

Analisis Kestabilan Lereng BT 02 Jalan Masuk Tambang Bawah Tanah PT. Nusa Alam Lestari di Desa Salak, Kecamatan Talawi Kota Sawahlunto, Provinsi Sumatera Barat

Rizka Anazakia^{1,*}, and Raimon Kopa^{1**}

¹Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

*rizka.anazakia19@gmail.com

**raimonkopa@ft.unp.ac.id

Abstract. PT. Nusa Alam Lestari is a company which engaged in coal mining business in Sawahlunto City. The level of mine slope stability is the most important factor that must be considered in the sustainability of mining activities. The writer conducted a research at the mining slope location of PT. NAL, which is at the coordinates of $S00^{\circ}43'27,0''$ $E100^{\circ}47'11,1''$ with slope height 38m and slope 81° .

In this study, the writer used kinematic analysis with dips software and slope stability analysis using the Finite Element method. Based on the data from the kinematic analysis, the percentage value of potential landslides that occur at the research location is the plane failure which has a landslide potential of 25.37%. Second, the results of the analysis of the safety factor (SF) of the slope using the Finite Element method show that the results of the single slope analysis of the actual value obtained are $SF = 1.22$ (natural conditions) and $SF = 0.88$ (saturated conditions). Third, to obtain a safe SF, namely > 1.25 , a change in the geometry of the slope was carried out by reducing the slope angle from 81° to 72° in saturated conditions so that the SF value > 1.25 .

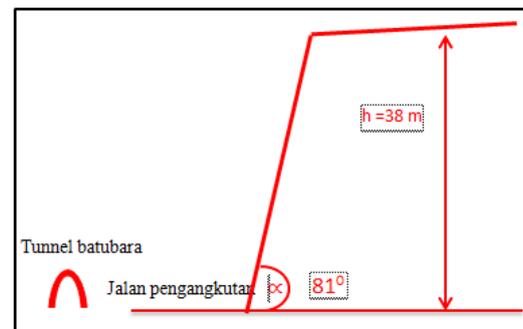
Keywords: Open Mining, Slope Geometry, Finite Element Method, Safety Factor

1. Pendahuluan

PT. Nusa Alam Lestari merupakan perusahaan pertambangan dalam negeri yang bergerak dibidang penambangan batubara. Pada tahun 2006 sistem penambangan di PT. Nusa Alam Lestari adalah tambang terbuka dengan metode penambangan *open pit*. Metode *open pit* ini berakhir pada tahun 2011 dikarenakan *stripping ratio* yang semakin tinggi dan tidak lagi memberikan keuntungan bagi perusahaan, lalu penambangan dilanjutkan dengan metode penambangan batubara bawah tanah dengan metode *room and pillar* yang terus berlangsung pada saat ini

Awal Tahun 2020, PT. Nusa Alam Lestari membuat 2 *tunnel* baru di Bukit Tambun 02 untuk menambang batubara yang berlokasi di sisi depan bawah lereng batuan tambang terbuka. Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan didapatkan tinggi lereng lokasi penelitian adalah 38 m dan kemiringan 81° dengan material penyusunnya adalah batuan sedimen dan ditemukan adanya runtuh batuan serta adanya bidang – bidang lemah atau *discontinuitas* pada lereng yang dapat melemahkan parameter mekanik batuan, sehingga membuat lereng tersebut kurang aman dan kemungkinan akan terjadi longsor. Berdasarkan hasil penelitian relevan yang saya baca kemiringan lereng dengan batuan penyusun sedimen yang aman mempunyai ketinggian 10 m dengan sudut kemiringan 60° .

Berikut adalah gambar kondisi aktual lereng pada lokasi penelitian.



Gambar 1. Geometri Lereng PT. Nusa Alam Lestari

Berdasarkan gambar geometri lereng di atas dapat dilihat bahwa di depan lereng terdapat jalan pengangkutan batubara dan lubang *tunnel* tempat dilakukan penambangan batubara. Jarak antara lereng dengan jalan pengangkutan batubara berkisar antara 2 m – 2,5 m. Sementara jarak antara lereng ke lubang tunnel penambangan berkisar antara 4 m – 5 m.

