

PERBANDINGAN PENGARUH METODE AIR TANAH DALAM ANALISIS KESTABILAN LERENG TAMBANG NIKEL LATERIT

COMPARISON OF GROUNDWATER METHODS IN SLOPE STABILITY ANALYSIS OF NICKEL LATERITE MINE

N. N. Rohmad^{*1}, B. Dwinagara², O. W. Lusantono³

¹⁻³Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, UPN “Veteran” Yogyakarta

¹⁻³Jalan Padjajaran 104, Sleman, Yogyakarta, Indonesia, 55283

e-mail: ^{*}112210052@student.upnyk.ac.id, ²barliandn@upnyk.ac.id, ³oktarian.lusantono@upnyk.ac.id

ABSTRAK

Analisis kestabilan lereng dipengaruhi oleh faktor keberadaan air tanah, sebab air memberikan tekanan pori yang menghasilkan gaya angkat dan mempengaruhi massa material yang menyusun lereng tersebut. Dalam analisis kestabilan lereng, pendekatan model air tanah dapat dari model empiris seperti Hoek & Bray Chart maupun model numerik *transient finite element analysis* (TFEA). Perbandingan pendekatan model air tanah empiris dan numerik diperlukan untuk menilai perbedaan pendekatan model air tanah dalam mempengaruhi hasil analisis kestabilan lereng dalam hal ini nilai faktor keamanan (FK) dan Probabilitas kelongsoran (PF). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menilai dampak dari model air tanah terhadap stabilitas lereng, karena penggunaan model empiris yang tidak sesuai kondisi hidrologi setempat sering menghasilkan FK yang terlalu aman. Diperlukan model muka air tanah yang lebih representatif untuk memperoleh FK yang lebih kritis pada lereng tambang nikel laterit. Metode penelitian menggunakan analisis kestabilan lereng dengan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb dengan metode pendekatan kesetimbangan batas Morgenstern-Price. Pendekatan model air tanah menggunakan dua metode yaitu metode empiris dengan Hoek & Bray Chart atau setengah jenuh dan metode numerik dengan *transient finite element analysis* (TFEA). Hasil analisis kestabilan lereng tunggal pada material limonit menghasilkan FK paling kritis 2,948 pada model air tanah setengah jenuh dan material saprolit 3,546 dengan probabilitas kelongsoran 0%. Analisis kestabilan lereng keseluruhan menghasilkan FK paling kritis 1,518 dengan probabilitas kelongsoran 0,5% pada model air tanah TFEA. Kesimpulan yang diambil analisis lereng tunggal lebih terakomodir dengan model air tanah setengah jenuh sementara pada lereng keseluruhan lebih sesuai dengan model air tanah TFEA.

Kata kunci: kestabilan lereng, model air tanah, hoek & bray chart, TFEA, infiltrasi air hujan

ABSTRACT

Slope stability analysis is influenced by the presence of groundwater, as water exerts pore pressure that generates uplift forces and affects the mass of the material that makes up the slope. In slope stability analysis, the groundwater model approach can be derived from empirical models, such as the Hoek & Bray Chart, or from transient finite element analysis (TFEA) numerical models. A comparison of empirical and numerical groundwater model approaches is necessary to assess the differences in groundwater model approaches in influencing the results of slope stability analysis, in this case, the safety factor (SF) and probability of failure (PF). The objective of this study is to assess the impact of groundwater models on slope stability, as the use of empirical models that do not align with local hydrological conditions often results in overly conservative safety factors (SF). A more representative groundwater level model is needed to obtain a more critical SF for laterite nickel mine slopes. The research method uses slope stability analysis with the Mohr-Coulomb failure criterion and the Morgenstern-Price limit equilibrium approach. The groundwater model approach uses two methods: the empirical method with the Hoek & Bray Chart or semi-saturated method, and the numerical method with transient finite element analysis (TFEA). The results of single slope stability analysis on limonite material yielded the most critical SF of 2.948 in the semi-saturated groundwater model and 3.546 for saprolite material with a 0% probability of failure. The overall slope stability analysis yielded the most critical FK of 1.518 with a 0.5% probability of failure in the TFEA groundwater model. The conclusions drawn from the single slope analysis are better accommodated by the semi-saturated groundwater model, while the overall slope analysis is more suitable for the TFEA groundwater model.

Keywords: slope stability, groundwater models, hoek & bray chart, TFEA, rainfall infiltration

PENDAHULUAN

Lereng merupakan permukaan miring yang menghubungkan dua tempat dengan ketinggian yang berbeda. Dalam kategorinya lereng dikelompokkan menjadi lereng alami dan lereng buatan. Salah satu tipe lereng buatan adalah lereng galian yang terbentuk dari aktivitas penggalian atau pemotongan tanah asli [1]. Pembuatan lereng buatan dapat mengganggu distribusi tegangan alami pada lereng, sehingga berpotensi menimbulkan ketidakstabilan lereng yang dapat mengakibatkan kondisi berisiko selama operasi pertambangan. Oleh karena itu, penting untuk melakukan analisis kestabilan lereng guna mengurangi risiko tersebut.

