop Simplified dan pemodelan numerik PLAXIS 2D memperlihatkan bahwa pemasangan geocell memberikan peningkatan faktor keamanan (FK) pada berbagai kondisi muka air tanah (MAT) dan skenario pembebaan. Peningkatan FK pada kondisi drained berkisar antara 3,66% hingga 4,69%, sedangkan deformasi lereng mengalami penurunan yang jauh lebih besar, yaitu antara 4,19% hingga 63,45%, tergantung tipe geocell dan kondisi hidrogeologi.

Kinerja perkuatan paling optimal diperoleh pada kondisi dinamis-drained dengan MAT 0 m, terutama ketika menggunakan geocell tipe MG150-740-HDPE, yang menunjukkan peningkatan FK dan reduksi deformasi paling signifikan. Meskipun demikian, ketiga tipe geocell yang diuji (MG100-660-HDPE, MG125-700-HDPE, dan MG150-740-HDPE) secara umum memberikan performa yang relatif serupa dalam meningkatkan stabilitas lereng.

Variasi muka air tanah terbukti memiliki pengaruh besar terhadap kestabilan lereng. Posisi MAT yang lebih tinggi menyebabkan penurunan FK dan peningkatan deformasi akibat bertambahnya tekanan air pori dan berkurangnya tegangan efektif tanah. Hal ini menegaskan pentingnya pengendalian kondisi hidrogeologi dalam desain lereng, terutama pada tanah berbutir nonkohesif.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa geocell merupakan solusi perkuatan yang efektif untuk meningkatkan stabilitas lereng pada tanah granular, baik dalam kondisi statis maupun dinamis. Temuan ini dapat menjadi acuan dalam perencanaan teknis lereng galian pada proyek konstruksi serupa, khususnya pada daerah dengan kondisi tanah berpasir dan fluktuasi muka air tanah yang signifikan.

Referensi

- Angga Ahmad Maulana, D. R. (2014). *Analisis stabilitas tanggul yang distabilisasi menggunakan kapur, flyash, dan biobakteri akibat musim hujan dan musim kemarau di Sungai Bengawan Solo Cross Section 0+500 Semangang - Bojonegoro*.
- Braja M. Das, K. S. (2018). *Principles of Geotechnical Engineering (Ninth Edition)*. United States of America: CENGAGE Learning.
- Braja M. Das, & Nagaratnam, N. E. (1993). *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik) Jilid 2*. Surabaya: Penerbit Teknik.
- Camela A. Seroy, F. J. (Februari 2020). *Analisa kestabilan embankment Nunuka I*. Jurnal Sipil Statik, Vol.8 No.2, 205–210. ISSN: 2337–6732.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik) – Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Dharmayasa, I. G. (n.d.). *Analisis rembesan di bawah tubuh bendungan urugan*. Jurnal Teknik Sipil, Universitas Pendidikan Nasional, Denpasar, Bali.
- Dian Asri Moelyani, Elan Kadar, Rakhman Taufik, DEa Pertiwi, & Fahmi Alidamar. (n.d.). *Modul pelatihan geosintetik Volume 1: Klasifikasi dan fungsi geosintetik*. Direktorat Bina Teknik, Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum.
- Elrinawati Lumentah, F. J. (2021). *Analisis kestabilan DAM Tailing PT. Sumber Energy Jaya*. Jurnal Ilmiah Media Engineering, Vol.11 No.3.
- Fitriani, E. N., & Ashadi, R. F. (2023). *Penanggulangan longsoran dengan menggunakan geocell*.
- Fitradi, N. I., & Abdurrozaq, M. R. (n.d.). *Analisis stabilitas lereng dengan perkuatan geotekstil dan turap menggunakan program Plaxis*.
- Hardiyatmo, H. C. (t.thn.). *Mekanika Tanah Jilid 1 Edisi Pertama*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Heni Setyawati, N. N. (n.d.). *Analisis rembesan pada perencanaan pembangunan bendungan Logung, Kabupaten Kudus, Jawa Tengah*. Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang.
- Kumar, J. S., Nusari, M. S., Purushotam, D., Prasad, A. Indra, & Rajyaswori. (2021). *Effectiveness of geocell wall, geogrid and micropile anchors for mitigation of unstable slopes*.
- Mandagi, A. T., Sarajar, A. N., & Soebarkah, B. B. A. (2023). *Analisis stabilitas lereng dengan perkuatan soil nailing terhadap lokasi pembangunan RSUD Manado*.

- Pudihang, E. E., Mandagi, A. T., & Ticoh, J. H. (2024). *Analisis stabilitas dan perkuatan lereng dengan metode ground anchor (studi kasus: Ruas Jalan Trans Sulawesi, Desa Lelema, Kecamatan Tumpaan, Kabupaten Minahasa Selatan)*. TEKNO.
- Pramulandani, A., & Hamdan, I. N. (2020). *Analisis stabilitas lereng dengan perkuatan geocell menggunakan metode elemen hingga (PLAXIS 2D)*.
- Rizqullah, P. G., & Yelvi. (2022). *Analisis stabilitas lereng dengan perkuatan geotekstil*.
- Sumampouw, A. N., Legrans, R. R., & Sarajar, A. N. (2024). *Stabilisasi lereng galian dengan perkuatan shotcrete pada pengalihan Sungai Araren di Kabupaten Minahasa Utara*. TEKNO.
- Zhang, J., & Xu, T. (2013). *Numerical analysis of geocell protective slope stability*.
- Legrans, R. R. I., Mandagi, A. T., Ticoh, J. H., & Sarajar, A. N. (2023). *Analisis stabilitas lereng pada konstruksi jalan tambang menggunakan perkuatan geotekstil*. Jurnal Teknik Sipil TEKNO, Vol.21(85).
- Mandagi, A. T., & Sarajar, A. N. (2022). *Analisis pengaruh perkuatan geosintetik terhadap stabilitas lereng galian menggunakan Plaxis 2D*. Jurnal Teknik Sipil TEKNO, Vol.20(80).
- Ticoh, J. H., Legrans, R. R. I., & Manaroinsong, L. D. K. (2024). *Evaluasi daya dukung pondasi dangkal pada tanah berpasir menggunakan perkuatan geotekstil*. Jurnal Teknik Sipil TEKNO, Vol.22(90).
- Manaroinsong, L. D. K., Sarajar, A. N., & Mandagi, A. T. (2023). *Studi eksperimental peningkatan kekuatan tanah lempung dengan penambahan limbah kaca halus*. Jurnal Sipil Statik, Vol.11(5).