Kondisi lereng yang tinggi dan sudut lereng yang makin besar akan memberikan volume material makin besar, sehingga beban lereng bertambah besar dan kemungkinan menyebabkan longsor. Apabila terjadi longsor akan menyebabkan akses jalan pengangkutan batubara yang berada di depan lereng akan terganggu, sehingga aktifitas produksi juga terganggu karena material longsor kemungkinan akan menutupi lubang tunnel. Untuk mencegah terjadinya kemungkinan longsor perlu di

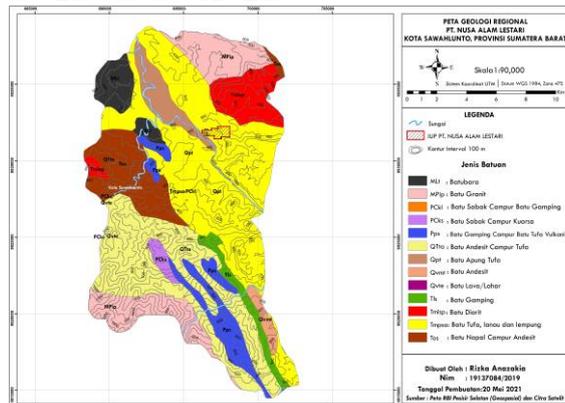
lakukan analisis lereng yang tepat. Analisis faktor keamanan lereng dilakukan dengan menggunakan *software phase 2*. Parameter sifat mekanik batuan (kohesi dan sudut geser dalam) diperoleh dari uji laboratorium. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode Elemen Hingga.

Berdasarkan uraian dari permasalahan di atas, maka penulis tertarik mengangkat judul “Analisis Kestabilan Lereng BT 02 Jalan Masuk Tambang Bawah Tanah PT. Nusa Alam Lestari di Desa Salak, Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto, Provinsi Sumatera Barat.”

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Lokasi Penelitian

Secara administratif konsesi penambangan PT Nusa Alam Lestari termasuk dalam wilayah Perambahan, Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto, Sumatera Barat. Jarak antara daerah penambangan dengan Kota Padang yaitu ± 90 km disebelah timur Kota Padang, ditempuh dengan kendaraan roda empat pada jalan Lintas Sumatra melalui Padang - Kota Solok - Kota Sawahlunto dengan waktu tempuh $\pm 2-3$ jam. Secara geografis wilayah penambangan PT. Nusa Alam Lestari terletak pada koordinat $101^{\circ} 45' 48''$ BT – $101^{\circ} 46' 48''$ BT dan $00^{\circ} 36' 45''$ LS – $00^{\circ} 37' 12''$ LS.



Gambar 2. Peta Geologi Regional PT. Nusa Alam Lestari

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Lereng

Lereng adalah suatu permukaan yang menghubungkan permukaan tanah yang lebih tinggi dengan permukaan tanah yang lebih rendah. Ada tiga macam lereng yang perlu mendapat perhatian dari ahli-ahli geoteknik, yaitu : Lereng alam, yaitu lereng yang terbentuk akibat kegiatan alam, seperti erosi, gerakan tektonik dan sebagainya; Lereng yang dibuat manusia, akibat penggalian untuk pembuatan jalan atau keperluan irigasi; dan Lereng timbunan tanah, seperti urugan untuk jalan raya atau bendungan tanah (Turanan Virginia, A.E.Turangan, S.)

2.2.2. Klasifikasi Gerakan Tanah dan Batuan

Kemantapan Lereng atau Kestabilan Lereng sangat berhubungan dengan gerakan massa tanah atau batuan. Gerakan tanah menurut M.M. Purbo Hadiwidjoyo (1992) dapat didefinisikan sebagai berpindahnya massa tanah dan batuan pada arah tegak, mendatar, atau miring dari kedudukannya semula. Jenis gerakan tanah dan batuan dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

1. Longsoran (sliding)

Longsoran atau luncuran terjadi pada suatu material yang rapuh. Gerakan ini terjadi sepanjang satu atau beberapa bidang luncuran.

2. Runtuhan (falling)

Disebut runtuhan jika gerakan tanah dan batuan ibarat jatuh bebas, seperti massa batuan pada dinding yang curam (mendekati tegak) yang tiba-tiba jatuh.

