



Analisis Kestabilan Lereng Akibat Perubahan Tata Guna Lahan Pada Kawasan Perumahan Di Kota Manado

Josia M. Takaendengan^{#a}, Alva N. Sarajar^{#b}, Roski R. I. Legrans^{#c}

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

^ajosiatakaendengan021@student.unsrat.ac.id, ^balva.sarajar@unsrat.ac.id, ^clegransroski@unsrat.ac.id

Abstrak

Pengembangan kawasan perumahan pada lahan dengan sebagian area berupa lereng berpotensi menimbulkan ketidakstabilan akibat perubahan tata guna lahan, peningkatan beban, dan kondisi hidrolis yang dinamis. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi stabilitas lereng alami serta efektivitas desain rekayasa geometri galian melalui pendekatan komparatif antara Limit Equilibrium Method (LEM) menggunakan *GeoStudio* dan Finite Element Method (FEM) menggunakan *PLAXIS 2D*. Analisis LEM mencakup kondisi statis, infiltrasi, beban struktural, elevasi muka air tanah, dan beban seismik, sedangkan analisis FEM difokuskan pada stabilitas dan deformasi akibat pemotongan, pembebanan, serta pengaruh gempa. Evaluasi dilakukan berdasarkan standar SNI 8460:2017, dengan kriteria Faktor Keamanan (FK) statis $> 1,5$ dan dinamis $> 1,1$. Hasil simulasi LEM menunjukkan bahwa Lereng Eksisting 1 dalam kondisi alami maupun pasca-pemotongan tergolong stabil pada seluruh skenario, dengan FK statis terendah 2,138 dan dinamis 1,196. Sebaliknya, Lereng Eksisting 2 mengalami kondisi kritis saat infiltrasi hujan pada jam ke-1, di mana FK menurun menjadi 1,425 ($< 1,5$). Penerapan metode pemotongan (*cutting*) pada Lereng Eksisting 2 meningkatkan stabilitas terhadap beban perumahan dan infiltrasi (FK statis minimum 1,586), namun tidak mampu menahan beban dinamis gempa dengan FK turun menjadi 1,016 ($< 1,1$). Pemodelan FEM memvalidasi hasil LEM sekaligus memperlihatkan perilaku deformasi tanah. Pada Lereng Eksisting 1, nilai FK dan deformasi berturut-turut tercatat 2,388 dan 0,0008 mm (alami); 2,251 dan 0,0007 mm (pasca-*cutting*); 2,129 dan 1,805 mm (pasca-cut + beban); serta deformasi maksimum meningkat hingga 41,18 mm saat gempa. Pada Lereng Eksisting 2, FK dan deformasi tercatat 1,428 dan 0,2089 mm (alami); 1,633 dan 0,0663 mm (pasca-cut); 1,580 dan 1,931 mm (pasca-cut + beban); dan FK menurun menjadi 1,206 dengan deformasi 37 mm saat gempa. Hasil ini menunjukkan bahwa terasering efektif mengatasi infiltrasi dan beban statis, namun kerentanan Lereng Eksisting 2 terhadap beban dinamis mengindikasikan perlunya struktur penahan tanah tambahan sebagai mitigasi terhadap pengaruh gempa.

Kata kunci: stabilitas lereng, faktor keamanan, deformasi, galian, infiltrasi hujan

1. Pendahuluan

Pertumbuhan penduduk di Kota Manado mendorong pembangunan kawasan perumahan baru ke wilayah perbukitan yang memiliki karakteristik lereng alami. Perubahan tata guna lahan dari area hijau bervegetasi menjadi kawasan permukiman memberikan dampak langsung terhadap kestabilan lereng. Hilangnya vegetasi meningkatkan infiltrasi air hujan ke dalam tanah, sementara aktivitas konstruksi menambah beban statis di bagian atas lereng. Kombinasi kedua faktor tersebut berpotensi memicu kelongsoran tanah yang dapat mengancam keamanan lingkungan permukiman.

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh pemotongan lereng (*cutting*), penambahan beban struktural perumahan, dan infiltrasi curah hujan (*transient seepage*) terhadap tingkat kestabilan lereng pada kawasan perumahan di Kota Manado. Analisis dilakukan secara komprehensif dengan membandingkan nilai Faktor Keamanan (FK) yang dihasilkan dari dua pendekatan numerik, yaitu Limit Equilibrium Method (LEM) menggunakan *GeoStudio* dan Finite Element Method (FEM) menggunakan *PLAXIS 2D*.

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh perubahan tata guna lahan—yang direpresentasikan melalui rekayasa geometri (*cutting*), penambahan beban struktural perumahan, dan infiltrasi curah hujan (*transient seepage*)—terhadap tingkat kestabilan lereng berdasarkan nilai Faktor Keamanan (FK)?

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada kawasan perumahan di Kota Manado, yang secara topografis didominasi oleh area perbukitan dengan kemiringan lereng bervariasi. Kondisi tersebut menjadikan wilayah ini relevan untuk dianalisis dari perspektif stabilitas lereng, terutama setelah terjadi perubahan tata guna lahan akibat pembangunan permukiman.

2.1. Data Penelitian

Data utama yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari dokumen teknis penyelidikan tanah tahun 2022. Data tersebut mencakup hasil Standard Penetration Test (SPT) pada dua titik pengujian untuk mengidentifikasi jenis lapisan tanah serta parameter geoteknik seperti kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), dan berat isi tanah (γ).

