



Research Article

Analisis Kestabilan dan Rekomendasi Perbaikan Desain Lereng pada Tambang Terbuka

Muhammad Thoyib Alhadi Prabowo¹, Ratna Dewi^{1*}, dan Yulia Hastuti¹

¹Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia

Received: 25 February 2026, Accepted: 15 May 2026, Published: 30 June 2026

Abstract

This study evaluates the stability of an open-pit mine slope and proposes an optimized slope geometry based on limit equilibrium analysis. Geotechnical parameters were derived from field investigations using the Rock Mass Rating (RMR) and Geological Strength Index (GSI) classification systems, then incorporated into Slide 6.0 for slope stability analysis. The Janbu and Morgenstern–Price limit equilibrium methods were employed to determine the factor of safety (FoS). Initial simulations indicated that the analyzed slope was stable; however, the observed field failure prompted a back analysis, which identified a weak layer with reduced shear strength as the primary cause of instability. The back analysis produced FoS values of 0.774 and 1.154 using the Janbu and Morgenstern–Price methods, respectively. Based on these findings, the slope geometry was redesigned with a slope angle of 45°, a bench width of 13 m, and a bench height of 8 m. The redesigned slope increased the FoS to 1.314 (Janbu) and 1.590 (Morgenstern–Price), satisfying the recommended stability criterion. A comparison of the two methods further showed that the Janbu method consistently yielded FoS values approximately 15% lower than those obtained using the Morgenstern–Price method, indicating its more conservative predictions. The proposed design provides an effective approach for improving slope stability while highlighting the importance of incorporating back analysis to capture actual field conditions that are not represented in initial geotechnical models.

© 2026 published by Universitas Sriwijaya

Keywords: *Rock Mass Rating, Geological Strength Index, Janbu, Back Analysis, Weak Layer.*

1. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Geologi teknik atau yang biasa disebut dengan geoteknik merupakan sebuah bidang teknik yang melakukan rekayasa berupa kajian ilmu yang menganalisis pengaruh faktor-faktor geologi terhadap suatu proyek, proses konstruksi, pemeliharaan dan lain-lain. Peran seorang sarjana teknik sipil dalam bidang geoteknik salah satunya adalah dapat menghadapi masalah kestabilan lereng serta memberikan rekomendasi untuk perbaikan lereng tersebut. Lereng dapat didefinisikan sebagai sebuah permukaan yang memiliki perbedaan ketinggian pada kedua ujungnya, dapat berupa permukaan naik atau turun, kemudian juga lereng dapat didefinisikan sebagai sebuah permukaan tanah yang miring dan membentuk suatu sudut tertentu terhadap bidang horisontal dan tidak terlindungi [1].

Analisis kestabilan lereng merupakan analisis terhadap tingkat kestabilan serta probabilitas terjadinya longsor. Penyebab kestabilan lereng pada batuan berbeda dengan kestabilan lereng pada tanah, hal ini menyebabkan kasus dan parameter penyebab kelongsoran lereng berbeda, untuk kestabilan lereng batuan ditentukan oleh bidang lemah atau diskontinu yang dapat menyebabkan kelongsoran. Bidang diskontinu pada lereng batuan berupa kekar (*joint*), bidang perlapisan (*bedding plane*), rekahan (*fissure*), dan sesar (*fault*), oleh karena itu bidang diskontinu pada suatu massa batuan sangat mempengaruhi analisis kestabilan lereng.

Di dalam operasi penambangan permasalahan terkait kestabilan lereng biasa ditemukan pada lokasi penggalian, penimbunan, pembuangan, dan jalan tambang, untuk menyelesaikan permasalahan ini umumnya para ahli geoteknik akan menggunakan metode general Limit Equilibrium ataupun metode finite elemen yang merupakan dasar dari beberapa perangkat lunak dalam mempermudah analisis.

Fan, Q dkk. [2] menganalisis stabilitas lereng di Kabupaten Jiuzhaigou, Sichuan, dengan menggunakan Metode Morgenstern-Price, dimana diungkapkan bahwa penggunaan metode Morgenstern-Price dan simulasi numerik efektif dalam memodelkan risiko longsor serta dapat membantu pemerintah dalam pencegahan dan mitigasi bencana. Metode Morgenstern-Price juga digunakan dalam menganalisis rembesan air pada rencana lereng tambang terbuka [3] dimana dari hasil analisis diperlukan upaya untuk memperbaiki kestabilan lereng yaitu dengan memangkas beban puncak lereng tersebut. Perubahan geometri lereng juga direkomendasikan untuk meningkatkan faktor aman lereng tambang timah di Bangka Belitung [4]. Dimana pada penelitian ini analisis kestabilan lereng untuk evaluasi geometri lereng menggunakan metode RMR, SMR, dan Morgenstern-Price pada Pit C2 dan C4 tambang timah terbuka blok mayang.

Analisis Kestabilan Lereng

Menurut Kliche (2019) [5], analisis kestabilan lereng merupakan sebuah proses yang dilakukan untuk mendapatkan nilai tingkat kestabilan dari suatu lereng. Kestabilan suatu lereng dapat juga didefinisikan sebagai sebuah kekuatan penahan bidang di atas suatu permukaan miring terhadap runtuh dan gelinciran. Cara yang sering digunakan untuk menyatakan keadaan stabilitas lereng di area penambangan adalah dengan nilai faktor keamanan, nilai ini didapatkan dengan perhitungan antara gaya penahan yang dibandingkan dengan gaya penggerak.

