

Analisis Kestabilan Lereng pada Lereng Akhir Penambangan PT. Koto Alam Sejahtera Kecamatan Pangkalan Koto Baru Kabupaten Lima Puluh Kota Provinsi Sumatera Barat

Alvin Iranto Purnnama^{1*}, Raimon Kopa¹

¹Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang, Indonesia

*alvin.hasna24@gmail.com

**raimon_unp@yahoo.co.id

Abstract. PT. Koto Alam Sejahtera is a private company engaged in the mining of andesite stone with open pit mining with quarry method. The mining activity forms a final slope whose stability is not yet known. In addition, the presence of weak areas on the final mining slope can weaken the rock mechanical parameters and there are fractures and water seepage on the slope which has a slope angle of 81° with a slope height of 12.343m. Therefore, it is necessary to have an analysis of the stability of the slopes at that location to prevent landslides. In this study, the analysis used was kinematic analysis with dips's software and slope stability analysis using Morgenstern-Price method. Based on the results of kinematic analysis, the percentage value of potential landslides that occurred at the research location was the type landslide which had a landslide Flexural Toppling potential of 18,27%. Based on the analysis of the safety factor (FK) of the slope using Morgenstern-Price method, it shows that the final slope of mining is in a critical condition (FK <1.0) with a FK value of 0.894 in saturated conditions. Therefore, changes in slope geometry were made to obtain safe conditions (FK > 1.3) by reducing the slope angle from 81° to 60° so that the FK value was 1.326.

Keywords: Quarry mining, kinematic analysis, Morgenstern-Price method, FK (safety factor)

1. Pendahuluan

PT. Koto Alam Sejahtera (PT. KAS) merupakan salah satu perusahaan swasta yang bergerak di bidang pertambangan andesit dengan menggunakan metode penambangan *quarry*. Perusahaan ini terletak di daerah Jorong Polong Duo Kenagarian Koto Alam Kecamatan Pangkalan Koto Baru Kabupaten Lima Puluh Kota Provinsi Sumatera Barat.

Adanya kegiatan penambangan, seperti peledakan, penggalian dan pengangkutan batuan pada lereng membentuk lereng akhir yang belum diketahui kestabilannya sehingga dapat menimbulkan kekhawatiran akan bahaya longsor. Longsornya lereng pada suatu jenjang dimana berdekatan dengan jalan angkut dan peralatan tambang, dapat menimbulkan gangguan pada aktivitas penambangan di PT. Koto Alam Sejahtera.

Adanya bidang-bidang lemah atau discontinuitas pada lereng akhir penambangan yang dapat melemahkan parameter mekanik batuan. Hal yang terpenting dalam

bidang discontinuitas adalah pengaruh tekanan air yang berada pada rekahan. Selain adanya rembesan air bidang discontinuitas tersebut, rekahan juga akan terisi oleh material pengisi yang dapat memisahkan dua sisi batuan, batuan tersebut akan mempunyai kuat geser yang kecil untuk menahan potensi longsor.

Terdapat longsor batuan andesit dari lereng akhir penambangan sebagai akibat adanya bidang lemah yang mengganggu aktivitas pengangkutan batuan, membahayakan jiwa dan dapat merusak peralatan penambangan. Salah satu bentuk longsor yang terjadi pada lereng akhir penambangan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Longsoran pada Lereng Akhir

Selain itu, belum adanya analisis kestabilan lereng pada lereng akhir penambangan dapat membuat lereng tersebut menjadi kurang aman untuk dilalui alat angkut. Oleh sebab itu, perlu dibuat rancangan lereng untuk menghindari apabila terjadi longsor pada lereng akhir penambangan yang lain.

Berdasarkan hasil observasi yang dilakukan, terdapat beberapa rekahan dan rembesan air yang berpotensi terjadinya longsor pada lereng akhir penambangan dimana memiliki sudut kemiringan lereng yaitu 81° dengan tinggi lereng 12,343 m.

2. Kajian Pustaka

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi administratif PT. Koto Alam Sejahtera berada di Jorong Polong Duo Nagari Koto Alam, Kecamatan Pangkalan Koto Baru, Kabupaten Lima Puluh Kota, Sumatera Barat. Secara umum lokasi geografis PT. Koto Alam Sejahtera berada diantara $0^\circ 0' 35,7''$ LU sampai $0^\circ 0' 48,5''$ LU dan $100^\circ 43' 49,4''$ BT sampai $100^\circ 43' 58,6''$ BT. Lokasi penambangan PT. KAS berdasarkan penelusuran menggunakan Software Google Earth Pro dapat di lihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Lokasi Penambangan PT. KAS

2.2 Dasar Teori

2.2.1. Kestabilan Lereng

Lereng merupakan bagian dari permukaan bumi yang berbentuk miring. Sedangkan kestabilan lereng merupakan suatu kondisi atau keadaan yang mantap/stabil terhadap suatu bentuk dan dimensi lereng (Duncan, et al, 2004).

Apabila kestabilan dari suatu lereng dalam operasi penambangan meragukan, maka kestabilannya harus dinilai berdasarkan dari struktur geologi, kondisi air tanah dan faktor pengontrol lainnya yang terjadi pada suatu lereng. Kestabilan lereng pada batuan dipengaruhi oleh geometri lereng, struktur batuan, sifat fisik dan mekanik batuan serta gaya-gaya luar yang bekerja pada lereng tersebut.

Untuk menyatakan/memberikan bobot (tingkat) kestabilan suatu lereng dikenal istilah faktor keamanan (safety factor). Faktor keamanan diperlukan untuk mengetahui kemantapan suatu lereng dalam mencegah bahaya longsor di waktu-waktu yang akan datang. Faktor ini merupakan perbandingan antara gaya penahan yang membuat lereng tetap stabil, dengan gaya penggerak yang menyebabkan terjadinya longsor.

Secara sistematis faktor keamanan suatu lereng dapat ditulis dengan rumus sebagai berikut menurut Hoek and Bray (1991) dalam (Irwandy Arif, 2016:215) [3].

$$FK = \frac{\Sigma \text{Gaya Penahan}}{\Sigma \text{Gaya Penggerak}}$$

Dengan ketentuan, jika:

$FK > 1,0$; Lereng dalam kondisi stabil.

$FK < 1,0$; Lereng tidak stabil.

$FK = 1,0$; Lereng dalam kondisi kritis.

2.2.2. Jenis-Jenis Longsoran Lereng Penambangan

2.2.2.1 Longsoran Busur (Circular Failure)

Longsoran busur hanya terjadi pada tanah atau material yang bersifat seperti tanah. Longsoran busur juga dapat terjadi pada batuan yang sangat lapuk serta banyak mengandung bidang lemah maupun tumpukan (timbunan) batuan hancur.

2.2.2.2 Longsoran Bidang (Plane Failure)

Longsoran bidang merupakan suatu longsoran batuan yang terjadi sepanjang bidang lurus yang dianggap rata. Bidang lurus tersebut dapat berupa sesar, kekar (*Joint*) maupun bidang pelapisan batuan.