Kestabilan pada lereng dapat dipengaruhi oleh berbagai elemen termasuk bentuk lereng, karakteristik fisik dan mekanik material, struktur geologi, adanya air di dalam tanah, proses pelapukan serta gaya eksternal. Keberadaan air terutama air di dalam tanah (*groundwater*), memiliki dampak signifikan terhadap kestabilan lereng. Hal ini disebabkan tekanan air pori (*pore water pressure*) yang dimiliki oleh air tanah dapat menyebabkan gaya angkat (*uplift force*) dan mengurangi kekuatan dari massa material yang menyusun lereng [2].

Lereng penambangan pada komoditas nikel laterit terdiri dari material penyusun yang terbentuk dari pelapukan batuan ultrabasa yang terpengaruh oleh berbagai elemen geologi [3] menjadikan lereng terdiri atas material hasil pelapukan geologi yang rentan terkena proses hidrologi seperti hujan dan air tanah. Kejadian hujan secara signifikan meningkatkan muka air tanah sehingga menyebabkan peningkatan tekanan air pori, penurunan nilai tegangan efektif, penurunan nilai faktor keamanan, dan peningkatan nilai probabilitas longsor dapat memicu terbentuknya rekahan dan kejadian longsor. Oleh karenanya sering ditemukan permasalahan ketidakstabilan yang diindikasikan dengan adanya rekahan setelah terjadinya hujan pada curah hujan dan kurun waktu tertentu [4].

Dalam analisis kestabilan lereng, penggunaan model air tanah mulai digunakan seperti pada beberapa penelitian yang mengangkat topik pada pengaruh air tanah terhadap kestabilan lereng. Pada penelitian oleh Vickyla, et al. (2019), kondisi muka air tanah diasumsikan sebesar 50% dari tinggi lereng yang mana hasil faktor keamanan (FK) yang didapatkan aman pada lereng *highwall* [5]. Dwi, et al. (2024) meneliti pengaruh fluktuasi air tanah pada kestabilan lereng penambangan batubara pada PT Battoman Coal yang mana pada air tanah kedalaman 4,26 meter dari permukaan hasil lereng masih tidak aman sehingga diperlukan optimasi geometri lereng agar lereng dinyatakan aman dengan FK >1 [6]. Penelitian oleh Setyananda, et al. (2024) menunjukkan bahwa semakin tinggi model air tanah yang digunakan maka akan mempengaruhi FK yang semakin menurun dengan FK paling kritis ada pada 1,337 untuk FK deterministik dan

1,358 untuk FK *mean* pada kondisi muka air tanah jenuh dengan muka air tanah berada pada permukaan lereng [7].

Dalam analisis kestabilan lereng, pendekatan model air tanah dapat dari model empiris seperti Hoek & Bray Chart maupun model numerik *transient finite element analysis* (TFEA). Perbandingan pendekatan model air tanah empiris dan numerik diperlukan untuk menilai perbedaan pendekatan model air tanah dalam mempengaruhi hasil analisis kestabilan lereng dalam hal ini nilai faktor keamanan (FK) dan Probabilitas kelongsoran (PF). Penelitian ini bertujuan untuk menilai dampak dari model air tanah terhadap stabilitas lereng, karena penggunaan model empiris yang tidak sesuai kondisi hidrologi lokal sering menghasilkan FK yang terlalu aman. Diperlukan model muka permukaan air tanah yang lebih representatif untuk memperoleh FK yang lebih kritis pada lereng tambang nikel laterit. Model air tanah merujuk pada metode empiris yaitu *Groundwater Chart* Hoek & Bray nomor 3 dan metode numerik *transient finite element analysis* (TFEA).

METODE PENELITIAN

Penelitian dimulai dengan menentukan masalah yaitu penentuan model air tanah dalam analisis kestabilan lereng. Dalam rangka penyelesaian masalah dilakukan pengumpulan data secara sekunder di antaranya curah hujan serta *properties* material. Data sekunder diolah menjadi data infiltrasi curah hujan dan model lereng tunggal dan lereng keseluruhan pada Slide2. Analisis kestabilan lereng dilakukan dengan model air tanah setengah jenuh dan TFEA. Hasil analisis berupa faktor keamanan (FK) dan probabilitas kelongsoran (PF) yang dipengaruhi oleh model air tanah yang digunakan. Nilai FK yang semakin kritis serta nilai PF yang semakin besar menunjukkan adanya kesesuaian dalam penggunaan model air tanah pada model lereng. Alur penelitian tersaji pada diagram alir gambar 1.