Metode kestabilan lereng menggunakan metode kesimbangan batas (*limit equilibrium method*). Beberapa metode dievaluasi untuk menentukan pendekatan yang paling tepat untuk analisis stabilitas lereng batuan. Metode yang disederhanakan seperti metode Ordinary dan Bishop terbatas pada mekanisme *circular failure*, sehingga kurang cocok untuk massa batuan yang kompleks. Metode Janbu memberikan fleksibilitas untuk *non circular slip surface*. Begitupula dengan metode Morgenstern-Price memenuhi keseimbangan gaya dan momen yang memberikan akurasi yang lebih tinggi.

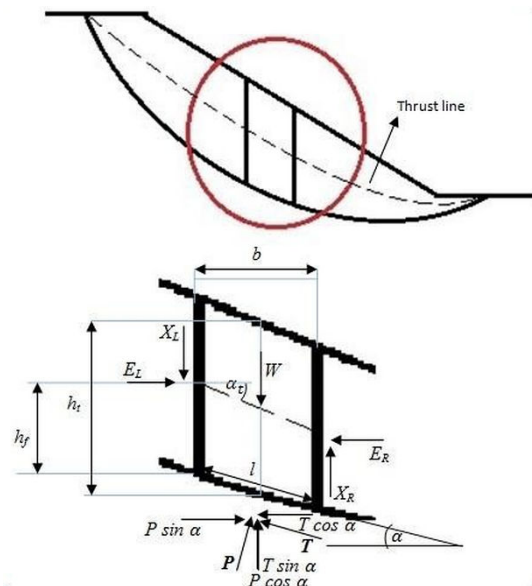
Studi terbaru menunjukkan bahwa metode Morgenstern-Price banyak diadopsi dalam analisis stabilitas lereng, kemajuan terbaru mengintegrasikan kerangka kerja Morgenstern-Price dengan pendekatan *machine learning* untuk meningkatkan kemampuan memprediksi kestabilan lereng [6], [7].

Metode Janbu

Metode Janbu merupakan metode analisa yang dapat digunakan pada longsor dengan tipe *circular* dan *non circular*, metode ini menggunakan sebuah

faktor koreksi untuk mengoreksi bentuk bidang gelincir yang tidak berbentuk busur lingkaran, persamaan umum kesetimbangan metode Janbu menyelesaikan secara vertikal dan horizontal pada bagian dasar dari tiap irisan dengan cara memperhitungkan seluruh kesetimbangan gaya. Metode ini memiliki prinsip dasar yang sama dengan metode Bishop yaitu, mengasumsikan bahwa gaya normal antar irisan diperhitungkan namun untuk gaya geser per irisan dianggap memiliki nilai nol ($X_L - X_R = 0$).

Metode Bishop menurunkan angka faktor keamanan berdasarkan perhitungan kesetimbangan vertikal sedangkan metode Janbu menurunkan angka faktor keamanan berdasarkan dari metode kesetimbangan horizontal, gambaran lereng serta gaya-gaya yang bekerja seperti terlihat pada Gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1. Lereng serta gaya yang bekerja pada Metode Janbu [8]

Keterangan :

- W = Berat total pada irisan
- E_L = Gaya antar irisan yang bekerja pada arah horizontal pada penampang kiri
- E_R = Gaya antar irisan yang bekerja pada arah horizontal pada penampang kanan
- X_L = Gaya antar irisan yang bekerja pada arah vertikal pada penampang kiri
- X_R = Gaya antar irisan yang bekerja pada arah vertikal pada penampang kanan
- P = Gaya normal total pada irisan
- T = Gaya geser pada dasar irisan
- h_t = Tinggi rata-rata dari irisan
- h_f = Asumsi letak thrust line
- b = Lebar dari irisan
- l = Panjang dari irisan
- a = Kemiringan lereng
- at = Sudut Thrust line

Metode Morgenstern-Price

Metode Morgenstern-Price ini dikembangkan berdasarkan prinsip kesetimbangan batas yang dikembangkan pada tahun 1965, yang menggunakan hasil dari perhitungan kesetimbangan setiap gaya-gaya normal dan hasil perhitungan dari momen yang bekerja pada seluruh irisan pada bidang kelongsoran tersebut, metode ini dapat digunakan pada seluruh bentuk bidang runtuh yang memenuhi kondisi kesetimbangan. Dalam metode ini nilai faktor keamanan dapat diperoleh dengan perhitungan persamaan jumlah gaya tangensial dan gaya normal terhadap dasar dari potongan, dan juga persamaan dari jumlah momen titik tengah dari dasar masing-masing potongan.