2.2.2.3 Longsoran Biji (Wedge Failure)

Longsoran biji dapat terjadi pada suatu batuan jika terdapat lebih dari satu bidang lemah yang bebas dan saling berpotongan. Sudut perpotongan antara bidang lemah tersebut harus lebih besar dari sudut geser dalam batumannya.

2.2.2.4 Longsoran Guling (Toppling)

Longsoran guling terjadi apabila bidang-bidang lemah yang hadir di lereng mempunyai kemiringan yang berlawanan dengan kemiringan lereng dimana struktur bidang lemahnya berbentuk kolom.

2.2.3. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kestabilan Lereng

2.2.3.1 Faktor-faktor Pembentuk Gaya Penahan

1. Jenis Batuan
2. Kekuatan Batuan
3. Penyebaran Batuan

2.2.3.2 Faktor-faktor Pembentuk Gaya Penggerak

1. Sudut Lereng dan Tinggi Lereng (Geometri Lereng)
2. Bobot Isi
3. Kandungan Air Tanah (u)

2.2.3.3 Ketidaksesuaian Pengeboran

1. Proses Pelapukann
2. Bidang Lemah
3. Iklim
4. Air

2.2.3.4 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Gaya Penggerak

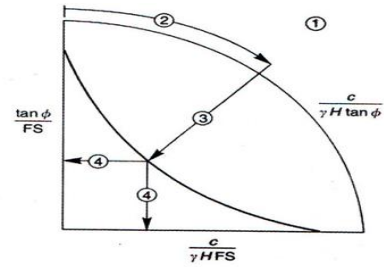
1. Aktivitas Tektonik
2. Gempa atau Sumber Getaran yang lain
3. Penambahan Beban Akibat Penimbunan
4. Penambahan Air Tanah
5. Pengeringan Waduk

2.2.4. Metode Grafis Hoek and Bray

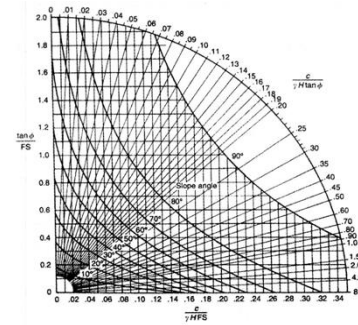
Metode Hoek and Bray adalah salah satu metode grafik yang menggambarkan lima buah pola aliran tanah dari kondisi kering sampai kondisi jenuh.

Hoek and Bray membuat 5 buah diagram untuk tiap-tiap kondisi air tanah tertentu, mulai dari sangat kering hingga jenuh. Cara perhitungannya adalah sebagai berikut [6]:

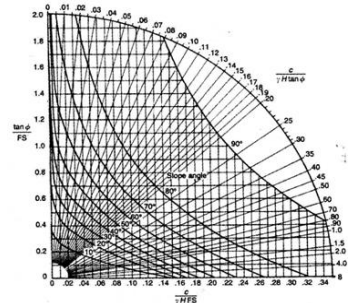
1. Langkah 1 : Twntukanlah kondisi air tanah yang ada dan sesuaikan dengan gambar untuk memilih diagram yang akan digunakan. Pilih yang tepat atau yang mendekati.
2. Langkah 2 : Hitung angka $c/(\gamma H \tan \phi)$, kemudian cocokkan angka tersebut pada lingkaran terluar dari diagram (chart) yang dipilih.
3. Langkah 3 : Ikuti jari-jari mulai dari angka yang diperoleh pada langkah 2 sampai memotong kurva yang menunjukkan kemiringan lereng.
4. Langkah 4 : Dari titik pada langkah 3, kemudian ditarik kekiri dan ke bawah untuk mencari angka-angka $\tan \phi / FS$ dan $c/(\gamma.H.FS)$.
5. Langkah 5 : Hitung faktor keamanan (FS) dari kedua angka yang diperoleh dari langkah 4 dan pilih yang paling tepat. Seperti pada gambar di bawah ini.



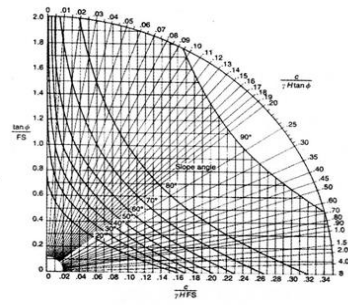
Gambar 3. Diagram Cara Menghitung Kestabilan Lereng Untuk Circular Failure (Hoek and Bray 1981)



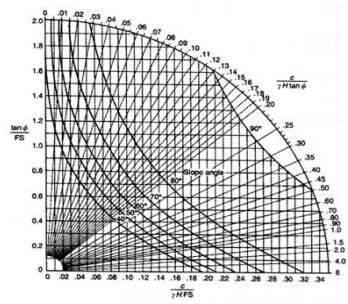
Gambar 4. Kondisi Nomor 1 Air Tanah, Circular Failure (Hoek and Bray, 1981)



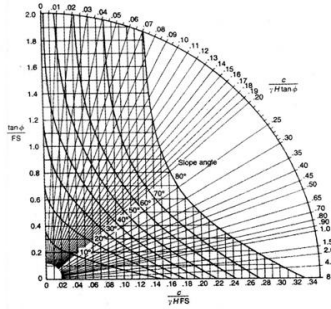
Gambar 5. Kondisi Nomor 2 Air Tanah, Circular Failure (Hoek and Bray, 1981)



Gambar 6. Kondisi Nomor 3 Air Tanah, Circular Failure (Hoek and Bray, 1981)



Gambar 7. Kondisi Nomor 4 Air Tanah, Circular Failure (Hoek and Bray, 1981)



Gambar 8. Kondisi nomor 5 air tanah, Circular Failure (Hoek and Bray, 1981)

2.2.5. Metode Kesetimbangan Batas (Morgenstern-Price)

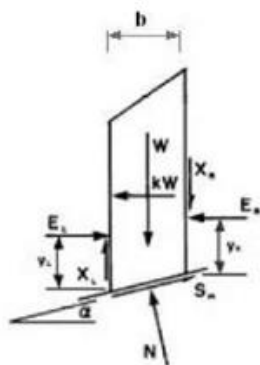
Metode kesetimbangan batas adalah metode yang cukup populer dan praktis dalam analisis kestabilan, dengan kondisi kestabilan dinyatakan dalam indeks faktor keamanan, yaitu dengan menghitung kesetimbangan gaya atau kesetimbangan momen, atau keduanya tergantung dari metode perhitungan yang dipakai.

Salah satu metode kesetimbangan batas yang umum digunakan pada penelitian yaitu metode *Morgenstern-Price*. Metode ini dikembangkan terlebih dahulu daripada metode kesetimbangan batas umum. Metode ini dapat digunakan untuk semua bentuk bidang runtuh dan telah memenuhi semua kondisi kesetimbangan [7].

Metode *Morgenstern-Price* menggunakan asumsi yang sama dengan metode kesetimbangan batas umum yaitu terdapat hubungan antara gaya geser antar-irisan dan gaya normal antar-irisan, yang dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut [1,2]:

$$X = \lambda f(x)E$$

Bentuk beberapa fungsi f(x) yang dapat digunakan dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Gaya-gaya yang bekerja pada setiap irisan (Metode *Morgenstern-Price*)

Definisi dari variabel-variabel pada gambar di atas adalah sebagai berikut:

- W = Berat total irisan.
- N = Gaya normal total pada dasar irisan.
- S_m = Gaya geser pada dasar irisan yang diperlukan agar irisan berada dalam kondisi tepat setimbang.
- E = Gaya antar-irisan horizontal; titik bawah L dan R menunjukkan masing-masing untuk sebelah kiri dan kanan dari irisan.