Data hidrologi berupa curah hujan diperoleh dari Stasiun Pengamatan Hujan Tinoor, yang digunakan untuk memodelkan infiltrasi air hujan dalam analisis *transient seepage*. Sementara itu, data beban gempa ditentukan berdasarkan ketentuan SNI 1726:2019 sebagai acuan penentuan percepatan gempa rencana.

2.2. Pendekatan Analisis

Analisis kestabilan lereng dilakukan menggunakan dua pendekatan numerik yang saling melengkapi:

- Limit Equilibrium Method (LEM) Pendekatan ini dilakukan menggunakan perangkat lunak GeoStudio, khususnya modul SLOPE/W untuk analisis stabilitas dan SEEP/W untuk analisis aliran air tanah. Dua metode LEM digunakan, yaitu Bishop Simplified dan Morgenstern-Price, untuk memperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) pada berbagai kondisi: statis, infiltrasi, beban struktural, muka air tanah, dan beban gempa.
- Finite Element Method (FEM) Analisis FEM dilakukan menggunakan PLAXIS 2D untuk memvalidasi nilai FK dari LEM sekaligus mengevaluasi deformasi tanah akibat pemotongan lereng, pembebanan, dan gempa. Pendekatan ini memberikan gambaran perilaku regangan dan pergerakan massa tanah secara lebih detail.

2.3. Kriteria Evaluasi Stabilitas

Penilaian keamanan lereng mengacu pada standar SNI 8460:2017, yaitu:

- $FK > 1,5$ untuk kondisi statis (beban diam dan infiltrasi hujan),
- $FK > 1,1$ untuk kondisi dinamis (beban gempa).

Kriteria ini digunakan sebagai dasar untuk menentukan apakah kondisi lereng pada setiap skenario analisis berada dalam keadaan aman atau memerlukan intervensi rekayasa tambahan.

Tabel 1. Kriteria Angka Faktor Keamanan Minimum Lereng

Biaya dan konsekuensi dari kegagalan lereng	Tingkat ketidakpastian kondisi analisis	
	Rendah ^a	Tinggi ^b
Biaya perbaikan sebanding dengan biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,25	1,5
Biaya perbaikan lebih besar dari biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,5	2,0 atau lebih
^a Tingkat ketidakpastian kondisi analisis dikategorikan rendah, jika kondisi geologi dapat dipahami, kondisi tanah seragam, penyelidikan tanah konsisten, lengkap dan logis terhadap kondisi di lapangan.		
^b Tingkat ketidakpastian kondisi analisis dikategorikan tinggi, jika kondisi geologi sangat kompleks, kondisi tanah bervariasi, dan penyelidikan tanah tidak konsisten dan tidak dapat diandalkan.		

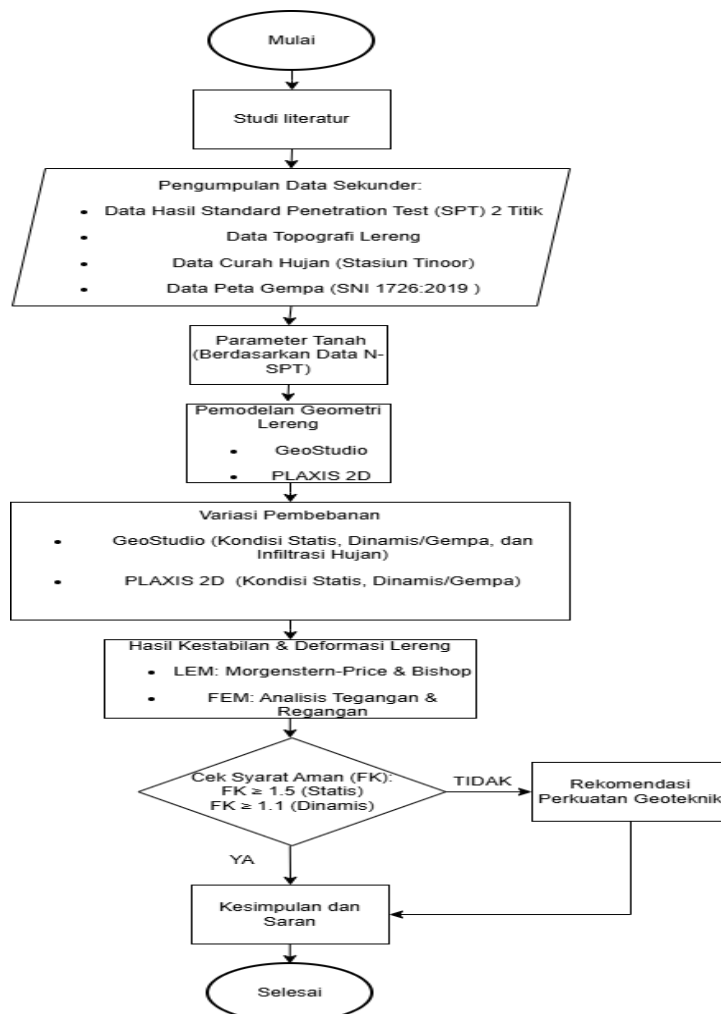
(Sumber: SNI 8470:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik)

2.4. Visualisasi Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian divisualisasikan menggunakan citra Google Earth Pro (2025) untuk menunjukkan kondisi aktual topografi dan kontur lahan. Informasi kontur tersebut menjadi elemen penting dalam pemodelan geometri lereng pada analisis LEM dan FEM.