Perhitungan persamaan yang digunakan untuk memperoleh nilai faktor keamanan dengan metode ini telah mengalami perubahan yaitu dimodifikasi dengan menggunakan metode Newton-Raphson yang mengasumsikan bahwa resultan gaya geser dan gaya normal antar potongan yang berubah-ubah. Berikut adalah persamaannya:

$$X/E = \lambda f(x) \quad (1)$$

Keterangan:

$F(x)$ = fungsi yang menggambarkan variasi X/E pada lereng

λ = nilai konstanta presentase

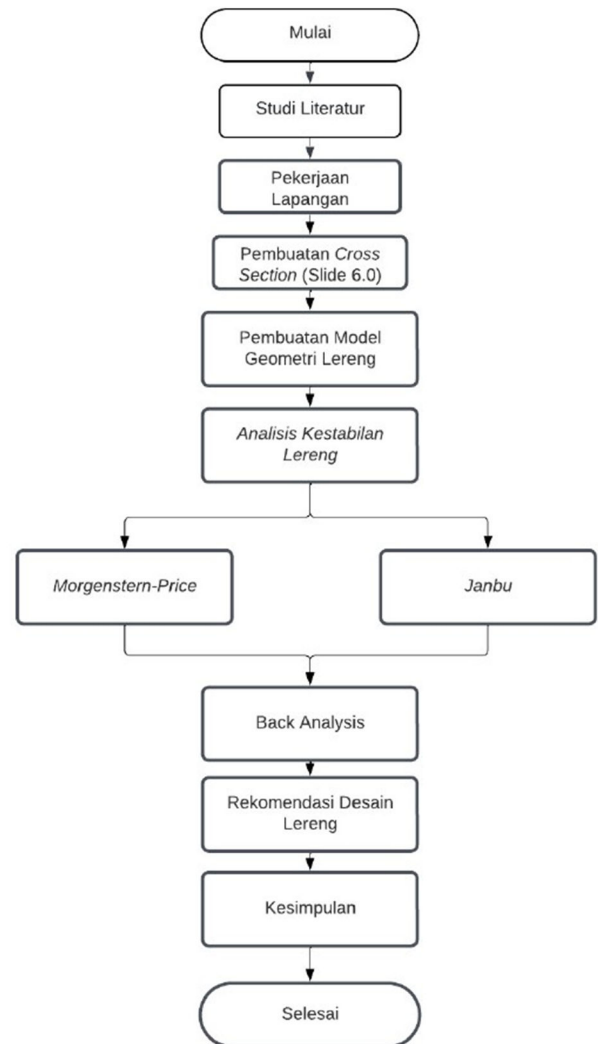
Metode Morgenstern-Price telah banyak digunakan dalam menganalisis kestabilan lereng terutama kestabilan lereng tambang seperti yang telah dilakukan sebelumnya [6], [7], [9], [10].

Nilai faktor keamanan digunakan untuk menentukan apakah suatu lereng batuan tersebut dianggap stabil, kritis atau tidak stabil [10]. Menurut Peck (1967) dalam [11], dalam beberapa tahun yang akan datang, lereng alami yang dinyatakan stabil tetap memiliki kemungkinan untuk longsor yang diakibatkan oleh perubahan topografi, aliran air tanah, gempa, kehilangan kekuatan geser, serta oleh perubahan tegangan dan pelapukan.

2. METODE

Paper ini merupakan hasil penelitian dilaksanakan di lapangan yang merupakan pengambilan data primer yang berupa data batuan dan tanah yang diambil langsung di lokasi yang terletak di PT. Pamapersada Nusantara Site MTBU area pit MTBU Front Newcastle yang berupa, *Strength of Intact Rock*, *Rock Quality Designation (RQD)*, *spacing of discontinuity*, dan *condition of discontinuity*, serta kondisi muka air tanah. Langkah-langkah analisis kestabilan lereng lebih jelas terlihat pada diagram alir Gambar 2.

Pengambilan data di lapangan ini menggunakan metode *Rock Mass Rating (RMR)* dan metode *Geological Strength Index (GSI)* dengan cara membentangkan *Scanline* di sepanjang area lereng yang telah ditentukan untuk mendapatkan data kekuatan lapisan batuan tersebut, data diambil untuk setiap lapisan batuan kecuali lapisan batubara. Berikut merupakan lokasi pengambilan data yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Diagram alur analisis kestabilan lereng



Gambar 3. Lokasi PT. Pamapersada Nusantara Site MTBU

Sebelum dapat melakukan analisis kestabilan lereng menggunakan aplikasi Slide 6.0, diperlukan data berupa potongan lereng yang diambil menggunakan aplikasi minescape 5.7, data ini diperlukan untuk memproyeksikan potongan lereng yang menyajikan beberapa data berupa, model lereng, data per lapisan, letak lapisan batubara, koordinat lereng, serta elevasi lereng.

Didalam model tersebut terdapat sebuah desain tambang, maka desain tersebut harus di Input juga agar dapat membedakan kondisi aktual dan rencana desain tambang, langkah nya adalah klik garis *Polyline* desain tambangnya, lalu klik kanan, lalu pilih format tools dan ubah warnanya serta merubah *weight line* nya menjadi 3 agar dapat terlihat dengan jelas.