3. Nendatan (slump)

Slump, atau dikenal juga sebagai nendatan (KBBI, 2015), merupakan gerakan yang terputus-putus atau tersendat-sendat dari massa tanah dan batuan ke arah bawah dalam jarak yang relative pendek, melalui bidang lengkung dengan kecepatan ekstrem lambat sampai agak cepat (*moderate*).

4. Amblesan (subsidence)

Amblesan merupakan suatu permukaan tanah dan batuan yang tiba-tiba bergerak turun dengan kecepatan lambat sampai agak cepat.

5. Rayapan (creep)

Rayapan adalah gerakan yang kontinu dan relatif lambat rayapan.

6. Aliran (flow)

Aliran merupakan gerakan massa tanah dan batuan yang sudah bercampur dengan air dan tertransportasikan ke tempat lain.

7. Gerakan kompleks (complex movement)

Gerakan tanah dan batuan yang merupakan gabungan lebih atau sama dengan dua gerakan tanah dan batuan.

2.2.3. Jenis-Jenis Longsoran Lereng Penambangan

1. Longsoran busur (Circular Failure), sering terjadi pada material tanah atau batuan lunak dengan struktur kekar yang rapat. Bidang longsornya berbentuk busur

2. Longsoran Bidang (Plane Failure) Longsoran bidang merupakan suatu longsor batuan yang terjadi sepanjang bidang luncur yang dianggap rata. Bidang luncur tersebut dapat berupa sesar, kekar (Joint) maupun bidang perlapisan batuan.

3. Longsoran Biji (Wedge Failure) Longsoran ini terjadi bila dua buah jurus bidang diskontinu berpotongan dan besar sudut garis potong kedua bidang tersebut lebih besar dari sudut geser dalam dan lebih kecil dari sudut kemiringan lereng.

4. Longsoran Guling (Toppling Failure) Longsoran ini terjadi pada lereng yang terjadi pada batuan yang keras dimana struktur bidang lemahnya berbentuk kolom.

2.2.4. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kestabilan Lereng

1. Geometri lereng Geometri lereng mencakup tinggi lereng (H) dan sudut kemiringan lereng. Perubahan tinggi akan mengakibatkan perubahan kestabilan dari lereng yang bersangkutan karena berat material lereng yang harus ditahan oleh kuat geser batuan atau tanah semakin besar. Sudut kemiringan lereng yang besar akan memberikan volume material yang besar juga sehingga beban material pada lereng juga akan semakin besar.

2. Struktur geologi Struktur geologi yang mempengaruhi kemantapan

lereng adalah adanya bidang diskontinuitas atau bidang-bidang lemah seperti sesar dan kekar.

3. Iklim dan Curah Hujan

Iklim berpengaruh terhadap kemantapan lereng karena iklim mempengaruhi perubahan temperatur. Untuk masalah curah hujan dimana air mempunyai fungsi sebagai pelarut dan sebagai media transportasi material pengisi celah rekahan dimana akibat adanya kehadiran air tersebut dapat menimbulkan tegangan air yang akan mengurangi tegangan normal sehingga akan memperkecil kekuatan geser.

4. Sifat Fisik dan Mekanik Batuan

5. Faktor Keamanan (FK) Lereng

Secara sistematis faktor keamanan suatu lereng dapat ditulis dengan rumus sebagai berikut menurut Hoek & Bray (1991) dalam (Irwandi Arif, 2016: 215):

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

FK > 1,0: Lereng dalam kondisi stabil.

FK < 1,0: Lereng tidak stabil.

FK = 1,0: Lereng dalam kondisi kritis

6. Rock Mass Rating (RMR)

Klasifikasi RMR digunakan untuk menentukan kualitas massa batuan berdasarkan lima parameter, yaitu nilai kuat tekan batuan utuh (UCS), RQD (dengan melakukan pengukuran atau estimasi), spasi bidang-bidang diskontinuitas, kondisi bidang-bidang diskontinu, dan kondisi air tanah.