Gambar 1. Lokasi Lereng
(Sumber: Google Earth Pro 2025)



Gambar 2. Alur Analisis Kestabilan Lereng

3. Hasil dan Pembahasan

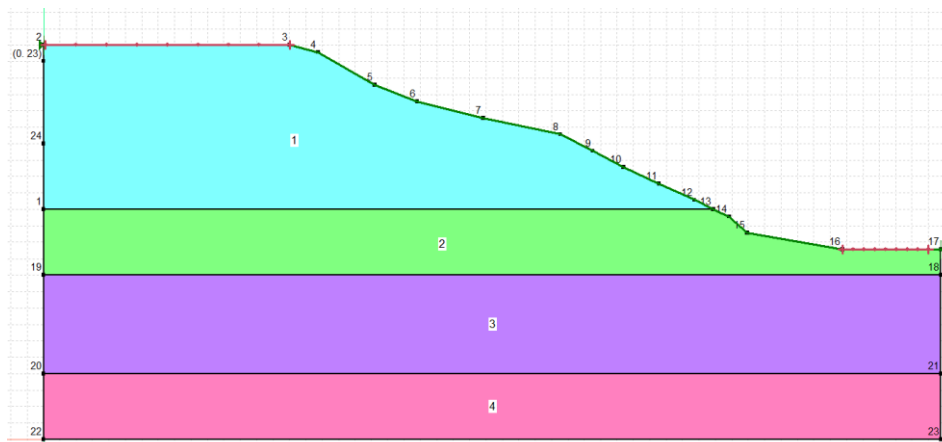
3.1. Korelasi Data SPT

Berdasarkan hasil interpretasi uji Standard Penetration Test (SPT), tanah pada lokasi penelitian di kawasan perumahan Kota Manado didominasi oleh lanau (silt) dan lanau berkerikil (gravelly silt). Kedua jenis tanah ini memiliki karakteristik kepekaan terhadap perubahan kadar air, sehingga penting untuk dianalisis dalam konteks kestabilan lereng, terutama pada area yang mengalami modifikasi geometri.

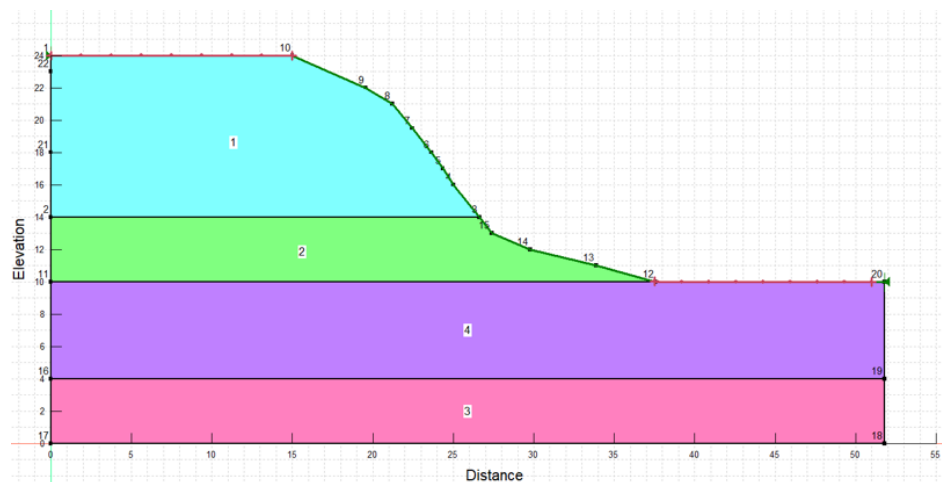
Analisis dilakukan pada dua titik lereng eksisting, masing-masing mewakili kondisi topografi yang berbeda. Setiap titik dianalisis dalam dua skenario utama, yaitu kondisi alami dan kondisi setelah rekayasa geometri (*cut*). Pendekatan ini memungkinkan evaluasi komparatif terhadap pengaruh pemotongan lereng terhadap nilai Faktor Keamanan (FK) serta respons deformasi tanah pada berbagai kondisi pembebanan dan hidrologi.

Tabel 2. Parameter Tanah yang digunakan dalam Analisis Kestabilan Lereng

DEPTH	SOIL DESCRIPTION			c_u	c'	γ	(ϕ)	N SPT	E_s	V
	Soil type	Colour	Consistency							
				kN/m ²	kN/m ²	kN/m ³	°		kN/m ²	
0-10 m	SILT	GRAY	NON PLASTIC	140	14	20.30	28.00	28.00	10200	0.35
10-14 m	CLAYEY GRAVELY SILT	GRAY	PLASTIC, NON PLASTIC	265	26.5	23.43	38.01	53.00	17700	0.35
14-20 m	SILT	GRAY	NON PLASTIC	275	27.5	23.68	38.45	55.00	18300	0.35
20-24 m	SILT	GRAY	NON PLASTIC	275	27.5	23.68	38.45	55.00	18300	0.35



Gambar 3. Geometri Lereng 1 (sebelum Perubahan Tata Guna Lahan)



Gambar 4. Geometri Lereng 2 (sebelum Perubahan Tata Guna Lahan)