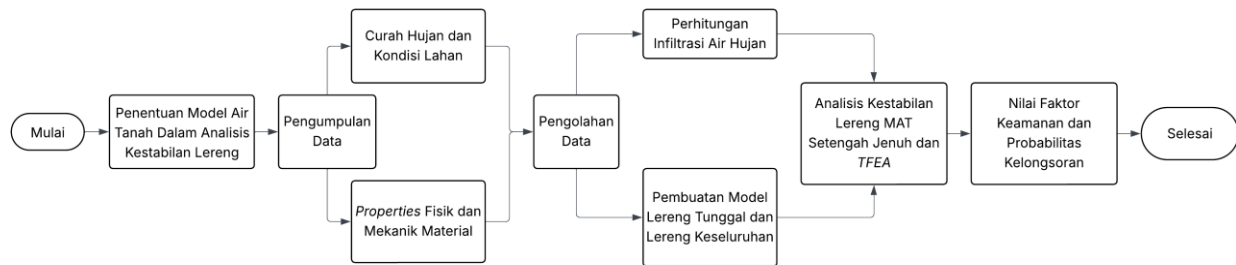
Penelitian ini dibatasi dengan menggunakan tiga material pada tambang nikel laterit yaitu material limonit, saprolit, dan *bedrock*. Model air tanah yang digunakan terbatas pada dua model yaitu model empiris Hoek & Bray Chart serta model numerik *Transient Finite Element Analysis* (TFEA). Curah hujan yang digunakan dalam perhitungan infiltrasi terdiri dari data curah hujan historis maksimal pada 1 tahun, 5 tahun, dan 10 tahun. Analisis dilakukan dalam kondisi statis pada dua jenis geometri lereng yaitu lereng tunggal dan lereng keseluruhan. Perhitungan faktor keamanan menggunakan metode Morgenstern-Price dengan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb.

Geologi Lokal dan Geometri Lereng

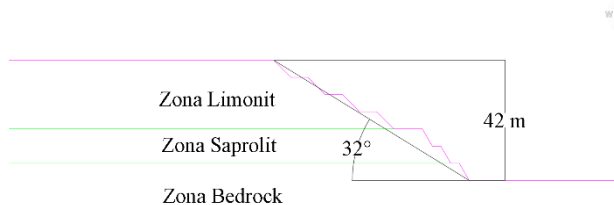
Endapan nikel laterit pada umumnya memiliki 5 zona litologi yang terdiri dari zona *top soil*, zona limonit, zona transisi, zona saprolit dan zona *bedrock* [8]. Pembuatan model lereng keseluruhan didasarkan rekomendasi geoteknik lereng keseluruhan PT X yang terletak pada

daerah Halmahera Timur, Maluku Utara. Analisis lereng tunggal menggunakan material zona limonit dan zona saprolit serta pada analisis lereng keseluruhan menggunakan urutan stratigrafi zona limonit, zona saprolit, dan zona *bedrock*.

Geometri lereng yang dianalisis mencakup model lereng tunggal dengan tinggi tunggal 6 meter dan sudut tunggal 60° serta model lereng keseluruhan dengan tinggi keseluruhan 42 meter dan sudut keseluruhan 32° , *berm* 6 meter pada lereng limonit dan *berm* 3 meter pada lereng saprolit dengan perlapisan zona dibuat secara horizontal (Gambar 2).



Gambar 1. Alur Metode Penelitian



Gambar 2. Geometri Lereng Keseluruhan

Properties Material

Properties material terdiri atas sifat fisik dan sifat mekanik material yang terdiri dari densitas kering (γ_d), densitas basah (γ_w) yang didapatkan dari uji sifat fisik, kohesi (C) dan sudut gesek dalam (ϕ) yang diperoleh dari uji geser langsung. *Properties* material akan menjadi data masukkan pada kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb. *Properties* material yang telah didapatkan dilakukan uji baik suai (*goodness fitting test*) dengan hasil dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Sifat Fisik dan Sifat Mekanik Material

No	Litologi	Parameter	Distribusi	Rata-rata	SD	Rel. Min.	Rel. Maks.
1	Limonit	Densitas Kering, kN/m^3	Normal	12,88	1,80	3,90	2,57
		Densitas Jenuh, kN/m^3	Gamma	16,81	1,63	3,30	3,64
		Kohesi, kN/m^3	Normal	33,86	6,81	9,02	7,44
		Sudut Geser Dalam, $^\circ$	Normal	35,90	7,51	16,26	9,21
2	Saprolit	Densitas Kering, kN/m^3	Normal	14,27	2,52	2,65	3,88
		Densitas Jenuh, kN/m^3	Gamma	16,87	1,30	1,52	1,99
		Kohesi, kN/m^3	Lognormal	40,51	6,96	7,94	11,26
		Sudut Geser Dalam, $^\circ$	Normal	31,51	15,47	20,25	16,52
3	Bedrock	Densitas Kering, kN/m^3	Normal	22,91	6,33	8,49	6,61
		Densitas Jenuh, kN/m^3	Gamma	24,24	3,87	5,56	5,38
		Kohesi, kN/m^3	Normal	66,00	17,93	27,39	18,17
		Sudut Geser Dalam, $^\circ$	Gamma	46,11	3,83	4,34	6,33

