



Analisis Probabilitas Kestabilan Lereng Galian Pada Kawasan Penambangan Nikel Di Provinsi Sulawesi Selatan

Velin A. Ranni^{#a}, Roski R. I. Legrans^{#b}, Agnes T. Mandagi^{#c}

^{#Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia}
^avelinranni021@student.unsrat.ac.id, ^blegransroski@unsrat.ac.id, ^cagnes.mandagi@unsrat.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kestabilan lereng di Provinsi Sulawesi Selatan melalui pendekatan deterministik dan probabilistik, dengan menggunakan parameter faktor keamanan (FK) dan probabilitas kelongsoran (PK) sebagai dasar penilaian. Analisis dilakukan pada variasi sudut lereng 55°, 60°, 65°, 70°, 75°, dan 80° dengan tinggi bench 7 meter, serta dua alternatif lebar berm, yaitu 6 meter dan 3 meter. Metode analisis yang digunakan adalah Morgenstern-Price dan Bishop Simplified, baik pada kondisi statis maupun dinamis, dengan tinjauan terhadap tegangan efektif dan tegangan total. Hasil analisis menunjukkan bahwa metode Morgenstern-Price menghasilkan nilai FK antara 1,45–5,40 pada berm 6 meter dan 1,44–6,13 pada berm 3 meter, sedangkan metode Bishop Simplified menghasilkan nilai FK antara 1,42–5,25 pada berm 6 meter dan 1,32–4,68 pada berm 3 meter. Secara deterministik, seluruh skenario memenuhi kriteria aman karena nilai $FK > 1$. Namun, hasil probabilistik memperlihatkan bahwa nilai PK pada berm 6 meter berada pada rentang 0%–75%, sedangkan pada berm 3 meter berada pada rentang 0%–32%. Temuan ini menegaskan bahwa penilaian kestabilan lereng tidak dapat hanya didasarkan pada FK, karena beberapa skenario dengan analisis tegangan efektif masih menunjukkan risiko kegagalan yang tinggi meskipun tergolong aman secara deterministik. Sebaliknya, sebagian besar skenario dengan analisis tegangan total memperlihatkan nilai PK mendekati 0%. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa variasi sudut lereng, lebar berm, metode analisis, kondisi pembebanan, dan jenis analisis berpengaruh signifikan terhadap kestabilan lereng. Oleh karena itu, evaluasi desain lereng perlu mempertimbangkan FK dan PK secara simultan agar keputusan teknis yang diambil lebih andal dan mampu meminimalkan risiko kegagalan.

Kata kunci: studi pendahuluan, kestabilan lereng, faktor keamanan, probabilitas kelongsoran, analisis tegangan efektif, analisis tegangan total

1. Pendahuluan

Kestabilan lereng merupakan aspek fundamental dalam perencanaan dan pelaksanaan penambangan terbuka, khususnya pada tambang nikel yang berkembang pesat di Provinsi Sulawesi Selatan. Lereng galian yang tidak stabil berpotensi menimbulkan risiko keselamatan bagi pekerja tambang dan masyarakat sekitar, serta dapat menyebabkan kerusakan peralatan, infrastruktur, dan gangguan operasional yang berujung pada kerugian ekonomi yang signifikan (K-Mine, 2025). Secara umum, kajian kestabilan lereng juga menjadi bagian penting dalam perencanaan berbagai konstruksi sipil (Mandagi et al., 2023), sehingga evaluasi kondisi lereng tidak dapat diabaikan.

Lokasi penelitian berada di dalam kawasan perusahaan tambang nikel yang hingga saat ini belum mengalami aktivitas penambangan, sehingga kondisi lereng masih alami dan belum terpengaruh oleh gangguan mekanis akibat kegiatan eksploitasi. Keadaan ini memberikan peluang untuk melakukan evaluasi awal terhadap kestabilan lereng berdasarkan kondisi geologi asli. Namun, keterbatasan data tanah yang hanya mencakup pengujian sifat indeks tanpa parameter mekanik yang memadai menjadikan karakteristik fisik dan mekanik batuan sebagai dasar utama dalam analisis kestabilan.

Penelitian ini dilakukan sebagai kajian awal terhadap kestabilan lereng rencana

berdasarkan kondisi topografi dan parameter material yang tersedia. Geometri lereng dibentuk dari data topografi hasil pengolahan, sedangkan material dimodelkan ke dalam lapisan limonite, saprolite, dan bedrock sesuai kondisi umum endapan nikel laterit. Parameter material tersebut kemudian dianalisis untuk menilai kestabilan lereng rencana.

Berbagai studi sebelumnya menegaskan bahwa kestabilan lereng di tambang nikel sangat dipengaruhi oleh sifat fisik dan mekanik batuan serta geometri lereng yang diterapkan (Rumsowek & Birawaputra, 2019). Oleh karena itu, analisis dalam penelitian ini dilakukan dengan pendekatan deterministik dan probabilistik untuk memperoleh nilai faktor keamanan (FK) dan probabilitas kelongsoran (PK).

Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran awal mengenai kondisi kestabilan lereng rencana pada area penelitian. Dengan demikian, diperlukan studi yang komprehensif dan sistematis untuk mengevaluasi kondisi lereng alami di lokasi penelitian dengan memanfaatkan data hasil pengujian laboratorium serta dukungan literatur. Melalui pemahaman yang baik terhadap sifat batuan dan karakteristik lereng di lapangan, diharapkan dapat diperoleh gambaran yang lebih akurat mengenai potensi kestabilan lereng galian yang akan direncanakan di masa mendatang.

2. Metodologi Penelitian

2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini dikategorikan sebagai penelitian kuantitatif dengan fokus pada perancangan awal geometri lereng galian di kawasan tambang nikel Provinsi Sulawesi Selatan. Pendekatan yang digunakan merupakan kombinasi antara metode empiris dan metode numerik, sehingga hasil pengujian laboratorium dan data lapangan dijadikan dasar dalam penentuan parameter material lereng.