7. Rock Quality Designation (RQD)

RQD (*Rock Quality Designation*) merupakan persentase kualitas batuan, terdiri dari Nilai RQD dari pengamatan bidang diskontinuitas di lapangan yaitu dari persentase frekuensi diskontinuitas per meter berdasarkan jumlah diskontinuitas yang memotong garis pengamatan (scan line) pada singkapan batuan yang mengalami retakan-retakan (baik lapisan batuan maupun kekar atau sesar) berdasarkan rumus Hudson serta Nilai RQD diperoleh dari hasil pengukuran panjang inti bor (core) yang diukur langsung di lapangan bersamaan dengan kegiatan *core orienty* dilakukan.

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.

Metode grafik Hoek and Bray sendiri bergantung pada :

1. Jenis tanah dan batuan, dalam hal ini tanah dan batuan dianggap homogen dan kontinu.
2. Longsor yang terjadi menghasilkan bidang lurur berupa busur lingkaran.
3. Tinggi permukaan air tanah pada lereng:
 - a. Kondisi air tanah nomor 1 yaitu kering
 - b. Kondisi air tanah nomor 2 yaitu air permukaan 8 kali dari ketinggian lereng dibelakang toe dari *slope*.
 - c. Kondisi air tanah nomor 3 yaitu air permukaan 4 kali dari ketinggian lereng dibelakang toe dari *slope*.
 - d. Kondisi air tanah nomor 4 yaitu air permukaan 2 kali dari ketinggian lereng dibelakang toe dari *slope*.

- e. Kondisi air tanah nomor 5 yaitu 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

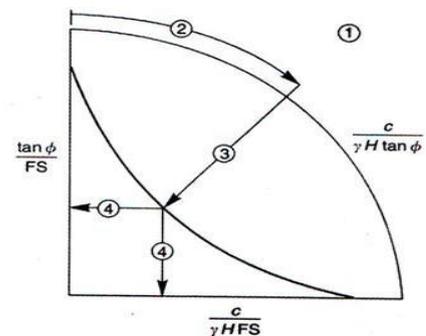
Langkah 1 : Tentukanlah kondisi air tanah yang ada dan sesuaikan dengan gambar untuk memilih diagram yang akan digunakan. Pilih yang tepat atau yang mendekati.

Langkah 2 : Hitung angka $c/(\gamma H \tan \phi)$, kemudian cocokkan angka tersebut pada lingkaran terluar dari diagram (*chart*) yang dipilih.

Langkah 3 : Ikuti jari-jari mulai dari angka yang diperoleh pada langkah 2 sampai memotong kurva yang menunjukkan kemiringan lereng.

Langkah 4 : Dari titik pada langkah 3, kemudian ditarik ke kiri dan ke bawah untuk mencari angka-angka $\tan \phi / FS$ dan $c/(\gamma \cdot H \cdot FS)$.

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)

2.2.5 Metode elemen hingga (*Finite-element method*).

Dalam metode elemen-hingga domain dari daerah yang dianalisis dibagi kedalam sejumlah zone-zone yang lebih kecil. Zone-zone kecil tersebut dinamakan elemen. Elemen-elemen tersebut dianggap saling berkaitan satu sama lain pada sejumlah titik titik simpul. Perpindahan pada setiap titik-titik simpul dihitung terlebih dahulu, kemudian dengan sejumlah fungsi interpolasi yang diasumsikan, perpindahan pada sembarang titik dapat dihitung berdasarkan nilai perpindahan pada titik-titik simpul.

Selanjutnya regangan yang terjadi pada setiap elemen dihitung berdasarkan besarnya perpindahan pada masing-masing titik simpul. Berdasarkan nilai regangan tersebut dapat dihitung tegangan yang bekerja pada setiap elemen.

Terdapat dua pendekatan yang umum digunakan dalam analisis kestabilan lereng dengan menggunakan metode elemen hingga, yaitu:

- a. Metode Pengurangan Kekuatan Geser (*Strength reduction method*) Prinsip dari metode ini yaitu kekuatan geser material nilainya dikurangi secara bertahap sampai terbentuk suatu mekanisme keruntuhan pada lereng. Pengurangan parameter kohesi (C) dan sudut gesek (f) dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_f = \frac{C}{SRF}$$

$$\phi_f = \tan^{-1} \frac{\tan \phi}{SRF}$$

Keterangan : SRF = faktor reduksi kekuatan geser.
 (F) = Faktor keamanan besarnya sama dengan nilai SRF pada saat tepat terjadi keruntuhan.