Langkah awal dari penggunaan aplikasi Slide adalah dengan memasukkan file dxf *cross section* (luaran aplikasi minescape 5.7) ke dalam aplikasi dengan langkah langkah pada Gambar 4 sebagai berikut:



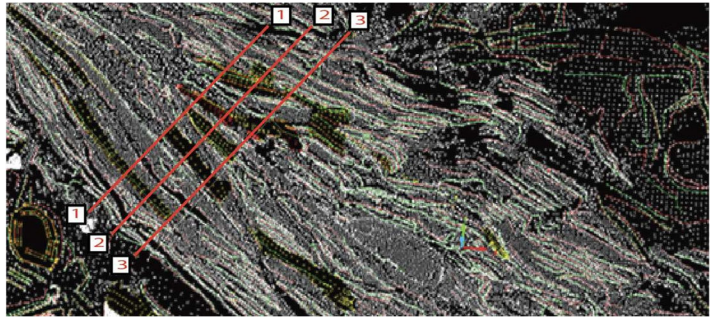
Gambar 4. Diagram alur pembuatan geometri lereng.

Back analysis dilakukan terhadap kondisi aktual di lapangan setelah terjadi longsor, parameter geoteknik ini merupakan parameter terganggu. Kemudian dilanjutkan dengan rekomendasi desain lereng yang aman. Dalam langkah melakukan analisis kestabilan lereng dipilih metode yang digunakan yaitu metode Morgenstern-Price dan metode Janbu.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis input data

Hasil luaran perangkat lunak Minescape dan dengan memasukkan koordinat yang didapat di lapangan menunjukkan lokasi aktual pada data topografi tersebut yang kemudian akan dibagi menjadi 3 *cross section* seperti terlihat pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Garis *cross section* pada area Front Newcastle.

Pembagian tersebut di dapatkan berdasarkan data koordinat yang telah diambil pada lapangan dan kemudian dibuat menjadi garis nomor 1, dan dilakukan interval sebanyak 2 kali dengan jarak 200meter antar interval.

Selanjutnya data batuan atau tanah dikelompokkan berdasarkan letak per lapisan, kemudian dilakukan pengambilan data properti dengan menggunakan metode *Rock Mass Rating* (RMR) dan *Geological Strength Index* (GSI). Dari Nilai GSI dan parameter batuan yang diperoleh, kemudian digunakan untuk memperkirakan parameter kekuatan massa batuan (s , mb dan a) berdasarkan Metode *Generalized Hoek-Brown*, seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Material area Front Newcastle, dengan tipe kekuatan Generalized Hoek-Brown

Nama Material	Warna	γ kN/m ³	UCS Intact	Konstanta		
				S	mb	a
Overburden A	Coklat muda	17	35000	0,009680	0,68930	0,501578
Interburden A1 A2	Merah muda	17	15000	0,003036	0,77733	0,502840
Interburden AB	Merah	17	15000	0,003036	1,887798	0,502840
Interburden BC	Hijau muda	17	15000	0,004057	2,107076	0,502459
Overburden C	Krem	17	3000	0,004057	2,07676	0,502459
Hanging Seam A1	Hitam	17	9040	0,01	1,722414	0,5

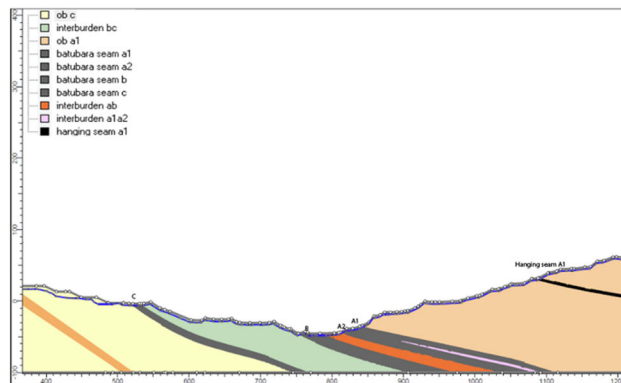
Pendekatan ini memungkinkan penggabungan kondisi geologi seperti *discontinuities* dan factor gangguan pada perkiraan kekuatan. Pada akhirnya, kurva kegagalan Hoek-Brown non linier diubah menjadi model Mohr Coulomb yang linier. Sedangkan untuk material Batubara parameter tanah dengan tipe Mohr-Coulomb seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Material area Front Newcastle, dengan tipe kekuatan Mohr-Coulomb.

Nama Material	Warna	γ kN/m ³	UCS kPa	ϕ
Batubara seam A1	Abu-abu	12,53	100,59	26,77
Batubara seam A2	Abu-abu	12,63	102,47	22,38
Batubara seam B	Abu-abu	12,34	103,14	28,82
Batubara seam C	Abu-abu	12,02	122,54	24,23

Jenis batuan pada lokasi kajian berbeda tergantung dengan lokasi lapisannya, lapisan Overburden C merupakan batuan pasir, lapisan Overburden BC merupakan batuan berlempung, Overburden AB merupakan batuan berlempung, Overburden A1A2 merupakan lapisan batuan berlempung, overburden A1 juga merupakan lapisan batuan berlempung, Data ini didapatkan berdasarkan hasil penelitian di lapangan dengan menggunakan metode *Rock Mass Rating* dan *Geological Strength Index* (GSI) yang setelah di lakukan pengambilan data tersebut dapat ditentukan jenis batuan nya.