Parameter material yang diperoleh kemudian dimasukkan ke dalam model numerik menggunakan perangkat lunak Rocscience Slide, yang memungkinkan analisis kestabilan lereng pada berbagai variasi geometri. Analisis dilakukan untuk menghasilkan dua keluaran utama, yaitu Faktor Keamanan (FK) sebagai indikator deterministik dan Probabilitas Kegagalan (PK) sebagai indikator probabilistik.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menilai kestabilan lereng dari sudut pandang deterministik, tetapi juga memperhitungkan aspek probabilistik. Pendekatan simultan ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai tingkat kestabilan lereng galian tambang nikel, serta menjadi dasar evaluasi teknis dalam perencanaan desain lereng yang lebih andal.

Penelitian ini tergolong penelitian kuantitatif dengan fokus pada perancangan awal geometri lereng galian pada kawasan tambang nikel di Provinsi Sulawesi Selatan. Pendekatan yang digunakan menggabungkan metode empiris dan numerik, di mana data lapangan dan hasil pengujian laboratorium digunakan sebagai dasar dalam penentuan parameter material lereng. Parameter tersebut selanjutnya diinput ke dalam model numerik menggunakan aplikasi Rocscience Slide untuk menganalisis kestabilan lereng pada beberapa variasi geometri. Output yang diperoleh dari analisis ini berupa nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Kegagalan, yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat kestabilan lereng galian tambang nikel secara deterministik dan probabilistik.

2.2 Metode Analisis Kestabilan Lereng

Analisis kestabilan lereng dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak Rocscience Slide dengan pendekatan metode kesetimbangan batas (limit equilibrium method). Tujuan utama analisis adalah mengevaluasi kondisi kestabilan lereng berdasarkan parameter material yang diperoleh dari data lapangan dan hasil pengujian laboratorium. Pendekatan yang digunakan mencakup analisis deterministik dan probabilistik, baik pada kondisi statis maupun dinamis.

1. Metode Kesetimbangan Batas

- o Metode yang digunakan adalah Bishop Simplified dan Morgenstern-Price.
- o Kedua metode dipilih untuk mengevaluasi kestabilan lereng dengan pendekatan

perhitungan yang berbeda, sehingga memungkinkan perbandingan hasil analisis.

2. Parameter Material
 - Parameter yang dianalisis meliputi kohesi (c'), sudut geser dalam (ϕ'), berat isi alami (ρ_n), dan berat isi jenuh (ρ_s) untuk setiap lapisan material penyusun lereng.
 - Parameter ini menjadi input utama dalam model numerik untuk menilai respon lereng terhadap variasi geometri dan kondisi pembebanan.
3. Analisis Deterministik
 - Dilakukan dengan menggunakan nilai tetap (single value) untuk setiap parameter material.
 - Hasil analisis berupa Faktor Keamanan (FK) yang menunjukkan tingkat kestabilan lereng pada kondisi pembebanan tertentu.
4. Analisis Probabilistik
 - Digunakan untuk mempertimbangkan ketidakpastian parameter material.
 - Metode yang dipakai adalah simulasi Monte Carlo, dengan variasi parameter secara statistik berdasarkan nilai rata-rata dan tingkat variasi (Coefficient of Variation, COV) yang diadopsi dari literatur.
 - Parameter acak yang digunakan dalam simulasi adalah kohesi (c') dan sudut geser dalam (ϕ').
5. Output Analisis
 - Analisis deterministik menghasilkan nilai FK sebagai indikator keamanan lereng.
 - Analisis probabilistik menghasilkan nilai Probabilitas Kegagalan (PK) sebagai ukuran risiko kelongsoran.
 - Kedua hasil tersebut digunakan secara simultan untuk mengevaluasi tingkat kestabilan lereng pada kondisi statis dan dinamis.

2.3 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder, yang saling melengkapi untuk mendukung analisis kestabilan lereng.

1. Data Primer
 - Berupa hasil pengambilan sampel batuan di lapangan dan pengujian laboratorium.
 - Pengujian dilakukan untuk memperoleh sifat fisik dan mekanik material, khususnya parameter kohesi (c'), sudut geser dalam (ϕ'), berat isi alami (ρ_n), dan berat isi jenuh (ρ_s).
 - Data ini menjadi dasar utama dalam penentuan parameter material yang digunakan pada analisis numerik.
2. Data Sekunder
 - Meliputi data topografi hasil pengolahan peta dan survei lapangan, yang digunakan untuk membentuk geometri lereng rencana.
 - Data geometri lereng yang diperoleh dari kondisi aktual lokasi penelitian.
 - Data literatur yang digunakan untuk mendukung penentuan parameter material, termasuk nilai rata-rata dan variasi (Coefficient of Variation, COV) pada analisis probabilistik.

2.3.1 Data Geometri Lereng

Data geometri lereng dalam penelitian ini digunakan sebagai dasar pemodelan pada analisis kestabilan lereng galian. Geometri lereng disusun berdasarkan rancangan awal lereng pada kawasan penambangan nikel di Provinsi Sulawesi Selatan, dengan mempertimbangkan variasi sudut lereng dan lebar berm. Parameter geometri yang digunakan meliputi:

1. Sudut Lereng (Slope Angle)
 - Variasi sudut lereng yang dianalisis adalah 55° , 60° , 65° , 70° , 75° , dan 80° .
 - Variasi ini dipilih untuk mengevaluasi pengaruh perubahan sudut terhadap kestabilan lereng.
2. Tinggi Bench (Bench Height)
 - Tinggi bench yang digunakan adalah 7 meter, sesuai dengan rancangan awal geometri lereng.
 - Tinggi ini dianggap representatif untuk kondisi lapangan pada tambang nikel laterit.
3. Lebar Berm (Berm Width)
 - Dua alternatif lebar berm digunakan dalam analisis, yaitu 6 m dan 3 m.