3.2. Kestabilan Lereng dengan Metode Keseimbangan Batas (LEM)

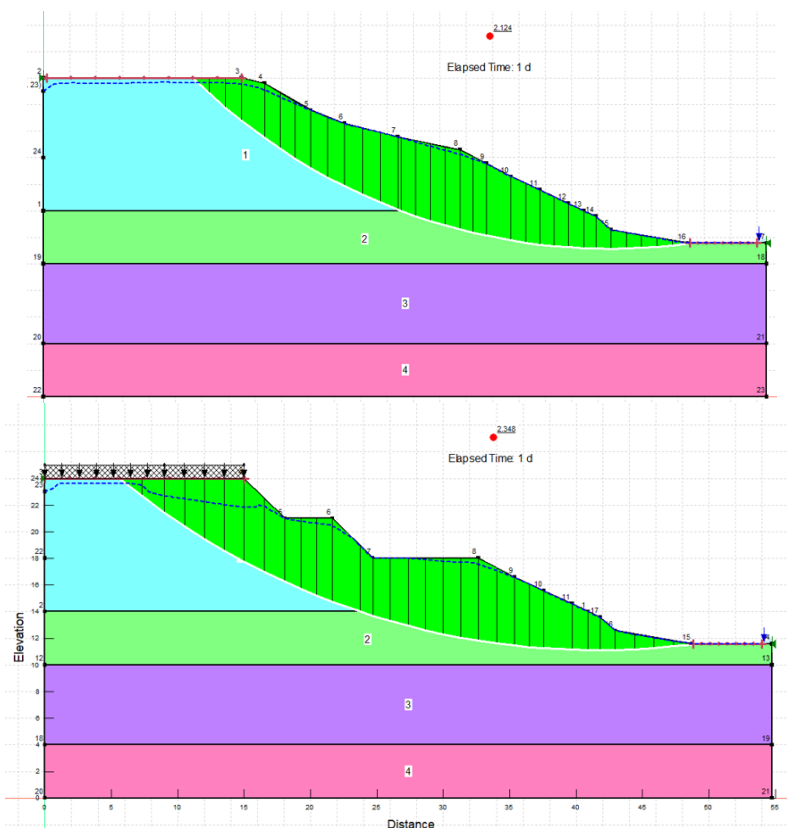
Analisis kestabilan lereng pada penelitian ini dilakukan dengan membandingkan dua kondisi utama, yaitu lereng dalam keadaan alami dan lereng setelah mengalami rekayasa geometri berupa pemotongan atau terasering. Perubahan tata guna lahan dari area hijau bervegetasi menjadi kawasan permukiman menyebabkan hilangnya penutup tanah alami, peningkatan infiltrasi air hujan, serta penambahan beban struktural dari pembangunan perumahan. Kondisi ini menjadikan evaluasi komparatif antara lereng alami dan lereng yang telah direkayasa menjadi penting untuk menilai efektivitas upaya stabilisasi.

Pendekatan analisis dilakukan menggunakan dua metode dalam Limit Equilibrium Method (LEM), yaitu metode Bishop Simplified dan metode Morgenstern-Price. Kedua metode ini digunakan untuk menghitung Faktor Keamanan (FK) pada berbagai skenario pembebanan dan kondisi hidrologi, termasuk pengaruh infiltrasi hujan dan beban struktural akibat pembangunan perumahan.

Rekapitulasi nilai FK untuk seluruh skenario analisis disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4, yang memuat perbandingan antara kondisi alami dan kondisi setelah rekayasa geometri, serta perbedaan nilai FK yang dihasilkan oleh kedua metode LEM. Penyajian ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai dampak perubahan tata guna lahan dan efektivitas rekayasa geometri dalam meningkatkan kestabilan lereng pada kawasan perumahan.

Tabel 3. Faktor Keamanan pada Lereng 1

Fase Geometri	Skenario Pemodelan	FK Bishop	FK Morgenstern-Price	SF Izin
Sebelum Cut	Lereng Alami (ESA)	3.111	3.13	1.5
	+ Infiltrasi (1,4 Jam)	2.138	2.16	1.5
Pasca Cut	Lereng Alami	3.39	3.409	1.5
	+ Beban Perumahan	3.356	3.376	1.5
	+ Beban + MAT 1 m	2.289	2.31	1.5
	+ Infiltrasi (8 Jam)	2.310	2.331	1.5
	+ Beban + Infiltrasi (8 Jam)	2.287	2.308	1.5
Dinamis	+ Beban + MAT 1 m + Gempa	1.196	1.229	1.1



Gambar 5. Faktor Keamanan Lereng 1 sebelum Perubahan Tata Guna Lahan (atas) dan sesudah Perubahan Tata Guna Lahan pada Penambahan Beban Perumahan dengan Infiltrasi Hujan (bawah)

Hasil analisis kestabilan Lereng 1 menunjukkan bahwa variasi nilai Faktor Keamanan (FK) pada setiap skenario sangat dipengaruhi oleh karakteristik tanah pada lokasi lereng. Berdasarkan data sifat tanah, lapisan tanah didominasi oleh lanau (silt) dan lanau berkerikil (*gravelly silt*) dengan nilai kohesi (c) berkisar antara 140–275 kPa dan sudut geser dalam (ϕ) antara 28° – 38° . Nilai kohesi yang relatif tinggi pada lapisan lanau berkerikil ($c \approx 265$ – 275 kPa) serta sudut geser dalam yang mencapai 38° – $38,45^\circ$ memberikan kontribusi besar terhadap tingginya FK pada kondisi alami, baik sebelum maupun setelah pemotongan lereng. Hal ini tercermin dari nilai FK awal yang berada pada kisaran 3,11–3,13 sebelum cut dan meningkat menjadi 3,39–3,41 setelah cut, menunjukkan bahwa geometri baru semakin memanfaatkan kekuatan geser tanah yang tersedia.