$$FK = \frac{\tau}{\tau_f}$$

τ merupakan kuat geser material yang diitung berdasarkan kriteria *Mohr – Coulomb*, yaitu :

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi$$

Dan τ_f adalah tegangan geser pada bidang gelincir. Yang dapat dihitung sebagai berikut :

$$\tau_f = c_f + \sigma_n \tan \phi_f$$

Maka persamaan FK dan SRF sebagai berikut :

$$FK = \frac{c + \sigma_n \tan \phi_f}{\left(\frac{c}{SRF}\right) \sigma_n \tan \left(\tan^{-1}\left(\frac{\tan \phi}{SRF}\right)\right)}$$

Sehingga, FK = SRF.

b. Metode Penambahan Gravitasi (*Gravity increase method*)

Prinsip dari metode penambahan gravitasi yaitu nilai gravitasi dinaikkan secara bertahap sampai terbentuk suatu mekanisme keruntuhan pada lereng. Faktor keamanan dalam pendekatan ini didefinisikan sebagai berikut :

$$(FS)_{gi} = \frac{g_{limit}}{g_{aktual}}$$

Keterangan : g_{aktual} = konstanta gravitasi (9.81 kN/m3)
 g_{limit} = nilai gravitasi yang tepat menyebabkan terjadi suatu keruntuhan pada lereng.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kuantitatif. Dimana, penelitian tipe kuantitatif dapat digunakan apabila data yang dikumpulkan berupa data kuantitatif atau jenis data lain yang dapat dikuantitaskan dan diolah menggunakan teknik *statistic*. Selain itu juga, penelitian ini termasuk penelitian terapan karena ditujukan untuk memberikan solusi atas permasalahan yang ada.

Penelitian dilaksanakan di wilayah PT. Nusa Alam Lestari. Penelitian kemudian dibatasi pada lereng batuan jalan masuk tambang BT 02 pada bulan Desember 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 *discontinuitas* dan data fisik dan mekanik batuan. Data sekunder yang digunakan yaitu, Peta lokasi kesampaian daerah, peta topografi, peta geologi dan data sifat mekanik batuan.

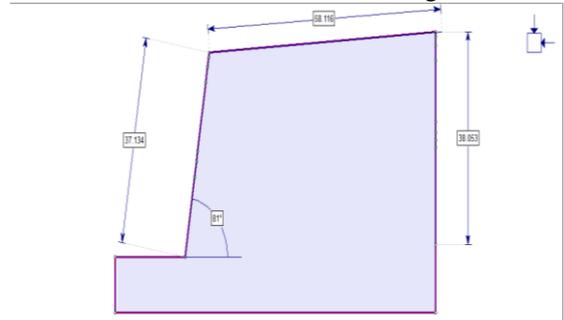
4. Hasil Penelitian Dan Pembahasan

4.1 Geometri Lereng

Dari hasil pengambilan data geometri lereng pada PT. Nusa Alam Lestari didapatkan tinggi lereng 38 m dengan sudut lereng 81°.



Gambar 4 . Kondisi Lereng



Gambar 5 . Geometri Lereng penambangan PT. Nusa Alam Lestari

4.2 Uji Sifat Fisik

Pengujian sifat fisik batuan merupakan pengujian untuk mendapatkan bobot isi/*density* dari sampel batuan yang diuji yang mana pengujiannya tanpa merusak (*non destructive test*)

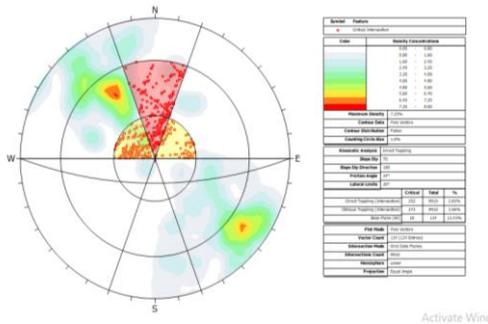
Tabel. 1 Data Uji Sifat Fisik.