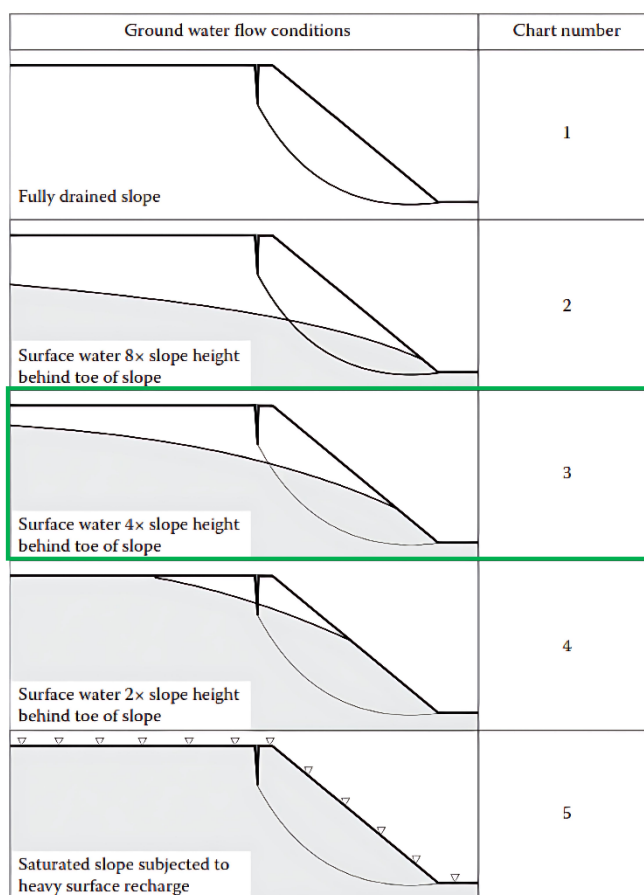
Model Air Tanah

Model air tanah menggunakan 2 metode yaitu metode empiris dengan bagan model air tanah Hoek & Bray Chart dan model air tanah *transient finite element analysis*

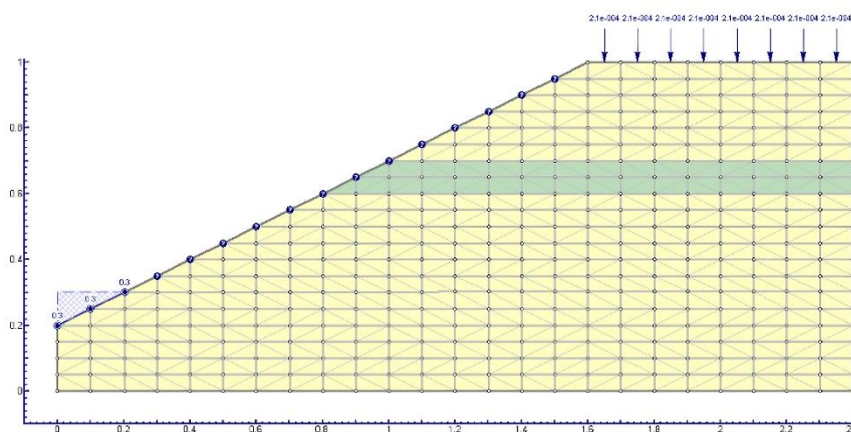
(TFEA). Model Hoek & Bray Chart yang digunakan adalah bagan nomor 3 yang diasumsikan sebagai model air tanah setengah jenuh. Model muka air tanah setengah jenuh menggunakan pendekatan penggambaran air tanah

4 kali tinggi lereng dibelakang *toe* lereng ditunjukkan pada gambar 3 [9]. Model kedua yang digunakan adalah metode numerik dengan *transient finite element analysis* (TFEA). Model air tanah TFEA digunakan dalam menentukan perubahan tekanan air pori berdasarkan waktu yang mempengaruhi dalam analisis kestabilan

lereng hingga tekanan air pori mencapai kondisi stabil (*steady state*) [10]. Pada metode TFEA, tekanan air pori dipengaruhi oleh beberapa parameter yaitu nilai permeabilitas material, kadar air natural, dan nilai infiltrasi air hujan. Contoh model TFEA dengan infiltrasi konstan dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 3. Hoek & Bray Groundwater Chart [9]



Gambar 4. Contoh Model Slide Air Tanah *Transient* dengan Infiltrasi konstan [10]

Nilai Infiltrasi Air Hujan

Data Curah hujan (CH) historis yang dipakai merupakan data selama 10 tahun terakhir dari 2015 sampai 2024 pada daerah Halmahera Timur, Provinsi Maluku Utara dengan sumber data berasal dari situs web CHRS Data Portal dengan ketelitian sebaran hujan 16 km². Data curah hujan yang digunakan pada perhitungan limpasan air adalah curah hujan maksimal dalam 1 tahun yaitu 8,77 mm/hari, 5 tahun sebesar 53,33 mm/hari, dan 10 tahun sebesar 67,33 mm/hari.

Perhitungan aliran limpasan dilakukan dengan *curve number* yang ada pada metode *soil conservation service – curve number* (SCS-CN) dengan menggunakan data kondisi lahan dan curah hujan. Nilai *curve number* dapat dilihat pada tabel 2 [11].