- Perbedaan lebar berm dimaksudkan untuk menilai pengaruh geometri berm terhadap nilai faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran.
- 4. Lapisan material penyusun lereng dalam penelitian ini dimodelkan sesuai dengan kondisi umum endapan nikel laterit di Provinsi Sulawesi Selatan. Tiga lapisan utama yang digunakan sebagai input analisis adalah:
 1. Limonite
 - Merupakan lapisan paling atas dengan kandungan kadar air relatif tinggi.
 - Karakteristiknya cenderung lemah, plastis, dan mudah tererosi, sehingga berpengaruh besar terhadap kestabilan lereng bagian permukaan.
 2. Saprolite
 - Lapisan di bawah limonite, terbentuk dari pelapukan batuan ultrabasa.
 - Memiliki sifat lebih padat dibanding limonite, namun masih relatif kompresibel.
 - Lapisan ini sering menjadi target utama penambangan nikel karena kandungan mineralnya.
 3. Bedrock
 - Lapisan paling bawah yang terdiri dari batuan induk yang relatif keras dan memiliki daya dukung tinggi.
 - Bedrock berfungsi sebagai elemen penahan utama dalam sistem kestabilan lereng.

2.3.2 Data Batuan

Data batuan pada penelitian ini digunakan sebagai parameter masukan dalam analisis kestabilan lereng. Data yang digunakan meliputi hasil uji *Point Load Index* yang telah dikoreksi ($I_s(50)$), *natural density*, dan *saturated density* untuk masing-masing material penyusun lereng. Parameter batuan yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Limonite
 - *Point Load Index* terkoreksi, $I_s(50) = 0,5$ MPa
 - *Natural density* = $22,98$ kN/m³
 - *Saturated density* = $23,32$ kN/m³
- Saprolite
 - *Point Load Index* terkoreksi, $I_s(50) = 1,6$ MPa
 - *Natural density* = $27,02$ kN/m³
 - *Saturated density* = $27,07$ kN/m³
- Bedrock
 - *Point Load Index* terkoreksi, $I_s(50) = 4,8$ MPa
 - *Natural density* = $27,53$ kN/m³
 - *Saturated density* = $27,54$ kN/m³

2.3.3 Data Konversi Parameter

Nilai *Point Load Index* terkoreksi ($I_s(50)$) yang diperoleh dari hasil pengujian laboratorium selanjutnya digunakan untuk mengestimasi nilai kuat tekan uniaksial batuan utuh (σ_{ci}) melalui pendekatan empiris Thuro dan Plinninger (2001). Nilai σ_{ci} hasil estimasi tersebut kemudian digunakan sebagai salah satu parameter masukan dalam penentuan karakteristik massa batuan dengan pendekatan *Generalized Hoek-Brown*.

- Limonite: $I_s(50) = 0,5$ MPa; $\sigma_{ci} = 9,35$ MPa
- Saprolite: $I_s(50) = 1,6$ MPa; $\sigma_{ci} = 29,92$ MPa
- Bedrock: $I_s(50) = 4,8$ MPa; $\sigma_{ci} = 89,76$ MPa

2.3.4 Parameter Generalized Hoek-Brown

Parameter massa batuan pada penelitian ini ditentukan menggunakan pendekatan *Generalized Hoek-Brown*. Parameter yang digunakan meliputi kuat tekan uniaksial batuan utuh (σ_{ci}), nilai *Geological Strength Index* (GSI), konstanta material batuan utuh (m_i), dan *disturbance factor* (D) untuk setiap material penyusun lereng. Parameter masukan yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Limonite

- $\sigma_{ci} = 9,35$ MPa
- $GSI = 15$
- $m_i = 20$
- $D = 0,7$
- Sapolite
 - $\sigma_{ci} = 29,92$ MPa
 - $GSI = 25$
 - $m_i = 20$
 - $D = 0,7$
- Bedrock
 - $\sigma_{ci} = 89,76$ MPa
 - $GSI = 30$
 - $m_i = 20$
 - $D = 0,7$

2.3.5 Parameter Material Ekuivalen Mohr-Coulomb

Parameter massa batuan hasil pendekatan *Generalized Hoek-Brown* selanjutnya dikonversi menjadi parameter material ekuivalen *Mohr-Coulomb* untuk digunakan sebagai input pada analisis kestabilan lereng di Rocscience Slide. Parameter yang digunakan meliputi kohesi (c'), sudut geser dalam (φ'), *natural density* (ρ_n), dan *saturated density* (ρ_s) untuk setiap material penyusun lereng. Selanjutnya, analisis dilakukan secara deterministik dan probabilistik menggunakan Rocscience Slide, dengan nilai mean parameter diambil dari hasil konversi tersebut dan nilai COV diadopsi dari literatur sebagai representasi ketidakpastian parameter. Parameter material yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Limonite
 - $c' = 55$ kPa
 - $\varphi' = 21,42^\circ$
 - *Natural density* = 22,98 kN/m³
 - *Saturated density* = 23,32 kN/m³
- Sapolite
 - $c' = 147$ kPa
 - $\varphi' = 34,31^\circ$
 - *Natural density* = 27,02 kN/m³
 - *Saturated density* = 27,07 kN/m³
- Bedrock
 - $c' = 265$ kPa
 - $\varphi' = 45,19^\circ$
 - *Natural density* = 27,53 kN/m³
 - *Saturated density* = 27,54 kN/m³

3. Hasil dan Pembahasan

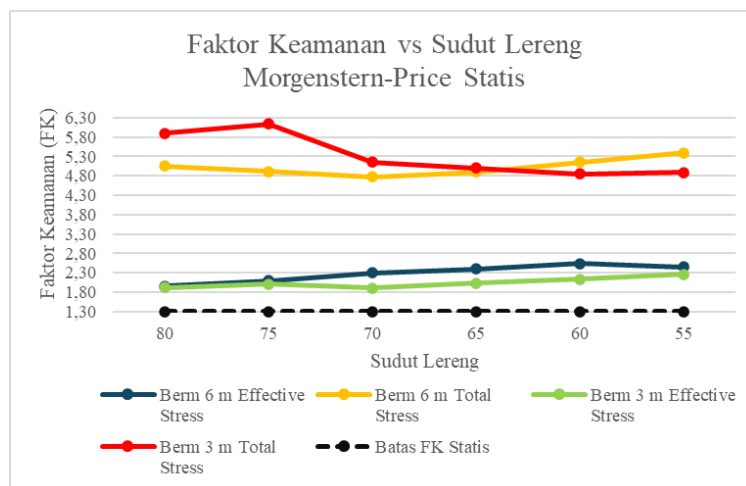
3.1 Hasil Analisis Deterministik (Metode Morgenstern-Price)