Dengan menggunakan material tersebut maka dapat dilakukan permodelan lereng yang dilakukan pada 3 *cross section* dengan perletakan material yang dapat dilihat pada Gambar 6 di bawah.

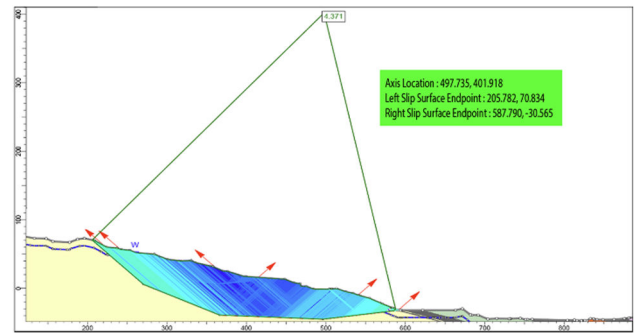
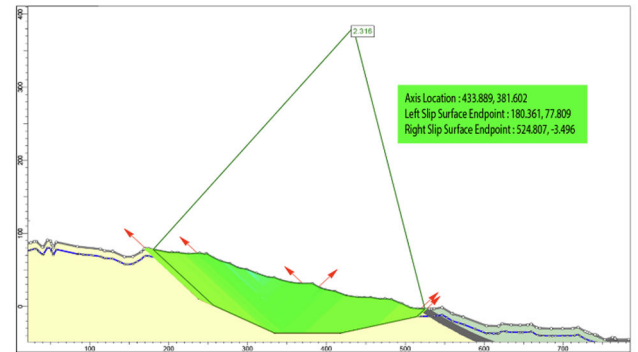
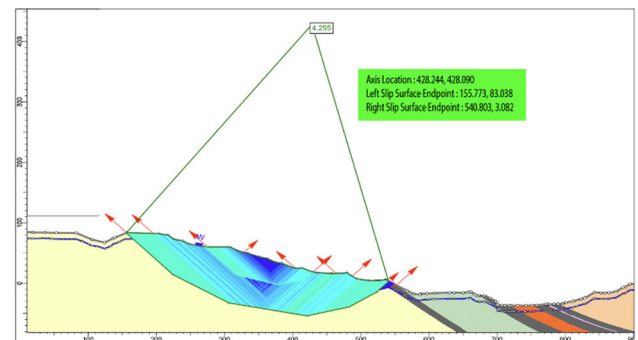


Gambar 6. Permodelan lereng dan lapisannya.

Kestabilan Lereng Aktual

Geometri lereng aktual disimulasikan dengan asumsi longsor *non-circular* dan dilakukan analisis dengan metode Janbu dan Morgenstern-Price, hal itu dilakukan untuk menggambarkan kondisi di lapangan. Gambar 7-9 menunjukkan hasil simulasi *cross section* dengan metode Janbu.

Hasil simulasi kestabilan lereng berupa nilai FK pada masing-masing *cross section* dengan perangkat lunak Slide 6.0 dapat direkapitulasi pada Tabel 3 dibawah ini.

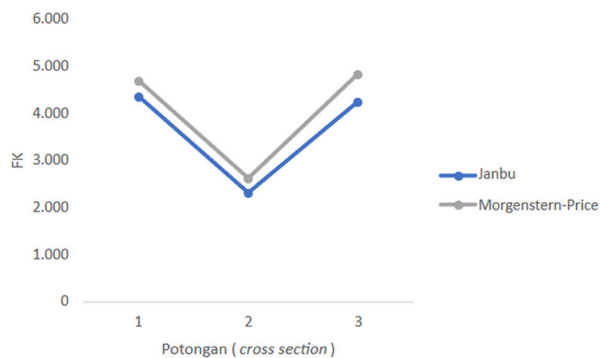
Gambar 7. Hasil simulasi *cross section* 1Gambar 8. Hasil simulasi *cross section* 2Gambar 9. Hasil simulasi *cross section* 3

Tabel 3. Rekapitulasi FK lereng aktual.

Penampang	Janbu	Morgenstern-Price	Kondisi Simulasi	Kondisi Aktual
<i>Cross section 1</i>	4,371	4,707	Aman	Aman
<i>Cross section 2</i>	2,316	2,624	Aman	Tidak aman
<i>Cross section 3</i>	4,255	4,854	Aman	Aman

Dari Tabel 3 kemudian dilakukan analisis hasil faktor keamanan dengan menggunakan korelasi nilai FK dengan metode yang digunakan, yaitu metode Morgenstern-Price dan Janbu yang dapat di lihat pada Gambar 10. Dimana sebuah korelasi yang menyatakan bahwa faktor keamanan metode Morgenstern-Price selalu lebih tinggi dari metode Janbu, hal ini dikarenakan oleh metode Morgenstern-price lebih akurat karena memperhitungkan keseimbangan gaya dan momen dengan distribusi gaya antar irisan yang lebih realistis, untuk metode Janbu sederhana kurang akurat karena metode ini tidak mempertimbangkan keseimbangan momen,

namun metode Janbu yang dikoreksi bisa lebih baik dengan faktor koreksi empiris. Hal ini selaras dengan pernyataan Palermo, dkk. [12] bahwa metode Janbu memiliki nilai faktor keamanan yang lebih rendah sebesar lebih dari 10% dibandingkan dengan nilai yang dihasilkan oleh metode Morgenstern-Price.