Tabel 2. Nilai *Curve Number*

Material	Cover Type	Treatment	Soil Group	Curve Number
Limonit	Fallow	Bare Soil	C	91
Saprolit	Fallow	Bare Soil	A	77

Nilai S adalah retensi maksimum ketika ada air limpasan dihitung dalam pers. (1).

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad \dots\dots\dots(1)$$

Nilai I_a merupakan nilai abstraksi awal atau jumlah air hujan yang hilang sebelum membentuk air limpasan dihitung dalam pers. (2).

$$I_a = 0.2S \quad \dots\dots\dots(2)$$

Hasil perhitungan kemudian digunakan dalam perhitungan air limpasan (Q) dengan P adalah curah hujan, rumus ditunjukkan pada pers. (3).

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad \dots\dots\dots(3)$$

Nilai air limpasan selanjutnya dipakai dalam perhitungan infiltrasi air hujan (F) dengan rumus pers. (4)

$$F = P - Q \quad \dots\dots\dots(4)$$

Nilai Sifat Hidrolik Material

Sifat hidrolik material yang digunakan dalam permodelan yaitu parameter *Soil Water Characteristic curve* (SWCC) dan parameter fungsi konduktivitas hidrolik. SWCC didefinisikan sebagai suatu hubungan antara kadar air dan

tegangan hisap material [12]. Fungsi konduktivitas hidrolik adalah kemampuan tanah untuk membawa atau mengalirkan air baik dalam kondisi *saturated* ataupun *unsaturated* [13]. Fungsi konduktivitas hidrolik menggunakan parameter permeabilitas material yang didapatkan melalui pengujian laboratorium dengan nilai pada tabel 3.

Tabel 3. Nilai Permeabilitas Material

Material	Nilai Permeabilitas (m/det)
Limonit	$7,76 \times 10^{-6}$
Saprolit	$4,63 \times 10^{-6}$

Analisis Kestabilan Lereng

Analisis kestabilan lereng dilakukan dengan menerapkan metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium method*) yang menghasilkan nilai faktor keamanan sebagai *output*. Metode irisan diterapkan pada permukaan gelincir dengan memperhitungkan keseimbangan antara gaya penahan (*shear strength*) dan gaya penggerak (*shear stress*) [14].

Penelitian ini mengadopsi pendekatan metode *General Limit Equilibrium/Morgenstern-Price*. Pendekatan ini dipilih karena memperhitungkan baik parameter kesetimbangan momen maupun kesetimbangan gaya serta memperhatikan interaksi gaya antar irisan jika dibandingkan dengan metode lainnya. Dalam penggunaan metode ini, dibuat asumsi penyederhanaan untuk memperlihatkan keterkaitan antara gaya geser (X) dengan gaya normal di sekitar irisan (E) dengan pers. (5) [15].

$$X = \lambda \cdot f(x) \cdot E \quad \dots\dots\dots(5)$$

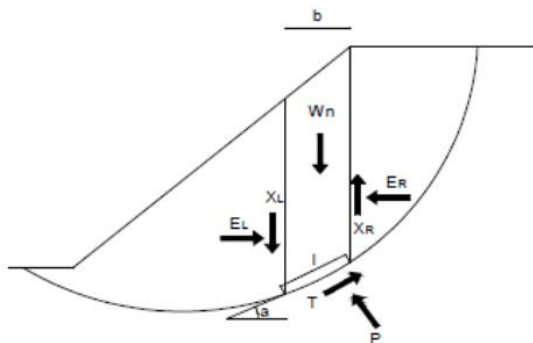
Setiap gaya yang bekerja pada irisan area longsoran ditampilkan pada gambar 5. Rumus yang relevan ditunjukkan pada pers. (6).

$$P = \frac{[w - (x_n - x_i) - \frac{1}{\epsilon}(c'(\sin \alpha - \mu' \tan \Phi' \sin \alpha)]}{\cos \alpha (\lambda + \tan \alpha \frac{\tan \Phi}{\epsilon})} \quad \dots\dots\dots(6)$$

Dimana :

- P = gaya normal
- c' = kohesi
- Wn = gaya yang disebabkan oleh beban tanah ke-n
- α = sudut yang dibentuk oleh titik tengah bidang irisan dengan titik pusat busur bidang longsor
- Φ' = sudut geser tanah (pada kondisi undrained, nilai sudut geser adalah 0)
- μ = tekanan air dalam pori
- x_n, x_i = gaya gesek yang bekerja di tepi irisan

Dalam proses perhitungannya, dibutuhkan iterasi yang berulang sehingga diperlukan program komputer Slide2 untuk memudahkan proses tersebut.