Penurunan FK pada skenario infiltrasi dan kenaikan muka air tanah berkaitan erat dengan sifat lanau yang sensitif terhadap perubahan tekanan air pori. Tanah lanau memiliki struktur butiran halus yang mudah mengalami peningkatan tekanan air pori saat jenuh, sehingga kekuatan geser efektif (c' dan ϕ') menurun. Hal ini menjelaskan mengapa infiltrasi 1,4 jam menurunkan FK dari sekitar 3,11 menjadi 2,14–2,16, dan infiltrasi 8 jam pada kondisi pasca cut menghasilkan FK sekitar 2,31–2,33. Penurunan ini konsisten dengan karakteristik lanau yang memiliki nilai kohesi efektif (c') lebih rendah, yaitu 14–27,5 kPa, sehingga ketika tanah dalam kondisi jenuh, kontribusi kohesi terhadap kekuatan geser berkurang secara signifikan.

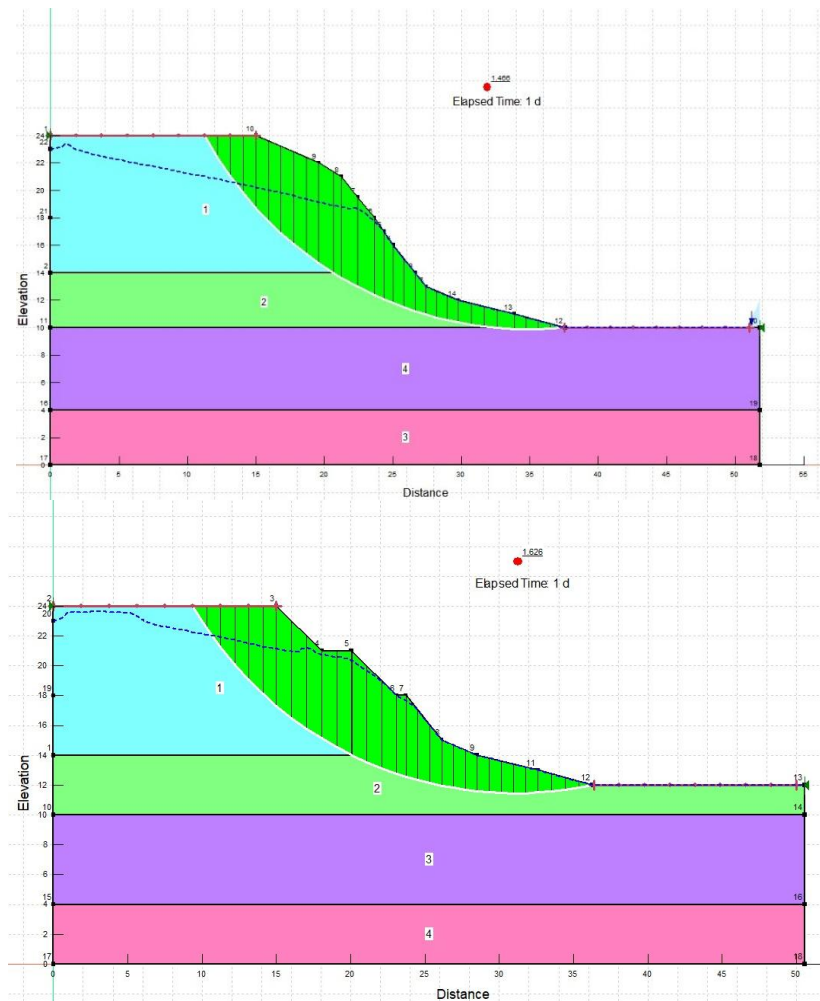
Skenario pembebanan perumahan tidak menurunkan FK secara drastis karena tanah lanau berkerikil pada kedalaman 10–24 m memiliki nilai N-SPT tinggi (53–55) dan modulus elastisitas (E_s) yang besar (17.700–18.300 kPa). Parameter ini menunjukkan bahwa lapisan tanah tersebut cukup kaku dan mampu menahan beban tambahan tanpa mengalami deformasi besar. Oleh karena itu, penambahan beban perumahan hanya sedikit menurunkan FK yakni dari 3,39 menjadi 3,35, masih jauh di atas batas aman.

Pada skenario dinamis, nilai FK turun menjadi 1,20–1,23. Penurunan ini dapat dijelaskan oleh sifat lanau yang memiliki rasio Poisson ($\nu = 0,35$) relatif tinggi, yang menunjukkan kecenderungan tanah untuk mengalami deformasi lateral saat diberi beban dinamis. Selain itu, sudut geser dalam yang efektif (ϕ') pada kondisi jenuh menjadi lebih rendah, sehingga kekuatan geser tanah berkurang secara signifikan saat gempa. Kombinasi beban struktural, kenaikan muka air tanah, dan percepatan gempa menyebabkan FK mendekati batas aman dinamis (1,1), menjadikan skenario ini sebagai kondisi paling kritis bagi Lereng 1.

Secara keseluruhan, tingginya FK pada kondisi alami dan pasca cut dipengaruhi oleh kohesi tinggi, sudut geser dalam besar, serta nilai N-SPT yang menunjukkan tanah cukup padat dan kaku. Penurunan FK pada kondisi infiltrasi dan gempa mencerminkan sensitivitas tanah lanau terhadap perubahan tekanan air pori dan beban dinamis. Dengan demikian, karakteristik tanah pada lokasi perumahan memainkan peran penting dalam menentukan stabilitas lereng pada setiap skenario pemodelan.