- X = Gaya antar-irisan Vertikal; titik bawah L dan R menunjukkan masing-masing untuk sebelah kiri dan kanan dari irisan.
- kW = Gaya seismik horisontal yang bekerja pada pusat massa irisan, dimana k adalah koefisien seismik.
- R = Radius lingkaran untuk bidang runtuh busur lingkaran; atau lengan momen dari gaya geser S_m terdapat pusat momen untuk bidang runtuh yang bukan busur lingkaran.
- f = Jarak tegak lurus dari gaya normal N terhadap pusat momen.
- x = Jarak horisontal dari pusat massa irisan terhadap pusat momen.
- e = Jarak vertical dari pusat massa irisan terhadap pusat momen.
- h = Tinggi rata-rata irisan.
- b = Lebar irisan.
- β = Panjang dasar irisan [$\beta = b \sec \alpha$]
- a = Jarak vertical dari gaya hidrostatik terhadap pusat momen.
- A = Gaya hidrostatik pada retakan Tarik.
- λ = Faktor skala
- α = Sudut kemiringan dari garis singgung pada titik di tengah dasar irisan terhadap bidang horisontal. Sudut kemiringan bernilai positif apabila searah dengan kemiringan lereng dan bernilai negative apabila berlawanan dengan kemiringan lereng.

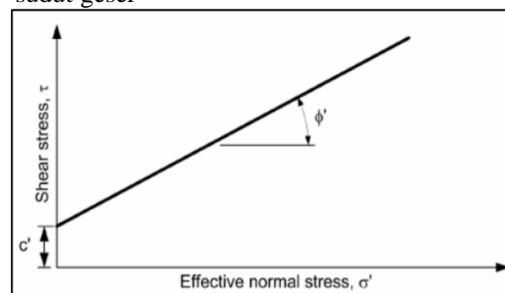
2.2.6. Persamaan Mohr-Coulomb

Pada umumnya dalam analisis kestabilan lereng digunakan persamaan *Mohr-Coulomb* untuk menyatakan kekuatan geser material. Menurut kriteria *Mohr-Coulomb*, kekuatan geser material terdiri dari dua komponen yaitu kohesi dan sudut gesek dapat dilihat pada Gambar 22. Persamaan *Mohr-Coulomb* dalam bentuk tegangan efektif adalah sebagai berikut:

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi$$

Dimana :

- τ = tegangan geser
- C = kohesi
- σ' = tegangan normal efektif
- ϕ = sudut geser



Gambar 10. Ilustrasi Kekuatan Geser Mohr-Coulomb

2.2.7. Dasar Hukum Geoteknik Tambang

Dasar hukum dalam kestabilan lereng berpedoman terhadap Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1827 K/30/MEM/2018.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini lebih terarah ke penelitian terapan (*Applied Research*), yaitu suatu kegiatan yang sistematis dan logis bertujuan untuk menemukan sesuatu yang baru serta mengaplikasikan teori yang didapat selama perkuliahan terhadap kondisi aktual lapangan.

Penelitian dilakukan di lereng akhir penambangan tambang andesit PT. Koto Alam Sejahtera pada bulan Maret 2020. Adapun kegiatan penelitian meliputi, orientasi lapangan, pengumpulan referensi dan data, pengolahan data, konsultasi dan bimbingan, penyusunan laporan dan pengumpulan draft penelitian.

Data yang digunakan yaitu data primer dan data sekunder. Dimana data primer yang digunakan seperti, geometri lereng (tinggi lereng dan sudut kemiringan lereng), data *Diskontinuitas* dan data fisik dan mekanik batuan. Data sekunder yang digunakan yaitu, Peta lokasi kesampaian daerah, peta topografi, peta geologi dan data sifat mekanik batuan.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Uji Sifat Fisik Batuan

Berdasarkan hasil pengujian sifat fisik batuan di laboratorium, didapatkan data yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Hasil Uji Sifat Fisik

No Sampel	Berat Normal (Wn) (gr)	Berat Jenuh (Ww) (gr)	Berat Menggantung (Ws) (gr)	Berat Kering (Wo) (gr)
1	10,08	10,32	6,46	9,93
2	21,6	21,74	13,49	21,14
3	11,43	11,53	7,16	11,13
4	8,08	8,15	5,04	7,88

Berdasarkan data yang terdapat pada Tabel 1, dapat dilakukan perhitungan bobot isi asli, bobot isi kering, dan bobot isi jenuh sebagai berikut:

1. Bobot Isi Asli

$$\gamma_n = \frac{W_n}{W_w - W_s} = \frac{10,08 \text{ gr}}{(10,32 - 6,46) \text{ cm}^3} = 2,61 \text{ gr/cm}^3$$

2. Bobot Isi Kering

$$\gamma_d = \frac{W_o}{W_w - W_s} = \frac{9,93 \text{ gr}}{(10,32 - 6,46) \text{ cm}^3} = 2,57 \text{ gr/cm}^3$$

3. Bobot Isi Jenuh

$$\gamma_s = \frac{W_w}{W_w - W_s} = \frac{10,32 \text{ gr}}{(10,32 - 6,46) \text{ cm}^3} = 2,67 \text{ gr/cm}^3$$

Perhitungan yang sama juga dilakukan terhadap 3 sampel lainnya dan hasil perhitungan di atas dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Hasil Analisis Uji Sifat Fisik

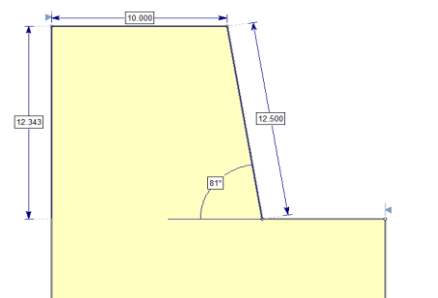
No Sampel	Berat Normal (Wn)	Berat Jenuh (Ww)	Berat Menggantung (Ws)	Berat Kering (Wo)	Bobot Isi Natural (γ_n) gr/cm ³	Bobot Kering (γ_d) gr/cm ³	Bobot Jenuh (γ_s) gr/cm ³
1	10,08	10,32	6,46	9,93	2,61	2,57	2,67
2	21,6	21,74	13,49	21,14	2,62	2,56	2,64
3	11,43	11,53	7,16	11,13	2,62	2,55	2,64
4	8,08	8,15	5,04	7,88	2,60	2,53	2,62
Jumlah					10,44	10,22	10,57
Rata-rata					2,61	2,55	2,64

4.2 Geometri Lereng

Hasil pengambilan data geometri lereng pada PT. Koto Alam Sejahtera didapatkan tinggi lereng 12,343 m dengan sudut lereng 81°.