Analisis deterministik pada penelitian ini dilakukan untuk dua kondisi pembebanan, yaitu statis (tanpa beban gempa) dan dinamis (dengan beban gempa $k_h = 0,2307g$). Metode yang digunakan adalah Morgenstern-Price dengan tipe bidang longsor non-circular, yang diaplikasikan pada variasi geometri lereng dengan lebar berm 6 m dan 3 m, tinggi bench 7 m, serta sudut lereng 55° – 80° .

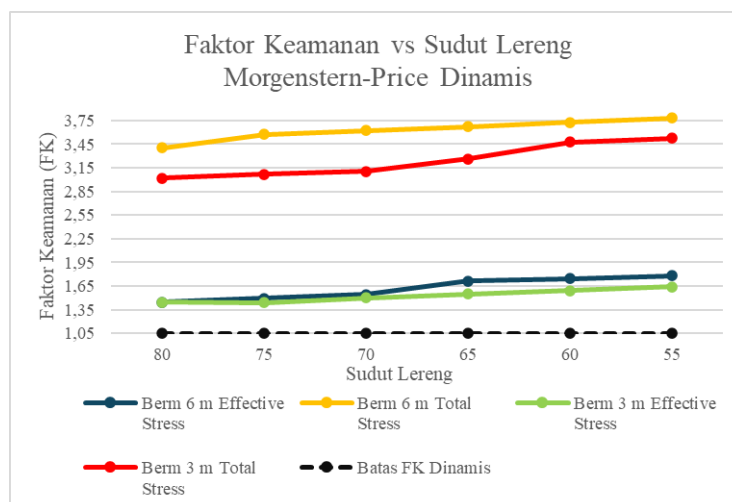
- Hasil Analisis pada Berm 6 m
 - Total Stress Analysis:
 - Kondisi statis: FK = 4,77–5,40
 - Kondisi dinamis: FK = 3,41–3,78
 - Effective Stress Analysis:
 - Kondisi statis: FK = 1,96–2,54
 - Kondisi dinamis: FK = 1,45–1,78

- Hasil Analisis pada Berm 3 m
 - Total Stress Analysis:
 - Kondisi statis: $FK = 4,85-6,13$
 - Kondisi dinamis: $FK = 3,02-3,53$
 - Effective Stress Analysis:
 - Kondisi statis: $FK = 1,91-2,26$
 - Kondisi dinamis: $FK = 1,44-1,64$
- Interpretasi Hasil
 - Secara umum, seluruh skenario memenuhi kriteria aman karena nilai $FK > 1,0$.
 - Total Stress Analysis secara konsisten menghasilkan nilai FK lebih tinggi dibandingkan Effective Stress Analysis, menunjukkan bahwa analisis dengan tegangan total cenderung lebih konservatif terhadap kestabilan.
 - Kondisi dinamis menurunkan nilai FK dibandingkan kondisi statis, sehingga beban gempa menjadi faktor kritis dalam desain lereng.
 - Peningkatan sudut lereng menyebabkan penurunan kestabilan, terutama pada analisis tegangan efektif dan kondisi dinamis. Kombinasi ini menjadi skenario paling kritis yang perlu diperhatikan dalam perencanaan.
- Visualisasi

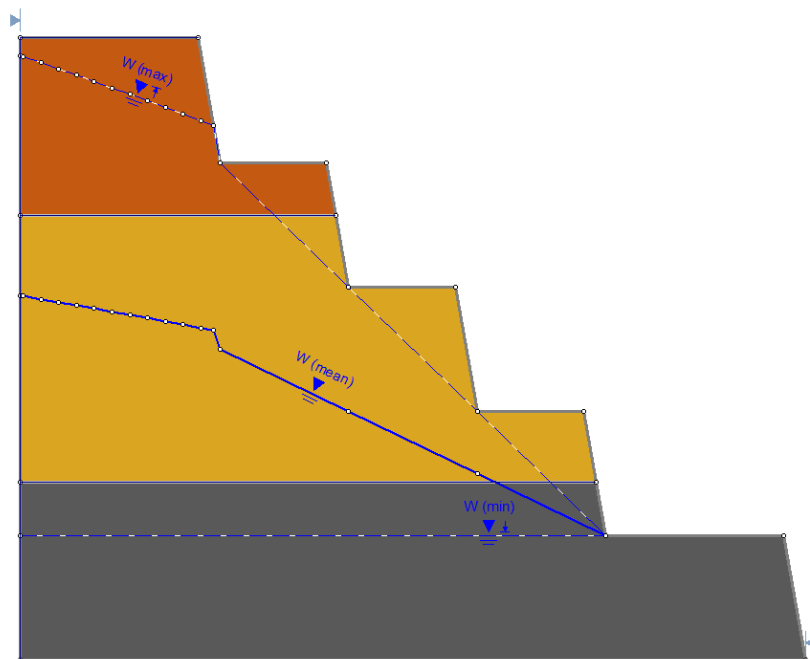
Untuk memperjelas pengaruh sudut lereng terhadap faktor keamanan, dibuat grafik hubungan antara FK Statis dan FK Dinamis dengan sudut lereng pada kedua variasi lebar berm. Grafik tersebut ditampilkan pada Gambar 2 (berm 6 m) dan Gambar 3 (berm 3 m).