Tabel 4. Faktor Keamanan pada Lereng 2

Fase Geometri	Skenario Pemodelan	FK Bishop	FK Morgenstern-Price	SF Izin
Sebelum Cut	Lereng Alami (ESA)	1.929	1.951	1.5
	+ Infiltrasi (48 Menit)	1.425	1.448	1.5
Pasca Cut	Lereng Alami	2.274	2.299	1.5
	+ Beban Perumahan	2.25	2.276	1.5
	+ Beban + MAT 1 m	1.617	1.648	1.5
	+ Infiltrasi (8 Jam)	1.596	1.625	1.5
	+ Beban + Infiltrasi (8 Jam)	1.586	1.616	1.5
Dinamis	+ Beban + MAT 1 m + Gempa	1.016	1.057	1.1



Gambar 6. Faktor Keamanan Lereng 2 sebelum Perubahan Tata Guna Lahan (atas) dan sesudah Perubahan Tata Guna Lahan pada Penambahan Beban Perumahan dengan Infiltrasi Hujan (bawah)

Hasil analisis kestabilan Lereng 2 menunjukkan bahwa kondisi lereng ini jauh lebih sensitif terhadap perubahan hidrologi dan pembebanan dibanding Lereng 1. Pada fase sebelum pemotongan (cut), lereng alami memiliki FK sebesar 1,93–1,95, hanya sedikit di atas batas aman SNI 8460:2017 untuk kondisi statis ($FK \geq 1,5$). Nilai ini mengindikasikan bahwa Lereng 2 berada pada kondisi stabil namun dengan margin keamanan yang tipis, sehingga perubahan kecil pada tekanan air pori dapat langsung menurunkan stabilitas. Hal ini terbukti pada skenario infiltrasi 48 menit, di mana FK turun menjadi 1,43–1,45. Penurunan ini cukup signifikan dan menunjukkan bahwa tanah pada Lereng 2 memiliki respons hidrologi yang kuat, kemungkinan dipengaruhi oleh dominasi lanau dan lanau berkerikil yang mudah mengalami peningkatan tekanan air pori saat jenuh.

Setelah memasuki fase pasca *cutting*, stabilitas lereng meningkat dengan FK mencapai 2,27–2,30 pada kondisi alami. Rekayasa geometri melalui pemotongan lereng berhasil memperbaiki konfigurasi lereng sehingga bidang gelincir menjadi lebih stabil. Namun, ketika beban perumahan ditambahkan, FK sedikit menurun menjadi 2,25–2,28, meskipun masih berada dalam kategori aman. Penurunan yang lebih besar terjadi pada skenario beban + kenaikan muka air tanah (MAT) 1 m, di mana FK turun menjadi 1,62–1,65. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan hidrologi tetap menjadi faktor paling kritis bagi Lereng 2, bahkan setelah rekayasa geometri dilakukan.

Skenario infiltrasi 8 jam menghasilkan FK sebesar 1,60–1,63, menunjukkan bahwa infiltrasi jangka panjang memberikan dampak yang hampir sama dengan kenaikan MAT. Ketika beban perumahan dikombinasikan dengan infiltrasi, FK turun sedikit lagi menjadi 1,59–1,62. Meskipun nilai ini masih memenuhi batas aman statis, margin keamanannya sangat tipis dan menunjukkan bahwa Lereng 2 tetap rentan terhadap kondisi jenuh.

Skenario dinamis merupakan kondisi paling kritis bagi Lereng 2. Kombinasi beban perumahan, kenaikan MAT 1 m, dan gempa menyebabkan FK turun drastis menjadi 1,02–1,06,

berada di bawah atau sangat dekat dengan batas aman dinamis ($FK \geq 1,1$). Nilai ini menunjukkan bahwa Lereng 2 tidak stabil atau hampir tidak stabil saat terjadi gempa, sehingga berpotensi mengalami deformasi besar atau kelongsoran. Secara keseluruhan, Lereng 2 memiliki stabilitas yang lebih rendah dibanding Lereng 1, sangat dipengaruhi oleh kondisi hidrologi dan beban dinamis, serta memerlukan intervensi rekayasa tambahan seperti struktur penahan tanah atau perbaikan drainase lereng untuk meningkatkan keamanan jangka panjang.

3.3. Kestabilan Lereng dengan Metode Numerik

Analisis kestabilan lereng menggunakan metode numerik memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai perilaku lereng dibandingkan analisis berbasis Limit Equilibrium Method (LEM). Melalui pemodelan numerik seperti FEM, kondisi lereng dapat dievaluasi tidak hanya dari nilai Faktor Keamanan (FK), tetapi juga dari distribusi tegangan, deformasi, dan perubahan tekanan air pori yang terjadi akibat pemotongan lereng, infiltrasi, kenaikan muka air tanah, maupun beban gempa. Berikut ini adalah faktor keamanan lereng berdasarkan analisis numerik menggunakan PLAXIS 2D yang dibandingkan dengan nilai faktor keamanan hasil analisis LEM.