Batu lanau (<i>Siltstone</i>)							
No. Sampel	Berat Normal (Wn)	Berat Jenuh (Ww)	Berat Menggant ung (Ws)	Berat Kering (Wo)	bobot isi asli	bobot isi jenuh	bobot isi kering
	(gram)	(gram)	(gram)	(gram)	(gr/cc)	(gr/cc)	(gr/cc)
1	43,34	44,72	24,68	43,09	2,16	2,23	2,15
2	63,74	64,21	33,88	53,6	2,10	2,12	1,77
3	60,12	61,87	33,59	52,97	2,12	2,19	1,87
Jumlah					6,39	6,53	5,79
Rata –rata					2,13	2,18	1,93
Batu Pasir (<i>Sandstone</i>)							
No. Sampel	Wn	Ww	Ws	Wo	bobot isi asli	bobot isi kering	bobot isi jenuh
	(gram)	(gram)	(gram)	(gram)	(gr/cc)	(gr/cc)	(gr/cc)
1	19,34	20,36	12,09	18,88	2,34	2,28	2,46
2	19,18	20,18	11,84	18,84	2,29	2,26	2,42
3	19,17	20,18	12,04	18,81	2,35	2,31	2,48
Jumlah					6,99	6,85	7,39
Rata –rata					2,33	2,24	2,45
Batubara							
Sampel	Wn	Ww	Ws	Wo	Bobot isi asli	Bobot isi kering	Bobot isi jenuh
	(gram)	(gram)	(gram)	(gram)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)
1	37,20	40,38	10,79	34,18	1,26	1,16	1,36
2	36,50	39,66	11,64	31,63	1,30	1,13	1,42
3	36,18	40,89	11,21	35,58	1,22	1,20	1,38
Jumlah					3,78	3,48	4,16
Rata –rata					1,26	1,16	1,39

4.3 Uji Sifat Mekanik Batuan

4.3.1 Uji *Point Load Index*

Uji *point load Index* dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui sifat fisik batuan dengan didapatkan nilai dari uji *point load* maka dapat ditentukan kekerasan batuan yang terdapat dilapangan .



Gambar 14. Output Kinematic Analysis Jenis Direct Toppling

Berdasarkan gambar di atas didapatkan hasil bahwa titik-titik *intersections* yang berada pada zona longsoran guling dengan presentase longsor sebesar 13,43%.

Dari hasil analisis potensi longsor yang dilakukan, dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Analisis Potensi Longsor

Jenis Longsoran	Potensi (%)
Longsoran Baji (Wedge Failure)	18,42%
Longsoran Bidang (Plane Failure)	25,37%
Longsoran Guling (Toppling Failure) jenis Flexural Toppling	6,72%
Longsoran Guling (Toppling Failure) jenis Direct Toppling	13,43%

Berdasarkan dari Tabel 19, didapatkan hasil bahwa potensinya longsor yang paling tinggi terjadi yaitu Longsoran Bidang (*Plane Failure*) dengan potensi sebesar 25,37%.

4.5 Hasil Analisis Klasifikasi Massa Batuan

4.5.1 Rock Quality Designation (RQD)

Perhitungan RQD dilakukan dengan Persamaan Priest dan Hudson. Adapun persamaan Priest dan Hudson yaitu : $RQD = 100 (0.1 \lambda + 1) e^{-\lambda}$. Dengan $\lambda = 1/\text{spasi}$, λ adalah rasio antara jumlah kekar dengan panjang scanline (kekar/meter). Dari hasil perhitungan menggunakan persamaan di atas diperoleh nilai RQD per *scanline*.

Tabel 6. Data Analisis RQD

No.	Spasi Rata – rata (m)	λ	RQD
1	0,12	8,63	78,59
2	0,10	9,78	74,39
3	0,17	5,93	88,04
4	0,14	7,18	83,79
5	0,03	30,19	19,63
6	0,06	17,22	48,65
7	0,06	16,53	50,80
8	0,09	11,11	69,50
9	0,08	12,59	64,15
10	0,07	13,68	60,29
11	0,11	9,42	75,70
12	0,04	23,90	31,07
Jumlah	1,07	166,16	744,60
Rata-rata	0,09	13,85	62,05

Berdasarkan tabel diatas nilai RQD 50-75 % dengan kualitas batuan sedang (*fair rock*) dan rating 13.