Gambar 10. Korelasi nilai faktor keamanan dengan metode analisis.

Hasil perhitungan kestabilan lereng di area front Newcastle menggunakan metode Janbu dan Morgenstern-Price, diperoleh bahwa kondisi lereng pada area lereng sudah stabil dengan semua simulasi menunjukkan hasil faktor keamanan diatas 1,3. Namun pada keadaan aktual di lapangan terjadi kelongsoran di sekitar area *cross-section* 2 dan didapat juga bahwa area tersebut memiliki faktor keamanan yang paling rendah dari seluruh *cross section*, maka dengan alasan tersebut dapat dilakukan back analysis terhadap keadaan aktual di area tersebut. Kondisi area *cross-section* diduga memiliki parameter geoteknik yang lebih rendah.

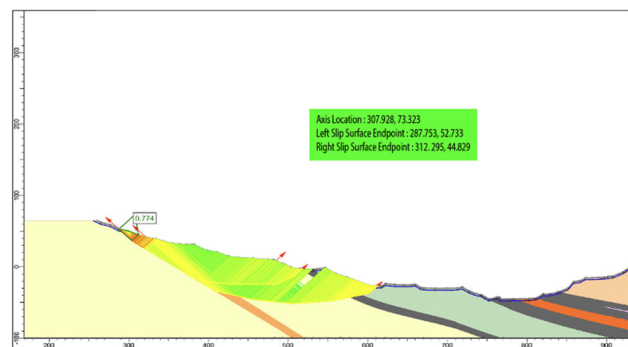
Pengaruh yang paling dominan untuk nilai faktor keamanan dari parameter geoteknik yang berupa nilai kohesi, sudut gesek dan berat volume tanah pada analisis kestabilan lereng batuan adalah nilai sudut gesek internal yang menunjukkan sensitivitas tertinggi, sehingga pentingnya penentuan sudut gesek yang akurat terutama pada massa batuan.

Back Analysis

Back analysis dilakukan terhadap kondisi aktual di lapangan setelah terjadi longsor di sekitar area *cross section* 2 dimana penelitian ini menggunakan kondisi pada bulan Juli 2024, dengan parameter geoteknik merupakan parameter terganggu. Longsoran terjadi pada elevasi 30, dimana di area tersebut terdapat *weak layer* atau bidang/lapisan batuan lemah/lapuk.

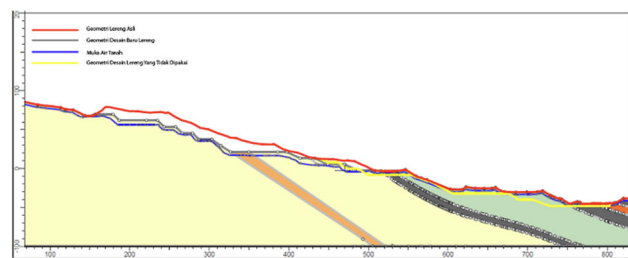
Berdasarkan hasil perhitungan ulang faktor keamanan area *cross section* 2 didapatkan faktor keamanan menggunakan metode Morgenstern-Price sebesar 1,154 dan dengan menggunakan metode Janbu didapatkan faktor keamanan sebesar 0,774,

berada pada angka dibawah 1,3 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11, hal itu menunjukkan bahwa diperlukan perbaikan dan desain ulang lereng.



Gambar 11. Hasil perhitungan ulang *cross section*.

Rekomendasi desain lereng diperlukan untuk area Newcastle berdasarkan panduan dan standar yang berlaku di PT. Pamapersada Nusantara Site MTBU yaitu untuk pit MTBU tinggi maksimal lereng adalah 8m dengan kemiringan 1/1 atau sudut lereng 45^0 , dengan lereng selebar 13m, dan juga dengan mengedepankan efisiensi desain yaitu dengan FK yang diatas 1,3. Berikut hasil desain lereng baru dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Rekomendasi desain lereng *front new castle*.

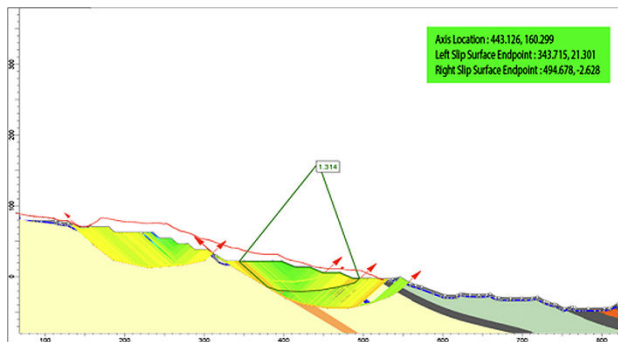
Pembahasan

Setelah itu dilakukan perhitungan faktor keamanan terhadap rekomendasi desain lereng dengan menggunakan metode Janbu dan Morgenstern-Price, hasil simulasi perhitungan dapat dilihat pada Gambar 13.