Gambar 11. Kondisi Lereng



Gambar 12. Geometri Lereng Akhir penambangan PT. KAS

4.3 Uji Geser Langsung

Berdasarkan hasil uji geser langsung batuan di laboratorium didapatkan data sebagai berikut:

1. Sampel 1:
 - Sisi (cm) : 5,982
 - Sisi (cm) : 5,751
 - Luas (cm²) : 34,402
2. Sampel 2:
 - Sisi (cm) : 6,012
 - Sisi (cm) : 5,926
 - Luas (cm²) : 35,627
3. Sampel 3:
 - Sisi (cm) : 6,074
 - Sisi (cm) : 5,956
 - Luas (cm²) : 36,177

Data hasil pengujian uji geser langsung sampel batuan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Hasil Uji Geser Langsung

No Sampel	Beban Normal (kN)	Tegangan Residu (kN)
1	1,5	0,9
2	3	1,8
3	4,5	2,4

Berdasarkan data yang terdapat pada Tabel 3, dilakukan perhitungan menggunakan rumus seperti di dasar teori:

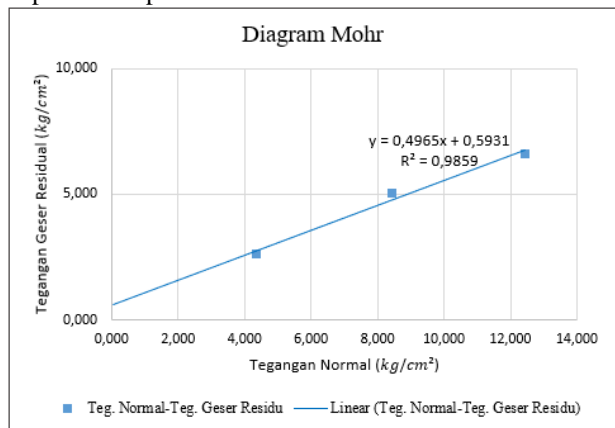
1. Tegangan Normal (σ_n)
 $P_n = 1,5 \text{ kN} = 150 \text{ kg}$
 $A = 5,982 \text{ cm} \times 5,751 \text{ cm} = 34,404 \text{ cm}^2$
 $\sigma_n = \frac{P_n}{A} = \frac{150 \text{ kg}}{34,404 \text{ cm}^2} = 4,360 \text{ kg/cm}^2$
2. Tegangan Residu (σ_R)
 $P_R = 0,9 \text{ kN} = 90 \text{ kg}$
 $A = 5,982 \text{ cm} \times 5,751 \text{ cm} = 34,404 \text{ cm}^2$
 $\sigma_R = \frac{P_n}{A} = \frac{90 \text{ kg}}{34,404 \text{ cm}^2} = 2,620 \text{ kg/cm}^2$

Perhitungan yang sama juga dilakukan terhadap 2 sampel lainnya dan hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Analisis Uji Geser Langsung

No Sampel	Tegangan Normal (σ_n)	Tegangan Geser Residu (σ_R)
	Kg/cm ²	Kg/cm ²
1	4,360	2,620
2	8,420	5,050
3	12,440	6,630

Dari hasil analisis didapatkan diagram Mohr yang dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Diagram Mohr Uji Geser Langsung

Untuk memperoleh nilai kohesi (C) dan sudut geser dalam dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi$$

Keterangan :

- τ = tegangan geser
- C = kohesi
- σ' = tegangan normal efektif
- ϕ = sudut geser

Sehingga, berdasarkan persamaan garis pada Gambar 14 diketahui:

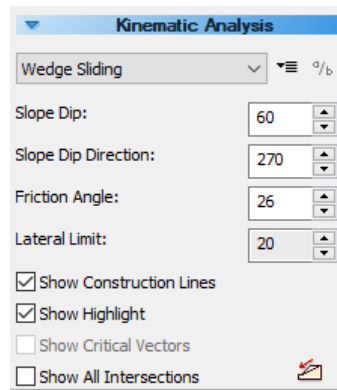
$$\begin{aligned} \text{Tegangan geser } (\tau) &= y \\ \text{Tegangan normal efektif } (\sigma') &= x \\ \text{Tan } \phi &= 0,4965 \\ C &= 0,5931 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 0,5931 \times \frac{98,0665 \text{ kN}}{m} \\ &= 58,16324115 \text{ kN/m}^2 \\ \text{Sudut Geser dalam } (\phi) &= \tan^{-1} \times 0,495 \\ &= 26,404^\circ \end{aligned}$$

4.4 Analisis Kinematik Jenis Longsoran

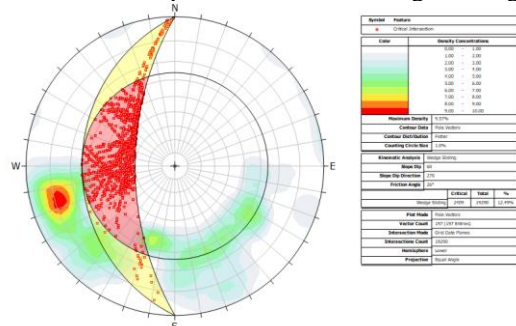
Analisis jenis longsoran dilakukan untuk mendapatkan jenis longsoran yang akan terjadi pada lereng penelitian. Pada penelitian ini, analisis secara kinematik menggunakan software dips.

4.4.1. Analisis Kinematik untuk Longsoran Baji (Wedge Failure)

Pada software dips, untuk mendapatkan presentase longsoran baji, input data kinematik analisis dengan memilih menu analisis kemudian pilih kinematic analysis jenis wedge sliding dan masukkan data dip, dip direction dan sudut geser dalam. Adapun hasil input dan output untuk longsoran wedge dapat dilihat pada Gambar 14 dan Gambar 15.



Gambar 14. Input Data Analisis Wedge Sliding

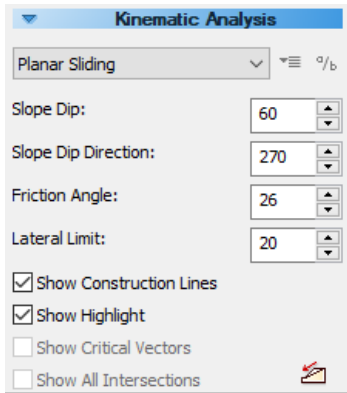


Gambar 15. Output Kinematik Analisis Jenis Wedge Sliding

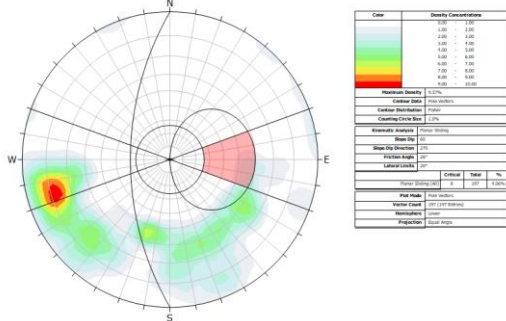
Berdasarkan gambar di atas didapatkan hasil bahwa titik-titik intersections yang berada pada zona longsoran baji dengan presentase longsor sebesar 12,49%.