4.5.3 Rock Mass Rating (RMR)

Klasifikasi RMR digunakan untuk menentukan kualitas massa batuan berdasarkan lima parameter, yaitu nilai kuat tekan batuan, RQD (dengan melakukan pengukuran atau estimasi), spasi bidang- bidang diskontinuitas, kondisi bidang-bidang diskontinu, dan kondisi air tanah..

Tabel 7. Data Analisis RMR

Parameter	Nilai	Bobot
RQD (%)	62,05	13
UCS (MPa)	4,19	1
Spasi (mm)	90	8
Kondisi Discontinuitas		
1. Persistence (m)	<1mm	6
2. Lebar Rongga (mm)	0,1-1mm	4
3. Kekerasan Kasar	65,243	3
4. Material Pengisi	None	6
5. Pelapukan	Tidak Melapuk	6
Kondisi Air	Lembab	10
Orientasi Kekar	Menguntungkan (Favorable)	-5
RMR		52
Kelas Massa Batuan		III
Deskripsi Massa Batuan		Batuan Sedang
Nilai GSI = (Nilai RMR -5)		47

4.6 Analisis Kestabilan Lereng

4.6.1 Analisis Tingkat Kestabilan Lereng Metode Elemen Hingga dengan Menggunakan Software Phase 2

Pada penelitian ini, analisis kestabilan lereng dilakukan berdasarkan geometri lereng tambang, bobot isi batuan, kohesi (c) dan sudut geser dalam (θ) material penyusun lereng tersebut. Berdasarkan dari hasil analisis RMR sebelumnya batuan pada daerah penelitian berada dalam kelas batuan sedang, hal ini dikarenakan banyaknya bidang diskontinuitas serta jenis longsoran terjadi berupa longsoran bidang.

Apabila hasil analisis terdapat kondisi lereng tidak aman maka harus memodelkan kembali atau membuat rekomendasi lereng baru dengan nilai yang lebih optimal. Analisis Faktor keamanan lereng menggunakan *software Phase 2* dan metode yang digunakan dalam menganalisis yaitu metode Elemen Hingga.

Metode elemen hingga (*finite element method*) ini digunakan karena metode ini didasarkan pada hubungan tegangan regangan, dimana potensi bidang kelongsoran dengan mencari titik /bidang lemah di dalam batuan dengan cara mengurangi kuat geser batuan (*Shear Strength Reduction*) secara bertahap. Prinsip dari metode ini yaitu kekuatan geser material nilainya dikurangi secara bertahap sampai berbentuk suatu mekanisme keruntuhan pada lereng. Pengurangan parameter kohesi (C) dan sudut gesek dalam (θ). Metode penanganan potensi kelongsoran lereng untuk pencegahan atau supaya stabilitas lereng menurut Zakaria (2009) adalah mengurangi beban di puncak lereng dengan cara melakukab pemangkasan lereng baik mengurangi sudut kemiringan maupun pembuatan *berm*.

Data yang di input dalam menganalisis menggunakan *software Phase 2* yaitu :

Data uji laboratorium sifat fisik material
 Tinggi Lereng (H) = 38 m
 Sudut Kemiringan Lereng (α) = 81°
 Data uji laboratorium sifat fisik dan mekanik material

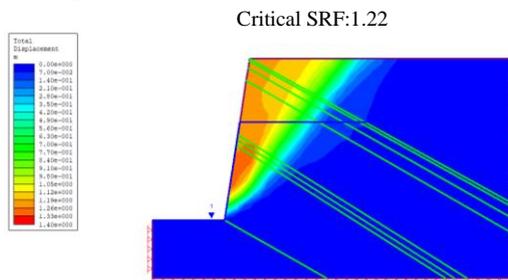
Tabel 8. Paramater Sifat fisik dan Mekanik Material

Material	Bobot isi asli (γ nat) kN/m ³	Poisson Ratio (*)	Modulus Young (kN/m ²) (*)	Sudut geser dalam (Peak) (°)	Kohesi (peak) (kN/m ²)	Sudut geser dalam (Residu) (°)	Kohesi (Residu) (kN/m ²)
Siltstone	20,89	0,3	15000	34,77°	180,3	30,54°	160
Sandstone	22,6	0,3	192000	40,33°	153,1	36,87°	127,8
Coal	12,366	0,26	605720	31,44°	112	31,08°	108