Dari hasil tersebut diperoleh FK sebesar 1,314 dengan menggunakan metode Janbu, dan sebesar 1,590 dengan menggunakan metode Morgenstern-Price, nilai faktor keamanan dari rekomendasi desain lereng lebih besar dari 1,3 maka desain tersebut layak untuk diterapkan di lapangan.

Faktor Keamanan sebesar 1,314 mengidentifikasi kondisi yang stabil dimana tegangan geser yang dimobilisasi di sepanjang *slip surface* mendekati kekuatan geser, kondisi ini mencerminkan adanya keseimbangan gaya dan momen terpenuhi. Bidang longsor yang terbentuk cenderung mengikuti lapisan lemah (*weak layer*), yang memiliki kohesi dan sudut gesek rendah. Hal ini sesuai dengan analisis sensitivitas bahwa sudut gesek

adalah parameter dominan yang mengendalikan stabilitas. Hal ini juga sesuai dengan penelitian Haeriska, dkk. [7] dan Sesa, dkk. [13], bahwa zona yang kekuatan geser yang berkurang bertindak sebagai pemicu ketidakstabilan lereng batuan.



Gambar 13. Hasil perhitungan rekomendasi desain *cross section 2*.

Hasil analisis yang telah dilakukan pada penelitian kali ini, dilakukan perbandingan seluruh hasil faktor keamanan yang telah di rekapitulasi pada Tabel 4. Dimana pada Tabel tersebut terlihat penurunan nilai faktor keamanan pada *cross section 2* karena pada *cross section 2* ada lapisan lemah (*weak layer*) yang pada awal perhitungan tidak dianalisis, sehingga dilakukan rekomendasi desain lereng yang menyebabkan faktor keamanan lereng naik menjadi lebih stabil.

Tabel 4. Rekapitulasi seluruh hasil analisis yang dilakukan.

Analisis kestabilan lereng	Janbu	Morgenstern-Price
<i>Cross section 1 awal</i>	4,371	4,707
<i>Cross section 2 awal</i>	2,316	2,624
<i>Cross section 3 awal</i>	4,255	4,854
<i>Cross section 2 back analysis</i>	0,774	1,154
<i>Cross section 2 rekomendasi desain</i>	1,314	1,590

Kemudian dilakukan perbandingan faktor keamanan antara metode Janbu dan Morgenstern-Price dan didapatkan nilai rasio pada Tabel 5. Berdasarkan Tabel 5 diatas dengan mengitung rata-rata dari seluruh perbedaan hasil faktor keamanan yaitu, 7%, 11%, 12%, 30%, dan 17%, didapatkan bahwa metode Janbu memiliki faktor kemanan dengan nilai rata-rata 15% lebih rendah jika dibandingkan dengan metode Morgenstern-Price. Menurut Palermo, dkk. [12], menyatakan bahwa metode Janbu memiliki nilai faktor keamanan yang lebih rendah sebesar lebih dari 10% jika dibandingkan dengan nilai yang dihasilkan oleh metode Morgenstern-Price. Hal ini menunjukkan bahwa hasil perhitungan analisis kestabilan lereng metode Janbu pada penelitian ini memiliki perbedaan hasil yang lebih besar dengan perbedaan lebih dari

10% jika dibandingkan dengan metode Morgenstern-Price hasil penelitian terdahulu.

Metode Morgenstern-Price lebih teliti karena memenuhi keseimbangan gaya dan momen dan lebih cocok untuk kondisi lapisan batuan yang heterogen dan *slip surface* yang *non circular*. Sedangkan Metode Janbu keseimbangan momen tidak selalu terpenuhi sehingga hasil faktor aman bisa *underestimate*. Studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa metode Morgenstern-Price memberikan interaksi gaya antar irisan yang lebih komprehensif, termasuk komponen normal dan geser [14] sehingga memberikan faktor keamanan yang lebih andal dan konsisten, khusus untuk lereng dengan geometri kompleks dan bidang *longsor non circular* [1]. Lebih lanjut, hasil analisis numerik menunjukkan bahwa perbedaan asumsi keseimbangan dapat menyebabkan perbedaan hasil nilai faktor aman dimana metode Janbu sering memberikan hasil yang lebih konservatif dibanding dengan metode Morgenstern-Price [15].

Tabel 5. Rasio FK metode Janbu dan Morgenstern-Price

Analisis kestabilan lereng	Rasio FK Metode Janbu dan Morgenstern-Price
<i>Cross section 1 awal</i>	7% lebih rendah
<i>Cross section 2 awal</i>	11% lebih rendah
<i>Cross section 3 awal</i>	12% lebih rendah
<i>Cross section 2 back analysis</i>	30% lebih rendah
<i>Cross section 2 rekomendasi desain</i>	17% lebih rendah

4. KESIMPULAN

Dari hasil analisa data lapisan batu serta analisa kestabilan lereng menggunakan metode Janbu dan Morgenstern-Price maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- 1) Jenis batuan pada lokasi kajian berbeda tergantung dengan lokasi lapisan nya, lapisan *Overburden C* merupakan batuan pasir, lapisan *Overburden BC* merupakan batuan berlempung, *Overburden AB* merupakan batuan berlempung, *Overburden A1A2* merupakan lapisan batuan berlempung, *overburden A1* juga merupakan lapisan batuan berlempung.
- 2) Hasil analisa simulasi dengan metode Janbu didapatkan angka faktor keamanan untuk masing-masing *cross section* dengan nilai terendah sebesar 2,316 pada *cross section 2*. Dimana hasil tersebut tidak merepresentasikan keadaan aktual di lapangan sehingga perlu dilakukan *back analysis*.
- 3) Hasil dari *back analysis* menunjukkan bahwa lereng memiliki faktor keamanan dibawah 1,3

yaitu 1,154 dihitung dengan metode Morgenstern-Price dan 0,774 dengan menggunakan metode Janbu, hal ini disebabkan oleh adanya lapisan lemah (*weak layer*), dimana pada lapisan ini parameter kohesi dan sudut gesek nya rendah.