4.4.2. Analisis Kinematik untuk Longsoran Bidang (Plane Failure)

Sedangkan untuk mendapatkan presentase longsoran Bidang, input data kinematik analisis dengan memilih menu analisis kemudian pilih kinematic analysis jenis Planar Sliding dan masukkan data dip, dip direction dan sudut geser dalam. Adapun hasil input dan output untuk longsoran Planar dapat dilihat pada Gambar 16 dan Gambar 17.



Gambar 16. Input Data Analisis Planar Sliding

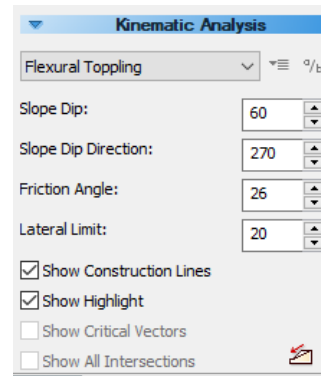


Gambar 17. Output Kinematik Analisis Jenis Planar Sliding

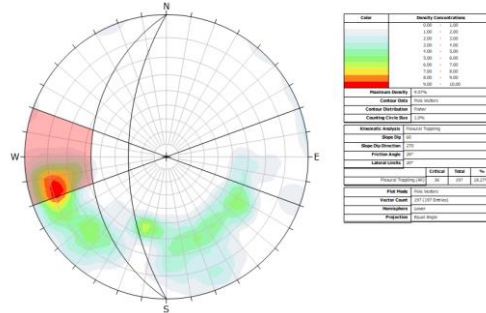
Berdasarkan gambar di atas didapatkan hasil bahwa titik-titik intersections yang berada pada zona longsoran bidang dengan presentase longsor sebesar 4,06%.

4.4.3. Analisis Kinematik untuk Longsoran Guling (Toppling Failure) jenis Flexural Toppling

Untuk mendapatkan presentase longsoran Guling jenis Flexural Toppling, input data kinematik analisis dengan memilih menu analisis kemudian pilih kinematic analysis jenis Flexural Toppling dan masukkan data dip, dip direction dan sudut geser dalam. Adapun hasil input dan output untuk longsoran Flexural Toppling dapat dilihat pada Gambar 18 dan Gambar 19.



Gambar 18. Input Data Analisis Flexural Toppling

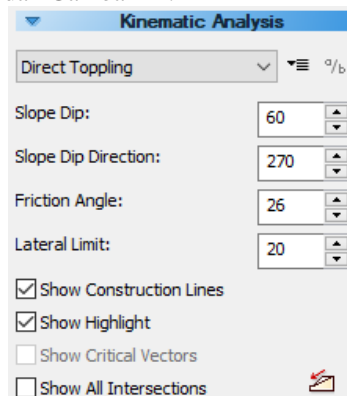


Gambar 19. Output Kinematik Analisis Jenis Flexural Toppling

Berdasarkan gambar di atas didapatkan hasil bahwa titik-titik intersections yang berada pada zona longsoran guling dengan presentase longsor sebesar 18,27%.

4.4.4. Analisis Kinematik untuk Longsoran Guling (Toppling Failure) jenis Direct Toppling

Untuk mendapatkan presentase longsoran Guling jenis Direct Toppling, input data kinematik analisis dengan memilih menu analisis kemudian pilih kinematic analysis jenis Direct Toppling dan masukkan data dip, dip direction dan sudut geser dalam. Adapun hasil input dan output untuk longsoran Direct Toppling dapat dilihat pada Gambar 20 dan Gambar 21.



Gambar 20. Input Data Analisis Direct Toppling

4.5.2 Analisis Kestabilan lereng dengan Metode *Hoek & Bray*

Analisis kestabilan lereng juga dilakukan secara manual yaitu dengan metode Hoek & Bray yang bertujuan untuk membandingkan hasil analisis faktor keamanan antara program Slide dengan cara manual. Perhitungan manual dilakukan dengan menggunakan parameter kondisi setengah jenuh/natural dan kondisi jenuh (*Chart 3* dan *Chart 5*).

4.5.2.1 Perhitungan untuk Sudut Lereng 81°.

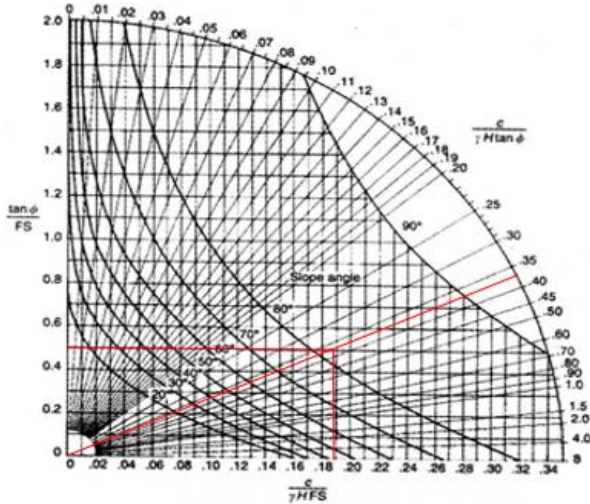
1) Kondisi Setengah Jenuh (*Chart 3*)

Analisis kestabilan lereng dalam kondisi setengah jenuh menggunakan parameter batuan dari hasil analisis sifat fisik dan mekanik batuan.

Diketahui:

- Tinggi Lereng (H) = 12,343 meter
- Kemiringan Lereng (α) = 81°
- Bobot Isi (γ) = 25,59 kN/m³
- Kohesi (C) = 58,16324115 kN/m²
- Sudut Geser Dalam (φ) = 26,404°

$$\frac{c}{\gamma \times H \times \tan \phi} = \frac{58,16324115}{25,59 \times 12,343 \times \tan 26,404} = 0,37$$



Gambar 25. Chart 3 FK Lereng Kondisi Setengah Kering

$$\frac{c}{\gamma \times H \times Fs} = 0,189$$

$$0,189 = \frac{58,16324115}{25,03 \times 12,343 \times Fs}$$

$$Fs = \frac{58,16324115}{25,03 \times 12,343 \times 0,189}$$

$$Fs = \frac{58,16324115}{59,69704293}$$

$$Fs = 0,974$$

$$\frac{\tan \phi}{Fs} = 0,5$$

$$\frac{\tan 26,404}{0,5} = Fs$$

$$Fs = 0,9929 \approx 0,993$$

Berdasarkan analisis menggunakan metode grafis *hoek and bray* diperoleh nilai Faktor Keamanan dengan

kondisi lereng setengah jenuh (*chart 3*) pada nilai kritisnya adalah $0,993 < 1,3$ yang berarti lereng dalam kondisi tidak aman.