Gambar 2. Grafik FK Statis vs Sudut Lereng (Morgenstern-Price)



Gambar 3. Grafik FK Dinamis vs Sudut Lereng (Morgenstern-Price)



Gambar 1. Geometri dan Model Lereng Penelitian yang digunakan dalam Analisis Kestabilan Lereng

3.2 Hasil Analisis Deterministik (Metode Bishop Simplified)

Sebagai langkah validasi, analisis deterministik juga dilakukan dengan menggunakan metode Bishop Simplified pada dua kondisi pembebanan, yaitu statis (tanpa beban gempa) dan dinamis (dengan beban gempa $k_h = 0,2307g$). Analisis dilakukan pada lebar berm 6 m dan 3 m, tinggi bench 7 m, serta variasi sudut lereng 55° – 80° .

Hasil Analisis pada Berm 6 m

- Total Stress Analysis:
 - Kondisi statis: $FK = 4,38$ – $5,25$
 - Kondisi dinamis: $FK = 3,35$ – $3,64$
- Effective Stress Analysis:
 - Kondisi statis: $FK = 1,69$ – $2,30$
 - Kondisi dinamis: $FK = 1,42$ – $1,69$

Hasil Analisis pada Berm 3 m

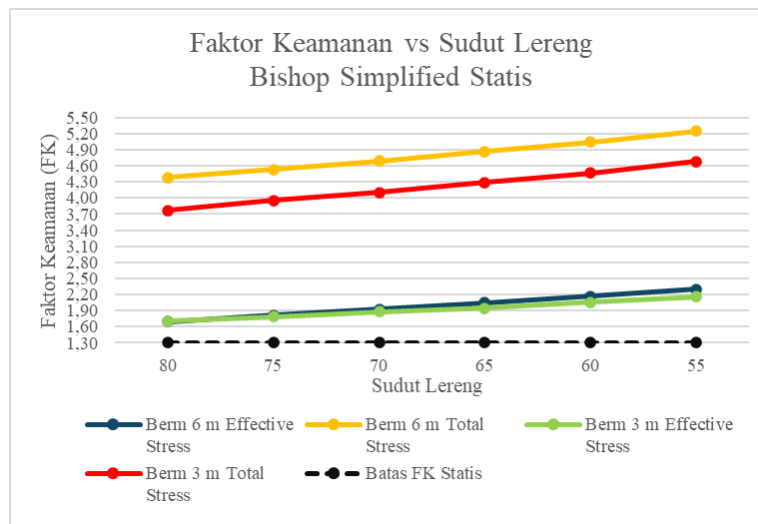
- Total Stress Analysis:
 - Kondisi statis: $FK = 3,77$ – $4,68$
 - Kondisi dinamis: $FK = 2,96$ – $3,37$
- Effective Stress Analysis:
 - Kondisi statis: $FK = 1,71$ – $2,16$
 - Kondisi dinamis: $FK = 1,32$ – $1,56$

▪ Interpretasi Hasil

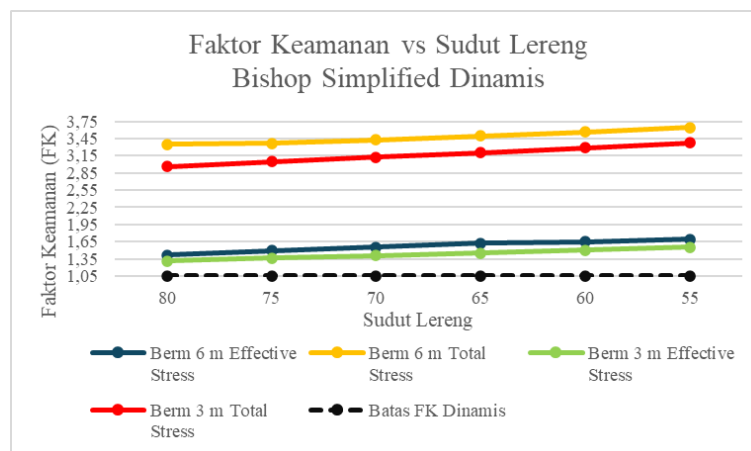
- Secara umum, seluruh skenario memenuhi kriteria aman karena nilai $FK > 1,0$.
- Pola hasil Bishop Simplified menunjukkan kecenderungan yang sama dengan metode Morgenstern-Price:
 - Nilai FK lebih tinggi pada Total Stress Analysis.
 - Nilai FK lebih rendah pada Effective Stress Analysis.
 - Nilai FK menurun pada kondisi dinamis dibandingkan kondisi statis.
- Peningkatan sudut lereng cenderung menurunkan kestabilan lereng, terutama pada analisis tegangan efektif dan kondisi dinamis.
- Dibandingkan dengan metode Morgenstern-Price, Bishop Simplified umumnya menghasilkan nilai FK sedikit lebih rendah, sehingga dapat dianggap lebih konservatif.

▪ Visualisasi

Untuk memperjelas pengaruh sudut lereng terhadap faktor keamanan, dibuat grafik hubungan antara FK Statis dan FK Dinamis dengan sudut lereng pada kedua variasi lebar berm. Grafik tersebut ditampilkan pada Gambar 4 (berm 6 m) dan Gambar 5 (berm 3 m).



Gambar 4. Grafik FK Statis vs Sudut Lereng (Bishop Simplified)



Gambar 5. Grafik FK Dinamis vs Sudut Lereng (Bishop Simplified)

3.3 Hasil Analisis Probabilistik (Monte Carlo)

Analisis probabilistik dilakukan dengan metode Monte Carlo sebanyak 5000 iterasi untuk mengkuantifikasi ketidakpastian parameter kuat geser. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi kestabilan lereng tidak hanya berdasarkan satu nilai faktor keamanan, tetapi juga peluang terjadinya kegagalan lereng.

▪ Jenis Analisis Probabilistik

1. Effective Stress Analysis

- Parameter yang divariasikan: kohesi efektif (c') dan sudut gesek efektif (ϕ').
- Relevan untuk kondisi jangka panjang dengan pengaruh tekanan air pori.

2. Total Stress Analysis

- Parameter yang divariasikan: kohesi total (c_u), sedangkan sudut gesek total dianggap konstan.
- Relevan untuk kondisi jangka pendek (undrained) pada material jenuh.