- 4) Rekomendasi perbaikan lereng dengan cara mengubah sudut *slope* menjadi 45⁰, lebar bench standar 13m, dan lereng setinggi 8m menghasilkan FK sebesar 1,590 dengan metode Morgenstern Price dan 1,314 dengan menggunakan metode Janbu.

REFERENSI

- [1] J. M. Duncan, S. G. Wright, and T. L. Brandon, *Soil Strength and Slope Stability*, 2nd ed. Wiley & Sons, 2014.
- [2] Q. Fan, J. Lin, W. Sun, J. Lu, and P. Chen, "Analysis of Landslide Stability Based on the Morgenstern-Price Method," *E3S Web of Conferences*, vol. 299, p. 02019, Aug. 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202129902019.
- [3] T. Utami and R. Kopa, "Analisis Efek Rembesan Air Sungai Lawai terhadap Kestabilan Rencana Lereng dengan Metode Morgenstern-Price pada Low Wall Tambang Air Laya Blok Barat PT. Bukit Asam Tbk, Tanjung Enim, Sumatera Selatan," *Jurnal Bina Tambang*, vol. 4, no. 2, p. 109, 2019.
- [4] Z. N. Salsabila, T. T. Putranto, and N. Najib, "Slope Stability Analysis for Slope Geometry Evaluation Using RMR, SMR, and Morgenstern-Price Methods in Pits C2 and C4 of PT Menara Cipta Mulia Mayang Block Open Pit Tin Mine, East Belitung Regency, Bangka Belitung Islands," *TEKNIK*, vol. 44, no. 2, pp. 176–187, Aug. 2023, doi: 10.14710/teknik.v44i2.57004.
- [5] C. A. . Kliche, *Rock slope stability*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2019.
- [6] M. Showkat, S. Ghani, P. Paramasivam, and M. Yusuf, "Automated slope stability assessment using modified Morgenstern-Price method and machine learning integration," *Sci. Rep.*, vol. 16, no. 1, Dec. 2026, doi: 10.1038/s41598-026-38670-w.
- [7] H. Haeriska, M. Chaerul, N. Desi, A. Muh. Y. Harun, E. Erniati, and I. Marzuki, "Evaluation of Slope Stability in Mining Areas Using the Morgenstern Price Method," *Journal La Multiapp*, vol. 6, no. 6, pp. 1347–1364, Oct. 2025, doi: 10.37899/journallamultiapp.v6i6.2540.
- [8] M. G. Anderson and K.S. Richards, *Slope stability: geotechnical engineering and geomorphology*. 1987.
- [9] R. Ferdinand, B. Setiawan, and R. Pebrianto, "Slope Stability Analisis of PIT X using The Morgenstern-Price Method and Dump Slope Rating (DSR)," *Dinamika Rekayasa*, vol. 21, no. 2, pp. 133–141, 2025, [Online]. Available: <http://jurnalDinarek.id>
- [10] P. Su, P. Qiu, B. Liu, W. Chen, and S. Su, "Stability prediction and optimal angle of high slope in open-pit mine based on two-dimension limit equilibrium method and three-dimension numerical simulation," *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 127, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.pce.2022.103151.
- [11] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*. 2010.
- [12] S. A. Palermo, V. C. Talarico, and M. Turco, "On the LID systems effectiveness for urban stormwater management: case study in Southern Italy," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 410, no. 1, p. 012012, Jan. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/410/1/012012.
- [13] H. Matius Sesa, N. Najib, H. Luthfi Dalimunthe, and Z. Handietri, "Slope Stability Evaluation and Geometrical Recommendation Using The Morgenstern Price Method," *J. Teknol.*, vol. 16, no. 1, p. 53, Jan. 2024, doi: 10.24853/jurtek.16.1.53-64.
- [14] A. Alok, A. Burman, P. Samui, M. R. Kaloop, and M. Eldessouki, "A Generalized Limit Equilibrium-Based Platform Incorporating Simplified Bishop, Janbu and Morgenstern-Price Methods for Soil Slope Stability Problems," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2024, no. 1, 2024, doi: 10.1155/2024/3053923.
- [15] W. Ouyang, S. Liu, K. Liu, and J. Yin, "Efficient numerical implementation of limit equilibrium method for stability analysis of unsaturated soil slopes using Gaussian integral," *Acta Geotech.*, vol. 19, no. 9, pp. 5933–5945, Sep. 2024, doi: 10.1007/s11440-024-02268-1.