Gambar 5. Gaya yang Berlaku Pada Irisan Area Longsor Metode Morgenstern-Price [15]

HASIL DAN PEMBAHASAN

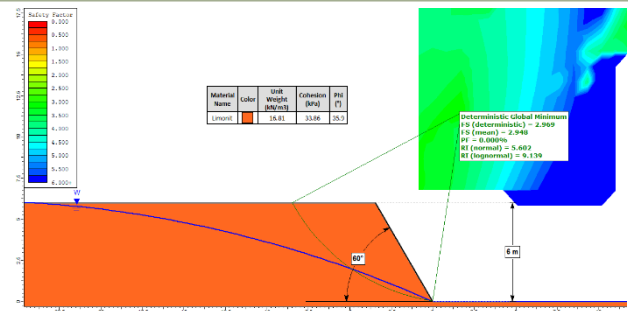
Pengaruh Metode Model Air Tanah pada Analisis Kestabilan Lereng Tunggal

Analisis kestabilan lereng pada lereng tunggal diterapkan dengan tinggi tunggal 6 meter dan sudut tunggal 60° dalam keadaan statis. Analisis lereng tunggal terdiri dari material zona limonit dan zona saprolit dengan menerapkan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb menggunakan metode Morgenstern-Price. Terdapat dua model air tanah yang dianalisis yaitu kondisi setengah jenuh yang menyesuaikan Hoek & Bray Chart nomor 3 dan model air tanah *transient*. Model air tanah *transient* memiliki tiga variasi nilai infiltrasi vertikal yang tertera dalam tabel 4 yang diperoleh dari data curah hujan maksimum selama 1 tahun, 5 tahun, dan 10 tahun.

Tabel 4. Nilai Infiltrasi vertikal Berdasarkan Curah Hujan Maksimal

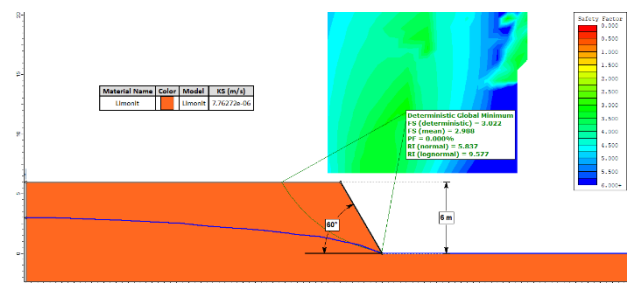
Material	Nilai Infiltrasi (m/hari)		
	1 tahun	5 tahun	10 tahun
Limonit	0,00829	0,02155	0,02293
Saprolit	0,00818	0,04056	0,04608

Hasil analisis pada lereng tunggal model air tanah setengah jenuh material limonit memiliki hasil faktor keamanan (FK) sebesar 2,948 (gambar 6) dengan probabilitas kelongsoran (PF) 0% dan pada material saprolit hasil analisis menunjukkan FK sebesar 3,561 dengan PF 0%.



Gambar 6. Contoh hasil Analisis Lereng Tunggal Limonit Model Air Tanah Setengah Jenuh

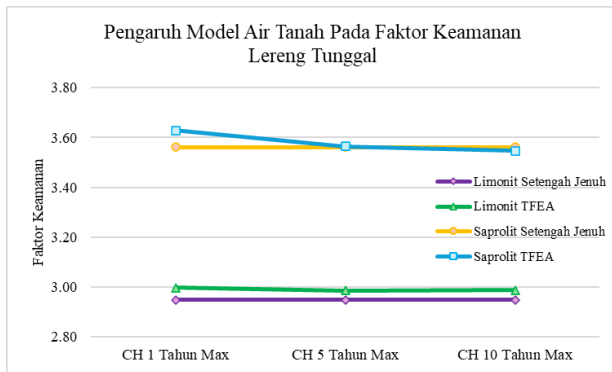
Hasil analisis lereng tunggal model air tanah *transient* pada material limonit memiliki nilai paling kritis sebesar 2,988 (gambar 7). Pada analisis lereng tunggal model air tanah *transient* material saprolit menunjukkan nilai kritis sebesar 3,546. Hasil analisis lereng tunggal dapat dilihat pada tabel 5.



Gambar 7. Contoh hasil Analisis Lereng Tunggal Limonit Model Air Tanah *Transient*

Tabel 5. Hasil Analisis Kestabilan Lereng Tunggal Material Limonit dan Saprolit

Model Air Tanah	Material	FK Mean	PF
Setengah Jenuh	Limonit	2,948	0%
<i>Transient</i> 1 Tahun		2,997	0%
<i>Transient</i> 5 Tahun		2,987	0%
<i>Transient</i> 10 Tahun		2,988	0%
Setengah Jenuh	Saprolit	3,561	0%
<i>Transient</i> 1 Tahun		3,629	0%
<i>Transient</i> 5 Tahun		3,565	0%
<i>Transient</i> 10 Tahun		3,546	0%



Gambar 8. Grafik Pengaruh Model Air Tanah Pada Faktor Keamanan Lereng Tunggal

Hasil analisis terhadap kedua material menunjukkan bahwa faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran dapat dikatakan aman berdasarkan keputusan menteri ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018 [16]. Pengaruh model air pada analisis kestabilan lereng tunggal menunjukkan pada model air tanah setengah jenuh memiliki FK yang lebih kritis dengan rentang 0,1% - 1,3% dibandingkan dengan model air tanah *transient* pada material limonit dan saprolit yang ditunjukkan pada gambar 8.