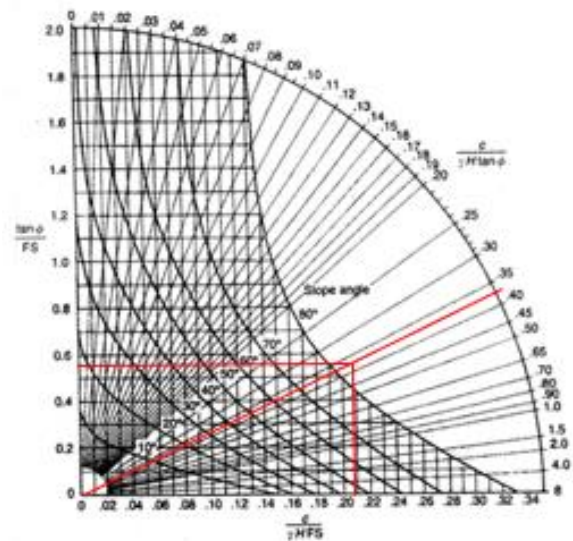
2) Dalam Keadaan Jenuh (*Chart 5*)

Analisis kestabilan lereng dalam kondisi jenuh untuk sudut kemiringan lereng 81° digunakan parameter batuan dari hasil analisis sifat fisik dan mekanik batuan.

Diketahui:

- Tinggi Lereng (H) = 12,343 meter
- Kemiringan Lereng (α) = 81°
- Bobot Isi (γ) = 25,89 kN/m³
- Kohesi (C) = 58,16324115 kN/m²
- Sudut Geser Dalam (φ) = 26,404°

$$\frac{c}{\gamma \times H \times \tan \phi} = \frac{58,16324115}{25,89 \times 12,343 \times \tan 26,404} = 0,37$$



Gambar 26. Chart 5 FK Lereng Kondisi Jenuh

$$\frac{c}{\gamma \times H \times Fs} = 0,27$$

$$0,27 = \frac{58,16324115}{25,89 \times 12,343 \times Fs}$$

$$Fs = \frac{58,16324115}{25,89 \times 12,343 \times 0,27}$$

$$Fs = \frac{58,16324115}{86,2812729}$$

$$Fs = 0,674$$

$$\frac{\tan \phi}{Fs} = 0,56$$

$$\frac{\tan 26,404}{0,56} = Fs$$

$$Fs = 0,887$$

Berdasarkan analisis menggunakan metode grafis *hoek and bray* diperoleh nilai Faktor Keamanan dengan kondisi lereng jenuh (*chart 5*) pada nilai kritisnya adalah $0,887 < 1,3$ yang berarti lereng berada dalam kondisi tidak aman.

Dari hasil analisis kestabilan lereng didapatkan bahwa lereng memiliki nilai faktor keamanan lereng aktual yang dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Nilai Faktor Keamanan Lereng Aktual Metode Morgenstern-Price

Metode	Tinggi	Sudut	Nilai FK	
			Natural	Jenuh
Morgenstern-Price	12,343 m	81°	1,205	0,894
Hoek & Bray	12,343 m	81°	0,993	0,841

Berdasarkan hasil analisis kestabilan lereng pada akhir penambangan, terlihat bahwa lereng memiliki nilai faktor keamanan (FK) <1,3 dalam keadaan jenuh yang artinya lereng tersebut dalam kondisi tidak aman sehingga memungkinkan terjadinya longsor disekitar lereng.

4.6 Modifikasi Geometri Lereng dengan Metode Morgenstern-Price

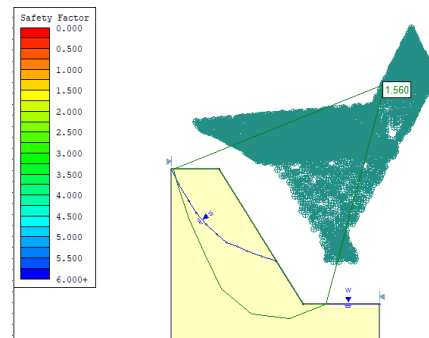
Salah satu cara untuk meningkatkan kestabilan lereng yaitu dengan metode geometri. Metode geometri merupakan usaha untuk meningkatkan kestabilan lereng dengan cara merubah geometri lereng. Perubahan geometri lereng bisa dengan pengurangan lereng, pembuatan berm dan menggali di bagian atas dan menimbun di bagian bawah sambil mengurangi kemiringan lereng (Harry Christady, 2010)

Perbaikan stabilitas lereng dilakukan dengan cara mengambil kondisi terburuk lereng atau saat nilai faktor keamanan lereng paling rendah. Adapun simulasi perbaikan lereng dilakukan dengan mengurangi kemiringan lereng mulai dari sudut kemiringan lereng 80° sampai mendapatkan nilai FK >1,3 atau lereng dalam kondisi aman. Parameter yang digunakan untuk mensimulasikan perbaikan lereng menggunakan data sifat fisik dan data mekanik batuan hasil pengujian. Adapun nilai faktor keamanan dari hasil modifikasi dapat dilihat pada **Tabel 7**.

Dari data hasil modifikasi, penulis memberikan rekomendasi faktor keamanan lereng stabil yaitu dengan memperkecil sudut kemiringan lereng menjadi 60° pada kondisi jenuh dengan nilai faktor keamanan lereng 1,326 yang artinya lereng tersebut dalam kondisi aman. Bentuk analisis faktor keamanan dapat dilihat pada **Lampiran F** dan salah satu analisis faktor keamanan yang dibuat yaitu sudut lereng 60° sebagai berikut.

4.6.1. Faktor Keamanan dengan Sudut Lereng 60° Kondisi Natural

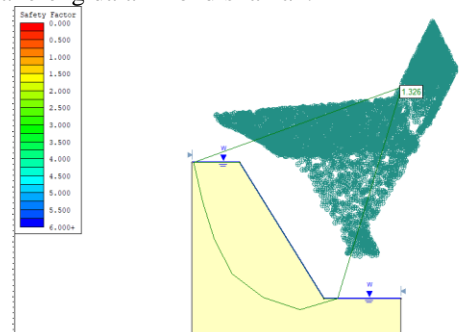
Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan software slide 6.0 dengan memodifikasi geometri lereng dalam kondisi natural dengan tinggi 12,343 m dengan sudut lereng menjadi 60°, didapatkan nilai FK 1,560 yang artinya lereng dalam kondisi aman



Gambar 29. Faktor Keamanan Lereng dengan Sudut Lereng 60° Kondisi Natural

4.6.2. Faktor Keamanan dengan Sudut Lereng 60° Kondisi Jenuh

Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan software slide 6.0 dengan memodifikasi geometri lereng dalam kondisi jenuh dengan tinggi 12,343 m dengan sudut lereng menjadi 60°, didapatkan nilai FK 1,326 yang artinya lereng dalam kondisi aman.



Gambar 30. Faktor Keamanan Lereng dengan Sudut Lereng 60° Kondisi Jenuh

Berdasarkan hasil modifikasi pada lereng di Akhir penambangan dengan melakukan perubahan pada geometri lereng yaitu mengurangi sudut kemiringan lereng, penulis mendapatkan nilai hasil modifikasi sudut kemiringan lereng tunggal menjadi 60° dimana nilai faktor keamanan lereng yang dihasilkan berada dalam kondisi aman. Hasil modifikasi lereng beserta nilai faktor keamanan lereng dengan kondisi natural maupun jenuh dapat dilihat pada Tabel 7.

4.7 Modifikasi Geometri Lereng dengan Metode Morgenstern-Price

Dilakukan perhitungan secara manual untuk membandingkan hasil analisis dengan menggunakan software Slide. Perhitungan secara manual menggunakan metode Hoek & Bray dengan menggunakan parameter kondisi setengah jenuh dan kondisi jenuh (*chart 3 dan chart 5*). Adapun perhitungan secara manual yang dilakukan yaitu pada sudut kemiringan 80° dan 60°.