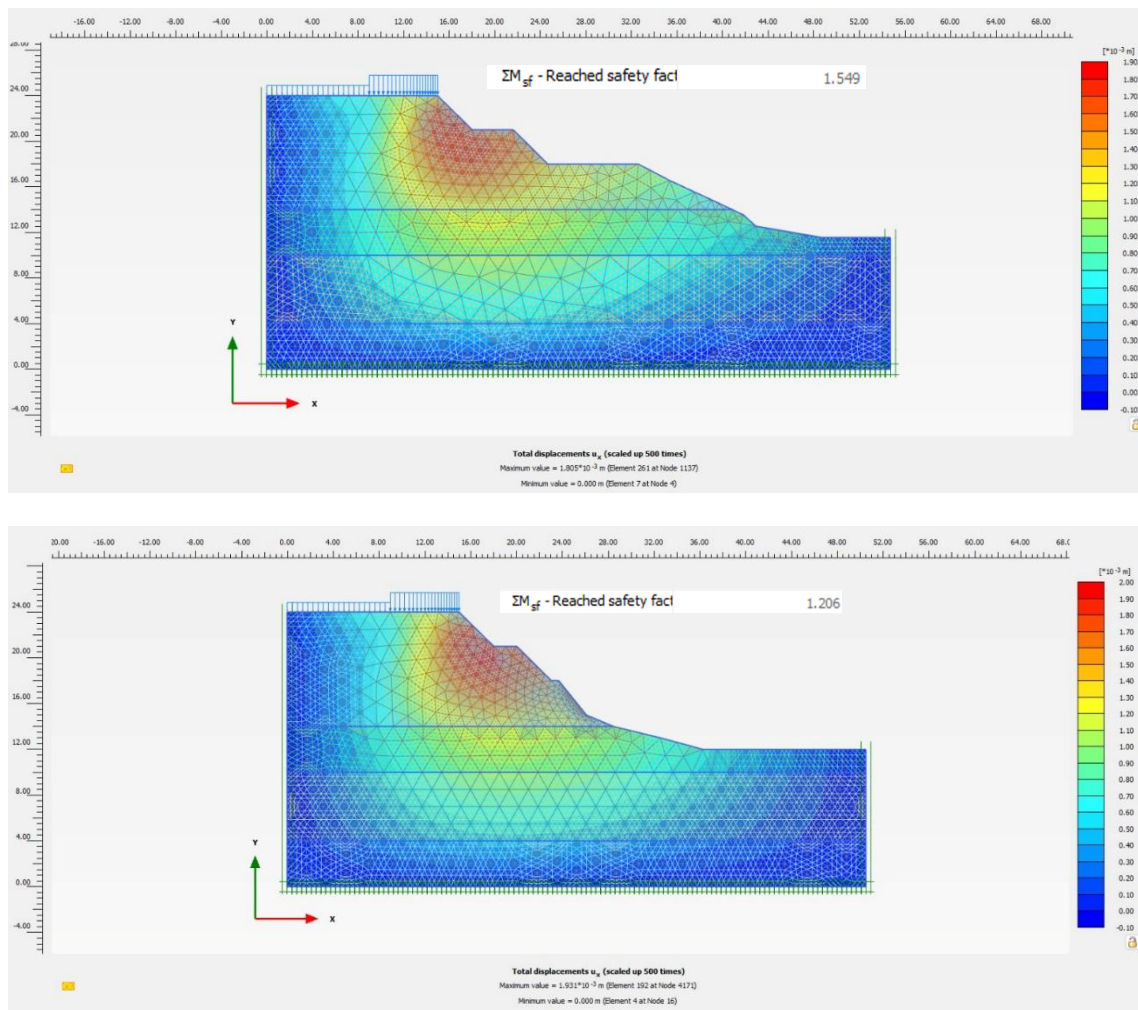
Tabel 5. Perbandingan Faktor Keamanan pada Lereng 1 dan Lereng 2 berdasarkan Analisis Numerik dan Analisis LEM

Skenario Pemodelan	PLAXIS 2D (FEM)	GeoStudio (Bishop)	GeoStudio (Morgenstern-Price)
Eksisting 1 - Alami	2.388	3.111	3.13
Eksisting 1 - Pasca Cut	2.251	3.39	3.409
Eksisting 1 - Cut + Beban	2.129	3.356	3.376
Eksisting 2 - Alami	1.428	1.929	1.951
Eksisting 2 - Pasca Cut	1.633	2.274	2.299
Eksisting 2 - Cut + Beban	1.58	2.25	2.276

Pada Lereng 1, hasil LEM menunjukkan FK yang sangat tinggi pada seluruh kondisi statis, yaitu di atas 3 untuk kondisi alami dan pasca cut. Namun, PLAXIS 2D memberikan FK yang lebih rendah, yaitu 2,388 pada kondisi alami dan 2,251 setelah cut. Perbedaan ini menunjukkan bahwa meskipun lereng secara geometri tampak stabil, FEM menangkap adanya deformasi kecil yang mengurangi margin keamanan. Pada kondisi cut + beban, LEM masih menunjukkan $FK > 3$, sedangkan PLAXIS menurunkannya menjadi 2,129. Hal ini mengindikasikan bahwa beban struktural memberikan pengaruh deformasi yang lebih besar daripada yang diprediksi oleh LEM. Meskipun demikian, kedua metode sepakat bahwa Lereng 1 tetap berada dalam kondisi aman pada seluruh skenario statis.

Pada Lereng 2, perbedaan antara FEM dan LEM menjadi lebih mencolok. Pada kondisi alami, LEM menghasilkan FK sekitar 1,93–1,95, sedangkan PLAXIS hanya memberikan FK 1,428. Nilai ini menunjukkan bahwa Lereng 2 memiliki stabilitas yang lebih rendah dan lebih sensitif terhadap perubahan hidrologi dan pembebanan. Setelah pemotongan lereng, LEM menunjukkan peningkatan FK menjadi sekitar 2,27–2,30, sementara PLAXIS hanya meningkat menjadi 1,633. Perbedaan ini menegaskan bahwa meskipun rekayasa geometri meningkatkan stabilitas secara teoritis (LEM), deformasi tanah yang ditangkap oleh FEM tetap membatasi peningkatan FK. Pada kondisi cut + beban, LEM memberikan FK sekitar 2,25–2,28, tetapi PLAXIS hanya menunjukkan FK 1,58, mendekati batas aman statis. Ini menunjukkan bahwa Lereng 2 memiliki respons deformasi yang lebih besar terhadap beban struktural dibanding Lereng 1.