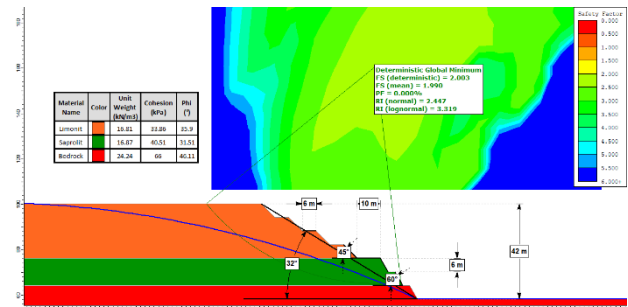
Pada model air tanah *transient* 10 tahun material saprolit menunjukkan hasil FK lebih kritis dibanding dengan model air tanah setengah jenuh, hal ini dipengaruhi oleh nilai permeabilitas pada material saprolit yang lebih besar dibandingkan model air tanah *transient* 1 tahun dan 5 tahun, sementara pada model air tanah setengah jenuh, muka air tanah sudah dibentuk secara empiris sesuai dengan ketentuan 4 kali tinggi lereng dibelakang *toe*.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada model air tanah setengah jenuh dapat digunakan pada analisis kestabilan lereng tunggal yang bersifat sederhana dan material homogen dengan hasil cepat. Namun perlu diperhatikan bahwa nilai permeabilitas juga mempengaruhi dalam model *transient* sehingga dapat menghasilkan hasil yang lebih kritis.

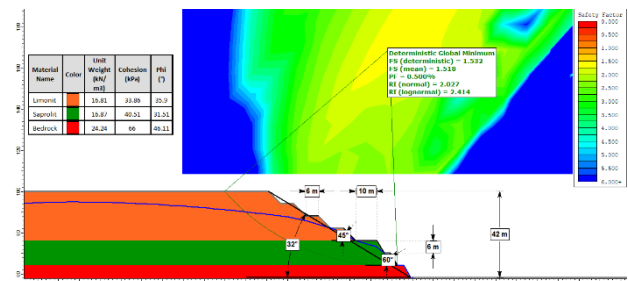
Pengaruh Metode Model Air Tanah pada Analisis Kestabilan Lereng Keseluruhan

Analisis pada lereng keseluruhan menggunakan rekomendasi lereng keseluruhan dengan geometri tinggi keseluruhan 42 meter dan sudut keseluruhan 32° yang dianalisis dalam kondisi statis. Model lereng keseluruhan terdiri atas material zona limonit, zona saprolit dan zona *bedrock* dengan analisis menggunakan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb metode Morgenstern-Price. Model air tanah yang digunakan ada 2 model yaitu kondisi setengah jenuh dan *transient*. Model air tanah *transient* memiliki 3 variasi nilai infiltrasi vertikal dengan nilai sesuai pada tabel 4 yang didasarkan pada curah hujan maksimal pada 1 tahun, 5 tahun, dan 10 tahun.

Hasil analisis lereng keseluruhan model air tanah setengah jenuh menghasilkan Faktor Keamanan (FK) sebesar 1,990 (gambar 9) dengan PF 0%. Hasil analisis lereng keseluruhan model air tanah *transient* menghasilkan FK paling kritis sebesar 1,518 (gambar 10) dengan PF 0,5% pada nilai infiltrasi curah hujan maksimum 10 tahun. Hasil analisis lereng keseluruhan dapat dilihat dalam tabel 6.



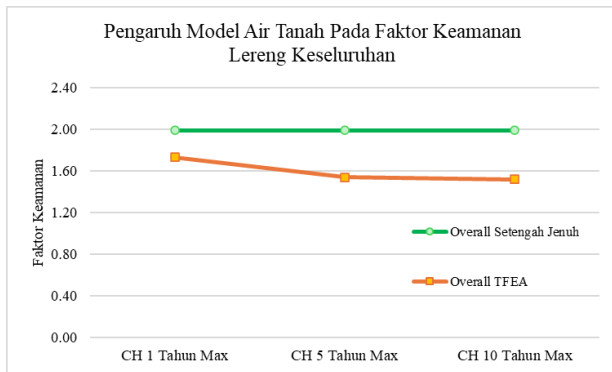
Gambar 9. Contoh Hasil Analisis Lereng Keseluruhan Model Air Tanah Setengah Jenuh



Gambar 10. Contoh Hasil Analisis Lereng Keseluruhan Model Air Tanah *Transient*

Tabel 6. Hasil Analisis Kestabilan Lereng Keseluruhan

Model Air Tanah	FK Mean	PF
Setengah Jenuh	1,990	0%
<i>Transient</i> 1 Tahun	1,729	0%
<i>Transient</i> 5 Tahun	1,540	0,4%
<i>Transient</i> 10 Tahun	1,518	0,5%



Gambar 11. Contoh Hasil Analisis Lereng Keseluruhan Model Air Tanah Setengah Jenuh