▪ Hasil Analisis dengan Metode Morgenstern-Price (Berm 6 m)

- Total Stress Analysis: Probabilitas kelongsoran = 0% baik pada kondisi statis maupun dinamis.
- Effective Stress Analysis:
 - Kondisi statis: PK = 0,61%–74,77%
 - Kondisi dinamis: PK = 0,82%–4,86%
- Nilai tertinggi terjadi pada sudut 65°, dengan probabilitas kelongsoran 74,77% pada kondisi statis Effective Stress Analysis.

▪ Hasil Analisis dengan Metode Bishop Simplified (Berm 6 m)

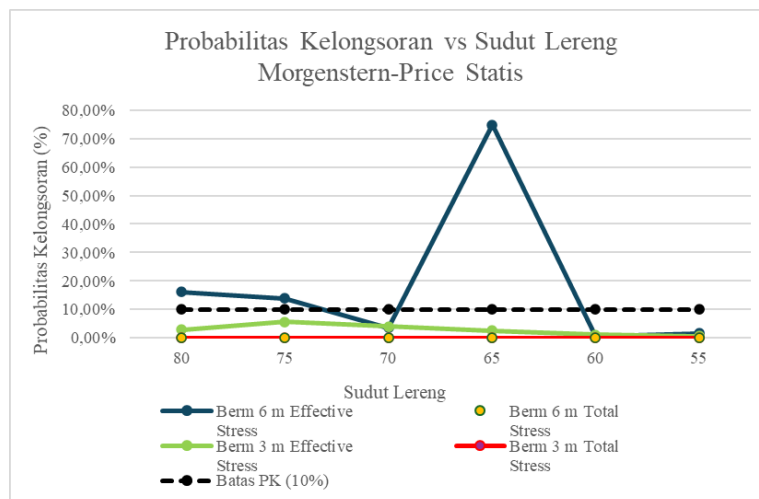
- Total Stress Analysis: PK = 0%–0,2%
- Effective Stress Analysis:
 - Kondisi statis: PK = 1,76%–10,58%
 - Kondisi dinamis: PK = 5,30%–18,12%
- Probabilitas kelongsoran meningkat tajam pada sudut 65°, menunjukkan bahwa geometri lereng pada sudut tersebut merupakan kondisi paling kritis.

▪ Interpretasi Hasil

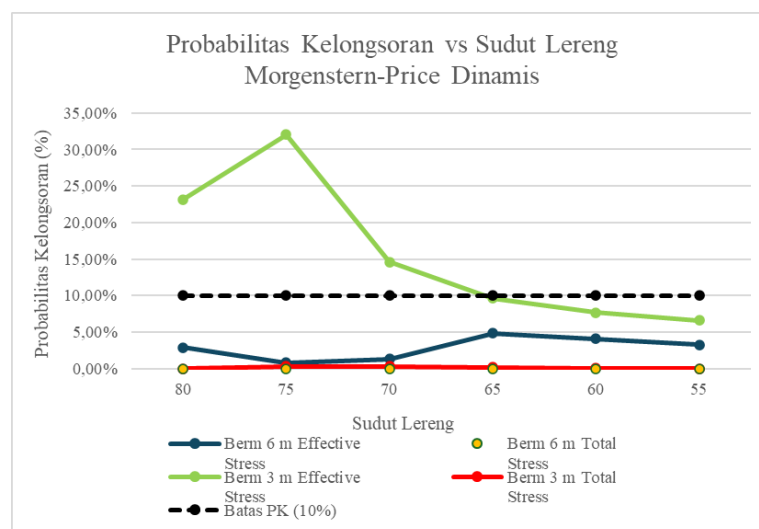
- Total Stress Analysis menunjukkan probabilitas kegagalan hampir nol, sehingga kondisi jangka pendek relatif aman.
- Effective Stress Analysis memperlihatkan probabilitas kegagalan yang signifikan, terutama pada sudut lereng 65°, sehingga kondisi ini menjadi skenario kritis.
- Hubungan antara Faktor Keamanan (FK) dan Probabilitas Kelongsoran (PK) bersifat non-linear, sehingga perubahan kecil pada geometri dapat menyebabkan lonjakan probabilitas kegagalan secara drastis.
- Kondisi dinamis secara konsisten meningkatkan probabilitas kegagalan dibandingkan kondisi statis.

▪ Visualisasi

Untuk memperjelas pengaruh sudut lereng terhadap probabilitas kelongsoran, dibuat grafik hubungan antara PK Statis dan PK Dinamis dengan sudut lereng pada kedua variasi lebar berm. Grafik tersebut ditampilkan pada Gambar 6 (berm 6 m) dan Gambar 7 (berm 3 m).



Gambar 6. Grafik PK Statis vs Sudut Lereng (Morgenstern-Price)



Gambar 7. Grafik PK Dinamis vs Sudut Lereng (Morgenstern-Price)

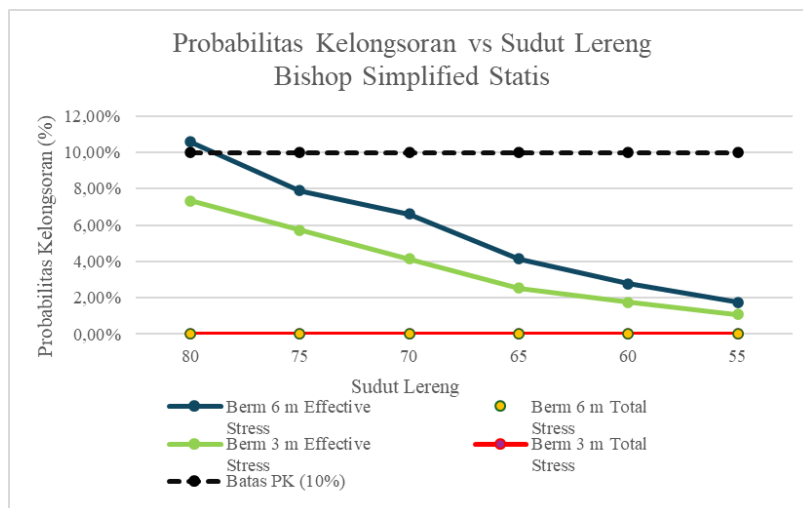
Analisis probabilistik dengan metode Monte Carlo sebanyak 5000 iterasi juga dilakukan pada geometri lereng dengan lebar berm 3 m. Hasil analisis menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan antara pendekatan Total Stress Analysis dan Effective Stress Analysis, baik pada metode Morgenstern-Price maupun Bishop Simplified.