4.7.1. Perhitungan untuk sudut lereng 80°.

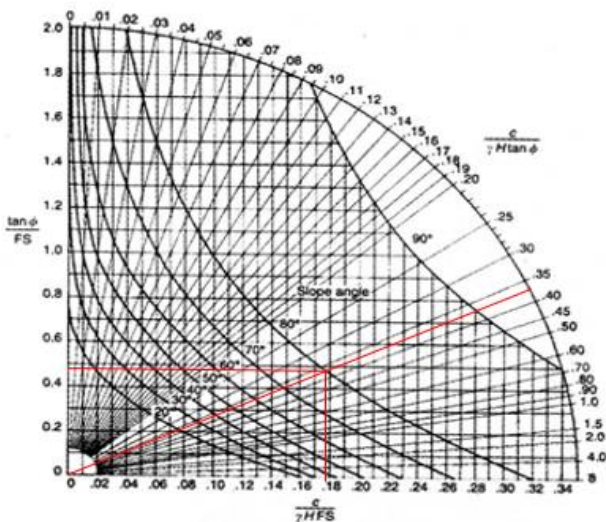
1) Kondisi Setengah Jenuh (Chart 3)

Analisis kestabilan lereng dalam kondisi setengah jenuh menggunakan parameter batuan dari hasil analisis sifat fisik dan mekanik batuan.

Diketahui:

- Tinggi Lereng (H) = 12,343 meter
- Kemiringan Lereng (α) = 80°
- Bobot Isi Natural(γ) = 25,59 kN/m³
- Kohesi (C) = 58,16324115 kN/m²
- Sudut Geser Dalam (Ø) = 26,404°

$$\frac{c}{\gamma \times H \times \tan \phi} = \frac{58,16324115}{25,59 \times 12,343 \times \tan 26,404} = 0,37$$



Gambar 31. Chart 3 Modifikasi Geometri FK Lereng Kondisi Setengah Jenuh

$$\frac{c}{\gamma \times H \times F_s} = 0,178$$

$$0,189 = \frac{58,16324115}{25,59 \times 12,343 \times F_s}$$

$$F_s = \frac{58,16324115}{25,59 \times 12,343 \times 0,178}$$

$$F_s = \frac{58,16324115}{56,22261186}$$

$$F_s = 1,034$$

$$\frac{\tan \phi}{F_s} = 0,48$$

$$\frac{\tan 26,404}{0,48} = F_s$$

$$F_s = 1,03$$

Berdasarkan analisis menggunakan metode grafis *hoek and bray* diperoleh nilai Faktor Keamanan dengan kondisi lereng setengah jenuh (*chart 3*) pada nilai kritisnya adalah 1,03 < 1,3 yang berarti lereng berada dalam kondisi tidak aman.

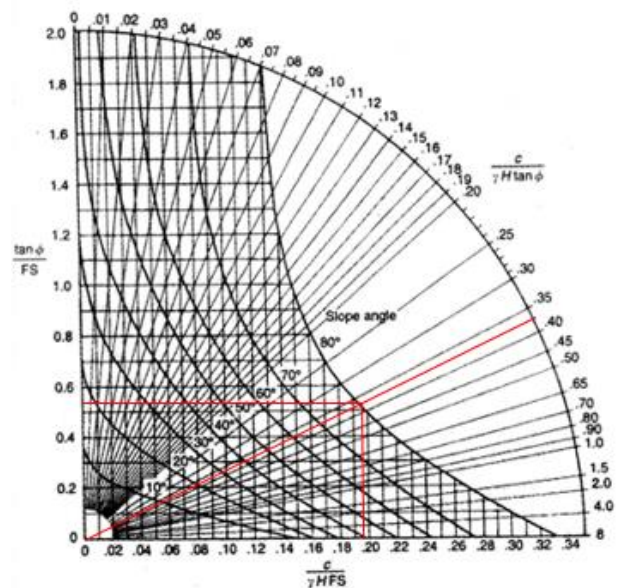
2) Kondisi Jenuh (Chart 5)

Analisis kestabilan lereng dalam kondisi setengah jenuh menggunakan parameter batuan dari hasil analisis sifat fisik dan mekanik batuan.

Diketahui:

- Tinggi Lereng (H) = 12,343 meter
- Kemiringan Lereng (α) = 80°
- Bobot Isi Natural(γ) = 25,89 kN/m³

- Kohesi (C) = 58,16324115 kN/m²
 - Sudut Geser Dalam (Ø) = 26,404°
- $$\frac{c}{\gamma \times H \times \tan \phi} = \frac{58,16324115}{25,89 \times 12,343 \times \tan 26,404} = 0,37$$



Gambar 32. Chart 5 Modifikasi Geometri FK Lereng Kondisi Jenuh

$$\frac{c}{\gamma \times H \times F_s} = 0,194$$

$$0,194 = \frac{58,16324115}{25,89 \times 12,343 \times F_s}$$

$$F_s = \frac{58,16324115}{25,89 \times 12,343 \times 0,194}$$

$$F_s = \frac{58,16324115}{61,99469238}$$

$$F_s = 0,9382$$

$$\frac{\tan \phi}{F_s} = 0,54$$

$$\frac{\tan 26,404}{0,54} = F_s$$

$$F_s = 0,9194 \approx 0,92$$

Berdasarkan analisis menggunakan metode grafis *hoek and bray* diperoleh nilai Faktor Keamanan dengan kondisi lereng jenuh (*chart 5*) pada nilai kritisnya adalah 0,92 > 1,3 yang berarti lereng dalam kondisi aman

4.7.2. Perhitungan untuk sudut lereng 60°.

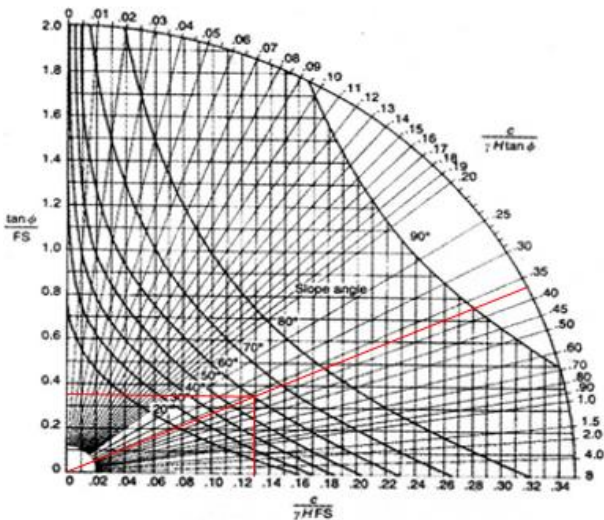
1) Kondisi Setengah Jenuh (Chart 3)

Analisis kestabilan lereng dalam kondisi setengah jenuh untuk sudut kemiringan lereng 60° digunakan parameter batuan dari hasil analisis sifat fisik dan mekanik batuan.