Hasil analisis model keseluruhan menunjukkan bahwa faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran dapat dikatakan aman berdasarkan dengan keputusan menteri ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018 pada semua kriteria keparahan longsor [16]. Berdasarkan analisis yang dilakukan, lereng keseluruhan model air tanah *transient* memiliki hasil lebih kritis 31,09% dibanding dengan model air tanah setengah jenuh yang ditunjukkan pada gambar 11. Hal ini dipengaruhi oleh penggambaran muka air tanah yang mana pada model setengah jenuh air tanah telah ditetapkan berdasar empiris yaitu 4 kali tinggi di belakang *toe* lereng, berbeda dengan model air tanah *transient* dimana muka air tanah dapat berfluktuasi sesuai dengan data masukkan sifat hidrolik yaitu infiltrasi air dan permeabilitas material yang mana pada analisis kestabilan lereng keseluruhan berpengaruh dalam menghasilkan nilai FK yang lebih kritis sehingga untuk model air tanah *transient* lebih cocok digunakan pada analisis kestabilan lereng keseluruhan yang kompleks dalam analisisnya.

KESIMPULAN

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengkaji model air tanah yang menghasilkan nilai faktor keamanan (FK) lebih kritis pada analisis kestabilan lereng pada kedua jenis lereng yaitu lereng tunggal dan lereng keseluruhan komoditas nikel laterit. Dari hasil analisis diketahui pada lereng tunggal model empiris model air tanah Hoek & Bray Chart nomor 3 atau disebut setengah jenuh menghasilkan nilai FK lebih kecil dengan kisaran 0,1% - 1,3% dibandingkan metode *transient finite element analysis*-TFEA dengan probabilitas kelongsoran sama pada 0%. Pada lereng keseluruhan model TFEA menghasilkan nilai FK lebih kritis sebesar 31,09% dan probabilitas kelongsoran lebih besar sebanyak 0,5% dibandingkan dengan model setengah jenuh. Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan dengan membandingkan model air tanah pada tambang dengan komoditas lainnya atau mengembangkan dengan model air tanah lain.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017 – Persyaratan perancangan geoteknik*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- [2] Frans, J.S., Nurfalaq M. H., (2019). Studi Geoteknik Pengaruh Muka Air Tanah Terhadap Kestabilan Lereng Tambang Batubara. *Prosiding TPT XXVIII PERHAPI 2019*, 1(1), 12-21.
- [3] Harahap, M. G., & Novitasari, E. D. (2022). Geomorfologi Dan Karakteristik Nikel Laterit Di Desa Baingketi Distrik Makbon Kabupaten Sorong Provinsi Papua Barat. *INTAN Jurnal Penelitian Tambang*, 5(2).
- [4] Wang, C., Huang, F., Fang, L., & Chang, T. (2022). Back-Analysis on Safety of a Rainfall-Induced Landslide case History using Deterministic and Probabilistic limit equilibrium method. *SSRN Electronic Journal*.
- [5] Vickyla, M., Sophian I., Muslim D., (2019). Pengaruh Muka Air Tanah Terhadap Kestabilan Lereng Tambang X. *Padjajaran Geoscience Journal*, 3(3).
- [6] Dwi, A. N., Asof, M., & Purbasari, D. (2024). Analysis Of The Effect Groundwater Level Fluctuation On Slope Stability In The Coal Mining Plan. *Jurnal Pertambangan*, 8(4), 166-174.
- [7] Setyananda, A., Hartami, P. N., Maulana, Y., Tuheteru, E. J., Herdyanti, M. K., & Putra, D. (2024, May). Analysis of the Influence of Groundwater Level on Slope Stability at Highwall PT. X, South Kalimantan. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1339, No. 1, p. 012029). IOP Publishing.
- [8] Damat, R. A. (2024). *Prospeksi Endapan Nikel Laterit Pada Wilayah IUP PT Kahuripan Sakti Mineral (KSM) dan PT Kahuripan Asia Mineral (KAM) Kecamatan Wasile, Kabupaten Halmahera Timur, Provinsi Maluku Utara*. Gowa: Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
- [9] Wyllie, D. C., (2018). *Rock Slope Engineering: Civil Application 5th Edition*. New York: CRC Press.
- [10] Rocscience. (2022) *Slide 2D Groundwater Verification Manual*. Rocscience Inc, Toronto.
- [11] Cronshey, R., McCuen, R. H., Miller, N., Rawls, W., Robbins, S., & Woodward, D. (1986). *Urban hydrology for small watersheds (Technical Release 55, 2nd ed.)*. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.



- [12] Rahardjo, H., Kim, Y., & Satyanaga, A. (2019). Role of unsaturated soil mechanics in geotechnical engineering. *International Journal of Geo-Engineering*, 10, 1-23
- [13] Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc.
- [14] Duncan, J. M., Wright, S. G., Brandon, T. L., (2014), *Soil Strength and Slope Stability 2nd Edition*. New York : John Wiley and Sons, Inc.
- [15] Takwin, G. A., Turangan, A. E., & Rondonuwu, S. G. (2017). Analisis Kestabilan Lereng Metode Morgenstern-Price (Studi Kasus: Diamond Hill Citraland). *TEKNO*, 15(67).
- [16] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2018). *Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.