Secara keseluruhan, hasil PLAXIS 2D memperlihatkan bahwa analisis numerik memberikan evaluasi yang lebih konservatif dan realistis, terutama pada lereng dengan karakteristik tanah lanau yang sensitif terhadap tekanan air pori dan deformasi. LEM tetap berguna sebagai metode awal untuk menilai stabilitas, tetapi FEM memberikan pemahaman lebih mendalam mengenai perilaku lereng, terutama pada kondisi pembebanan dan geometri yang kompleks. Perbandingan kedua metode ini menunjukkan bahwa Lereng 1 memiliki stabilitas yang lebih baik, sedangkan Lereng 2 memerlukan perhatian khusus dan kemungkinan intervensi rekayasa tambahan untuk menjamin keamanan jangka panjang.



Gambar 7. Faktor Keamanan Lereng 1 (atas) dan Lereng 2 (bawah) berdasarkan Analisis Numerik pada Skenario Pasca Cutting dengan Beban Konstruksi pada Puncak Lereng

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kestabilan lereng akibat perubahan tata guna lahan pada kawasan perumahan di Kota Manado, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh perubahan tata guna lahan terhadap kestabilan lereng Perubahan tata guna lahan dari area bervegetasi menjadi kawasan permukiman terbukti menurunkan stabilitas lereng, terutama akibat hilangnya vegetasi, peningkatan infiltrasi air hujan, dan penambahan beban struktural di bagian atas lereng. Lereng Eksisting 1 tetap stabil pada seluruh skenario, dengan FK statis terendah 2,138 dan FK dinamis 1,196, sehingga masih memenuhi kriteria SNI 8460:2017. Sebaliknya, Lereng Eksisting 2 menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap perubahan hidrologi; infiltrasi hujan selama 48 menit menurunkan FK menjadi 1,425 ($<1,5$), dan pada kondisi dinamis FK turun menjadi 1,016 ($<1,1$). Hal ini menunjukkan bahwa perubahan tata guna lahan memberikan dampak signifikan terutama pada lereng dengan karakteristik tanah lanau yang mudah jenuh dan mengalami peningkatan tekanan air pori.
2. Perbandingan hasil analisis kestabilan lereng antara GeoStudio (LEM) dan PLAXIS 2D (FEM) Analisis LEM menghasilkan nilai FK yang lebih tinggi dibandingkan analisis numerik FEM. Pada Lereng 1, LEM memberikan FK > 3 pada seluruh skenario statis, sedangkan FEM memberikan FK 2,388 (alami) dan 2,251 (pasca cut). Pada Lereng 2, LEM memberikan FK 1,93–1,95 pada kondisi alami, sedangkan FEM hanya menghasilkan FK 1,428. Perbedaan ini menunjukkan bahwa FEM memberikan evaluasi yang lebih konservatif karena mempertimbangkan deformasi, redistribusi tegangan, dan perubahan tekanan air pori secara kontinu. Meskipun demikian, kedua metode menunjukkan tren yang sama: Lereng 1 stabil pada seluruh skenario, sedangkan Lereng 2 rentan terhadap infiltrasi dan beban dinamis.
3. Perbedaan nilai FK antara metode Rigorous (Morgenstern-Price) dan Simplified (Bishop)

Perbandingan antara metode Bishop dan Morgenstern-Price menunjukkan bahwa kedua metode menghasilkan nilai FK yang sangat berdekatan, dengan selisih rata-rata $< 0,03$ pada seluruh skenario. Hal ini menunjukkan bahwa kedua metode konsisten dalam memprediksi stabilitas lereng, dan perbedaan pendekatan matematis tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap hasil. Dengan demikian, baik metode Rigorous maupun Simplified dapat digunakan secara efektif untuk analisis kestabilan lereng pada kondisi tanah lanau seperti di lokasi penelitian.

4. Efektivitas rekayasa geometri (cutting) dalam meningkatkan stabilitas lereng Pemotongan lereng terbukti meningkatkan stabilitas pada kedua lereng, terutama Lereng Eksisting 2 yang mengalami peningkatan FK dari 1,93 menjadi 2,27 pada kondisi alami pasca cut. Namun, rekayasa geometri ini tidak cukup untuk mengatasi pengaruh beban dinamis gempa, terutama pada Lereng 2 yang memiliki FK dinamis hanya 1,016. Oleh karena itu, diperlukan intervensi tambahan seperti struktur penahan tanah, perbaikan drainase, atau sistem pengendalian muka air tanah untuk meningkatkan keamanan lereng pada kondisi gempa.

Referensi

- Badan Standardisasi Nasional. (2017). SNI 8460:2017: Persyaratan Perancangan Geoteknik. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 1726:2019: Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. Jakarta: BSN.
- Duncan, J. Michael, Stephen G. Wright, dan Thomas L. Brandon. (2014). Soil Strength and Slope Stability. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Das. Braja M. (1998). Mekanika Tanah – Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis Jilid 2. Jakarta: Erlangga.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, Inc.
- Huang, Yang H. (2014). Slope Stability Analysis by the Limit Equilibrium Method. Reston: American Society of Civil Engineers.