▪ **Metode Morgenstern-Price (Berm 3 m)**

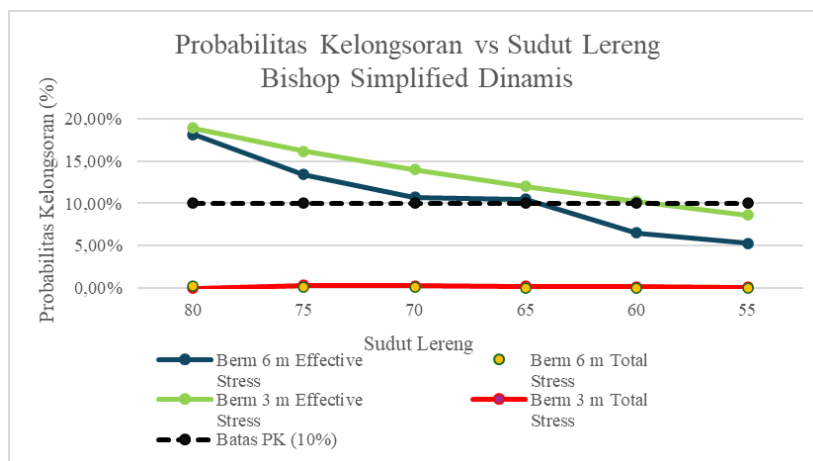
- Total Stress Analysis: Probabilitas kelongsoran sangat rendah, berkisar 0%–0,32% pada kondisi statis maupun dinamis.
- Effective Stress Analysis:
 - Kondisi statis: PK = 0,60%–5,65%
 - Kondisi dinamis: PK = 6,60%–32,02%
- Nilai probabilitas kegagalan tertinggi terjadi pada sudut lereng yang lebih curam, menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap geometri.

▪ **Metode Bishop Simplified (Berm 3 m)**

- Total Stress Analysis: Probabilitas kelongsoran tetap rendah, yaitu 0%–0,32%.
- Effective Stress Analysis:
 - Kondisi statis: PK = 1,08%–7,32%
 - Kondisi dinamis: PK = 8,64%–18,92%
- Hasil ini konsisten dengan Morgenstern-Price, namun Bishop Simplified cenderung memberikan nilai PK sedikit lebih rendah, sehingga lebih konservatif.



Gambar 8. Grafik PK Statis vs Sudut Lereng (Bishop Simplified)



Gambar 9. Grafik PK Dinamis vs Sudut Lereng (Bishop Simplified)

Perbandingan hasil analisis probabilistik antara Effective Stress Analysis dan Total Stress Analysis menunjukkan perbedaan yang cukup jelas dalam nilai Probabilitas Kelongsoran (PK).

- Total Stress Analysis secara konsisten menghasilkan nilai PK yang lebih rendah. Hal ini disebabkan oleh pengabaian variabilitas sudut geser dalam (φ) pada pendekatan total stress,

sehingga ketidakpastian parameter yang diperhitungkan lebih kecil. Dengan demikian, hasil analisis cenderung lebih optimis terhadap kestabilan lereng.

- Effective Stress Analysis memperhitungkan variabilitas kohesi efektif (c') dan sudut geser dalam (ϕ'), sehingga lebih sensitif terhadap ketidakpastian parameter material. Akibatnya, nilai PK yang diperoleh lebih tinggi, terutama pada kondisi dinamis dan sudut lereng curam.
- Keterbatasan Total Stress Analysis adalah hanya relevan untuk kondisi jangka pendek (undrained), khususnya pada material jenuh. Analisis ini tidak mencerminkan pengaruh tekanan air pori dalam jangka panjang.
- Keunggulan Effective Stress Analysis adalah relevansinya untuk kondisi jangka panjang, di mana pengaruh air tanah dan tekanan pori menjadi faktor dominan dalam kestabilan lereng.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kestabilan lereng yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa secara deterministik seluruh skenario lereng dengan tinggi bench 7 meter dan variasi lebar berm 6 meter maupun 3 meter masih tergolong aman karena nilai faktor keamanan (FK) berada di atas 1,0. Pada berm 6 meter, nilai FK berkisar antara 1,416 hingga 5,395, dengan nilai terendah diperoleh pada kondisi dinamis, analisis tegangan efektif, menggunakan metode Bishop Simplified pada sudut lereng 80° , sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada kondisi statis, analisis tegangan total, menggunakan metode Morgenstern-Price pada sudut lereng 55° . Pada berm 3 meter, nilai FK berkisar antara 1,316 hingga 6,131, dengan nilai terendah pada kondisi dinamis, analisis tegangan efektif, metode Bishop Simplified pada sudut 80° , dan nilai tertinggi pada kondisi statis, analisis tegangan total, metode Morgenstern-Price pada sudut 75° . Hal ini menunjukkan bahwa meskipun aman secara deterministik, tingkat kestabilan lereng sangat dipengaruhi oleh variasi sudut lereng, kondisi analisis, dan lebar berm.