Diketahui:

- Tinggi Lereng (H) = 12,343 meter
- Kemiringan Lereng (α) = 60°
- Bobot Isi (γ) = 25,59 kN/m³
- Kohesi (C) = 58,16324115 kN/m²
- Sudut Geser Dalam (Ø) = 26,404°

$$\frac{c}{\gamma \times H \times \tan \phi} = \frac{58,16324115}{25,59 \times 12,343 \times \tan 26,404} = 0,37$$



Gambar 33. Chart 3 Modifikasi Geometri FK Lereng Kondisi Setengah Jenuh

$$\frac{c}{\gamma \times H \times F_s} = 0,13$$

$$0,13 = \frac{58,16324115}{25,59 \times 12,343 \times F_s}$$

$$F_s = \frac{58,16324115}{25,59 \times 12,343 \times 0,13}$$

$$F_s = \frac{58,16324115}{41,0614581}$$

$$F_s = 1,4165$$

$$\frac{\tan \phi}{F_s} = 0,36$$

$$\frac{\tan 26,404}{0,36} = F_s$$

$$F_s = 1,379 \approx 1,38$$

Berdasarkan analisis menggunakan metode grafis *hoek and bray* diperoleh nilai Faktor Keamanan dengan kondisi lereng setengah jenuh (*chart 3*) pada nilai kritisnya adalah $1,38 > 1,3$ yang berarti lereng berada dalam kondisi aman

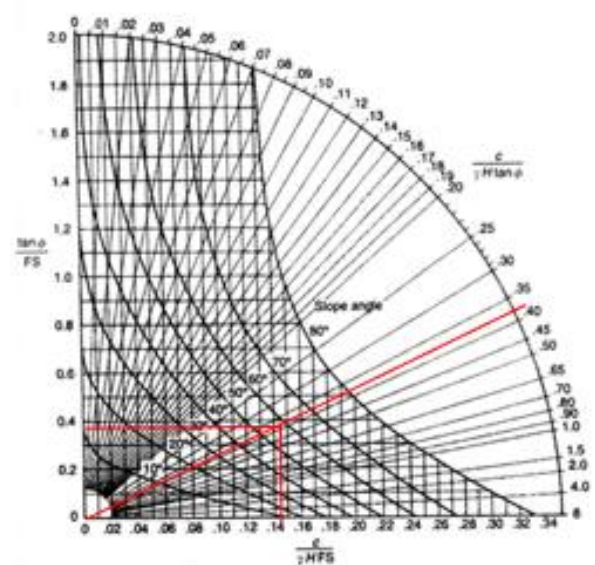
2) Kondisi Jenuh (*Chart 5*)

Analisis Analisis kestabilan lereng dalam kondisi jenuh untuk sudut kemiringan lereng 60° digunakan parameter batuan dari hasil analisis sifat fisik dan mekanik batuan.

Diketahui:

- Tinggi Lereng (H) = 12,343 meter
- Kemiringan Lereng (α) = 60°
- Bobot Isi (γ) = 25,89 kN/m³
- Kohesi (C) = 58,16324115 kN/m²
- Sudut Geser Dalam (ϕ) = $26,404^\circ$

$$\frac{c}{\gamma \times H \times \tan \phi} = \frac{58,16324115}{25,89 \times 12,343 \times \tan 26,404} = 0,37$$



Gambar 28. Chart 5 Modifikasi Geometri FK Lereng Kondisi Jenuh

$$\frac{c}{\gamma \times H \times F_s} = 0,144$$

$$0,144 = \frac{58,16324115}{25,89 \times 12,343 \times F_s}$$

$$F_s = \frac{58,16324115}{25,89 \times 12,343 \times 0,144}$$

$$F_s = \frac{58,16324115}{44,48812176}$$

$$F_s = 1,307$$

$$\frac{\tan \phi}{F_s} = 0,38$$

$$\frac{\tan 26,404}{0,38} = F_s$$

$$F_s = 1,3065$$

Berdasarkan analisis menggunakan metode grafis *hoek and bray* diperoleh nilai Faktor Keamanan dengan kondisi lereng jenuh (*chart 5*) pada nilai kritisnya adalah $1,3065 > 1,3$ yang berarti lereng dalam kondisi aman

5. Penutup

5.1 Kesimpulan

1. Hasil pengujian laboratorium menunjukkan bahwa batu andesit PT. Koto Alam Sejahtera (PT. KAS) memiliki nilai bobot asli sebesar 2,61 gr/cm³, bobot isi jenuh sebesar 2,64 gr/cm³ dan bobot isi kering sebesar 2,55 gr/cm³ dengan nilai kohesi sebesar 58.16324115 kN/m² dan nilai sudut geser dalam sebesar 26.404°.
2. Hasil analisis Kinematik, didapatkan potensi kelongsoran yang akan terjadi yaitu Longsoran Guling jenis *Flexural Toppling* dengan presentase sebesar 18,27%.
3. Hasil analisis faktor keamanan (FK) lereng menggunakan metode *Morgenstern-Price* menunjukkan bahwa lereng akhir penambangan PT. KAS berada dalam kondisi tidak aman dengan nilai FK sebesar 0,894 pada keadaan jenuh.
4. Upaya peningkatan kestabilan lereng pada lereng akhir penambangan PT. Koto Alam Sejahtera untuk mendapatkan nilai FK > 1,3 (kondisi aman) dilakukan

dengan mengurangi sudut kemiringan lereng maksimal menjadi 60° .

5.2 Saran

1. Adanya bidang diskontinuitas pada lereng diharapkan menjadi perhatian bagi PT. Koto Alam Sejahtera untuk menjadi faktor penyebab longsoran.
2. Salah satu cara meningkatkan nilai FK lereng yaitu dengan mengurangi ketinggian atau sudut kemiringan lereng.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arief, S. 2007. Konsep Dasar & Metode-metode dalam Analisis Kestabilan Lereng. Buku Kompilasi tidak diterbitkan.
- [2] Arief, S. 2008. Analisis Kestabilan Lereng dengan Metode Irisan. Buku Kompilasi tidak diterbitkan.
- [3] Arif, Irwandy. 2016. Geoteknik Tambang. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama
- [4] Atiiqah, Fuzi. 2020. Analisis Kestabilan Lereng Front IV Limit di Area Penambangan Batu Kapur PT. Semen Padang Sumatera Barat. Padang: Universitas Negeri Padang.
- [5] Azizi, Masagus A., dan Rr Harminuke Eko Handayani. 2011. Karakterisasi Parameter Masukan untuk Analisis Kestabilan Lereng Tunggal (Studi Kasus di PT. Tambang Batubara Bukit Asam Tbk. Tanjung Enim, Sumatera Selatan. Paper. Prosiding Seminar AVoER Ke-3.
- [6] Hoek, E. and Bray, J.W. 1981. Rock Slope Engineering, Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 18-34;83-114;381-385.
- [7] Muchtar, Aiv Fajri. 2020. Analisis Kestabilan Lereng menggunakan Metode Kesetimbangan Batas dengan Pendekatan Probabilitas Kelongsoran pada Pit Batu Hijau PT. Amman Mineral Nusa Tenggara. Padang: Universitas Negeri Padang.