Sementara itu, hasil analisis probabilistik menunjukkan bahwa lereng dengan berm 6 m memiliki probabilitas kelongsoran (PK) pada rentang 0% hingga 75%, sedangkan lereng dengan berm 3 m memiliki PK pada rentang 0% hingga 32%. Nilai PK tertinggi pada berm 6 m terjadi pada kondisi statis, analisis tegangan efektif, metode Morgenstern-Price pada sudut 65° , yaitu sebesar 75%, sedangkan pada beberapa skenario analisis tegangan total diperoleh nilai PK sebesar 0%. Pada berm 3 meter, nilai PK tertinggi terjadi pada kondisi dinamis, analisis tegangan efektif, metode Morgenstern-Price pada sudut 75° , yaitu sebesar 32%, dengan beberapa skenario analisis tegangan total juga menunjukkan nilai PK mendekati 0%.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa meskipun seluruh skenario lereng memenuhi kriteria aman berdasarkan nilai FK, terdapat kondisi tertentu yang menunjukkan risiko kegagalan cukup tinggi berdasarkan nilai PK. Oleh karena itu, evaluasi kestabilan lereng tidak dapat hanya mengandalkan analisis deterministik, melainkan harus mempertimbangkan analisis probabilistik secara simultan agar tingkat keamanan lereng dapat dinilai lebih menyeluruh dan keputusan teknis dalam perencanaan desain lereng menjadi lebih andal.

Referensi

- Alimohammadi, A., dan Rezaei, A. 2025. *Probabilistic Assessment of Slope Stability Using Reliability Analysis*. *Frontiers in Built Environment*, Vol. 11, pp. 1545900. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1545900>.
- Au, S.-K. and Beck, J. L. 2001. *Estimation of Small Failure Probabilities in High Dimensions by Subset Simulation*. *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 16/4, pp. 263–277. [https://doi.org/10.1016/S0266-8920\(01\)00019-4](https://doi.org/10.1016/S0266-8920(01)00019-4)
- Azizi, dkk. 2019. "Optimalisasi Geometri Lereng Tambang Nikel Menggunakan Metode Probabilistik pada Hill Pit 05, PT Vale Indonesia Tbk, Sulawesi Selatan." *Jurnal Geoteknik*.
- Broch, E., & Franklin, J.A. (1972). The point-load strength test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 9(6), 669-697.
- Das, B. M. 2010. *Principles of Geotechnical Engineering*. 7th Edition. Cengage Learning. Stamford.
- Hoek, E. 2007–2013. *Practical Rock Engineering – Full Text (bagian Rock Slopes)*. Rocscience. Toronto.
- ISRM (1985). Suggested method for determining point load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 22(2), 51-60.
- Jaeger, J. C., & Cook, N. G. W. (1979). *Fundamentals of rock mechanics (3rd ed.)*. Chapman and Hall.
- Joint Committee on Structural Safety (JCSS). *Probabilistic Model Code, Part 1 –Basis of Design*.

- <https://www.jcss-lc.org/publications/jcsspmc/desbasis2a.pdf>, 18 Oktober 2025.
- Kar, S. S.; Dey, J.; Jain, K.; Ghosh, P. 2022. *Probabilistic Based Reliability Slope Stability Analysis Using FOSM, FORM and MCS*. Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 12/6, pp. 9837–9842.
- Labuz, J. F., & Zang, A. (2012). *Mohr-Coulomb failure criterion*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(6), 975-979. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0281-7>
- Mandagi, A. T., Legrans, R. R. I. and Bujung, A. B. A. 2023. *Studi perencanaan perkuatan lereng metode grouted tieback terhadap kestabilan lereng pada Jl. Manado-Tomohon Km 15*. TEKNO, Vol. 21, No. 85, pp. 1747-1755.
- Mandagi, A. T., Sarajar, A. N. and Soebarkah, B. B. A. *Analisis Stabilitas Lereng Dengan Perkuatan Soil Nailing Terhadap Lokasi Pembangunan RSUD Manado*. <http://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/tekno>, 28 November 2025.
- Ngasang, W.; Rahayu, A.; Ramadhani, S. 2023. *Open slope stability of laterite nickel ore in Morowali Utara*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 18/14, pp. 1672–1685, 30 September 2023. https://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2023/jeas_0723_9262.pdf, 18 Oktober 2025.
- Read, J.; Stacey, P. 2009. *Guidelines for Open Pit Slope Design* (hal. acceptance criteria – ringkasan digital). <https://www.geokniga.org/books/31135>, 18 Oktober 2025.
- Rocscience. n.d. *Probabilistic Analysis in Slide2/RS2 (Monte Carlo, Latin Hypercube, Point Estimate)*. <https://www.roscience.com>, 18 Oktober 2025.
- Rumsowek, P. D. dan Birawaputra, I. 2019. *Analisis Kestabilan Lereng Penambangan Nikel pada PT. Gag Nikel dengan Menggunakan Metode Bishop*. INTAN Jurnal Penelitian Tambang, Vol. 2, No. 2, pp. 147–154.
- Rusnak, J., dan Mark, C. 1998. *Using the Point Load Test to Determine the Uniaxial Compressive Strength of Coal*. Proc. 17th International Conference on Ground Control in Mining, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Morgantown, West Virginia, USA. Pp. 362–371.
- Seequent (GeoStudio). 2024. *Basic Probabilistic Stability Analysis (Example File)*. <https://www.geoslope.com>, 18 Oktober 2025.
- Seequent (GeoStudio). 2022. *Stability Modeling with SLOPE/W (Manual)*. <https://www.geoslope.com>, 18 Oktober 2025.
- Terzaghi, K. dan Peck, R. B. 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley and Sons. New York.
- U.S. Army Corps of Engineers. 2003. *Engineering and Design: Slope Stability (EM 1110-2-1902)*. U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC.
- Utami, Melisa Eka Nur Sapriani. 2023. *Analisis kestabilan lereng tambang terbuka nikel laterit menggunakan metode klasifikasi massa batuan pada lereng batuan di Pit Lola ABC PT. Ceria Nugraha Indotama (CNI) Kecamatan Wolo Kabupaten Kolaka Provinsi Sulawesi Tenggara*. Skripsi Program S1 Teknik Pertambangan Universitas Jambi. Jambi.
- Washington State Department of Transportation (WSDOT). 2013. *Geotechnical Design Manual M 46-03, Chapter 7: Slope Stability Analysis*. WSDOT. Olympia, WA.
- Wyllie, D. C. dan Mah, C. W. 2004. *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. Edisi ke-4. Spon Press. London & New York.