*) Bowles, 1997

1. Analisis FK Lereng dengan Kondisi Natural

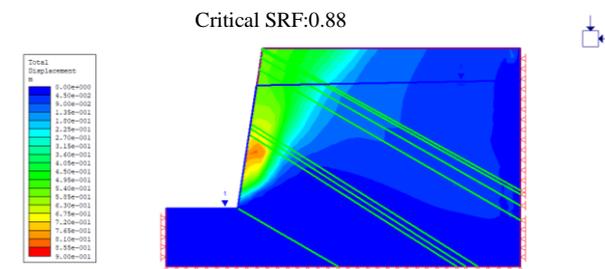
Bobot isi yang digunakan dalam menganalisis yaitu bobot isi natural. Hasil analisis faktor keamanan lereng tersebut adalah 1,22 yang artinya lereng tersebut berada dalam kondisi tidak aman dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Faktor Keamanan Lereng Aktual Kondisi Natural

2. Analisis FK Lereng dengan Kondisi Jenuh

Kondisi lereng dalam keadaan jenuh adalah kondisi dimana muka air tanah full saturated. Kemudian, bobot isi yang digunakan dalam menganalisis yaitu bobot isi jenuh. Hasil analisis faktor keamanan lereng tersebut adalah 0,88 yang artinya lereng tersebut berada dalam kondisi tidak aman dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Faktor Keamanan Lereng Aktual Kondisi Jenuh

4.6.2 Analisis Kestabilan Lereng dengan Metoda Grafis Hoek and 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).

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 : 38 m

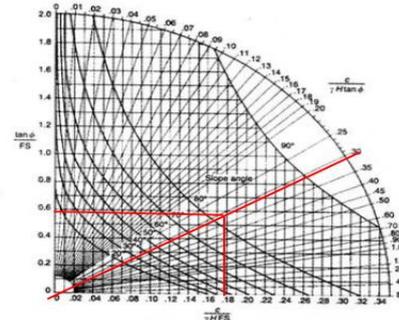
Kemiringan Lereng (α) : 81°

Bobot isi asli (γ nat) : 1,92 gr/cm³ = 18,62 KN/m³

Kohesi (c) : 0,157 Mpa = 157 KN/m²

Sudut geser dalam (θ) : 34,103°

$$\frac{c}{\gamma_{Nat} \times H \times \tan \alpha} = \frac{148,47 \text{ KN/m}^2}{18,62 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 38 \text{ m} \times \tan 34,103^\circ} = 0,31$$



Gambar 17. Chart 3 FK Lereng Kondisi Setengah Jenuh

$$\frac{c}{\gamma_{HF}} = 0,178$$

$$0,178 = \frac{148,47 \text{ KN/m}^2}{18,62 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 38 \text{ m} \times F}$$

$$F = \frac{148,47 \text{ KN/m}^2}{18,62 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 38 \text{ m} \times 0,178}$$

$$F = \frac{148,47 \text{ KN/m}^2}{125,94 \text{ KN/m}^2} = 1,179$$

$$\tan \phi = 0,58$$

$$\frac{\tan \phi}{F} = 0,58$$

$$F = \frac{\tan 34,103^\circ}{0,58} = 1,167$$

Berdasarkan analisis menggunakan metode grafis hoek and bray diperoleh nilai Faktor Keamanan dengan kondisi lereng setengah jenuh (chart 3) pada nilai kritisnya adalah 1,167 < 1,25 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 : 38 m

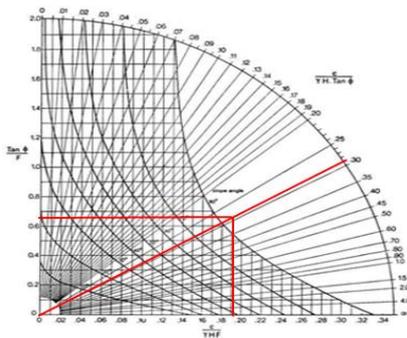
Kemiringan Lereng (α) : 81°

Bobot isi Jenuh (γ) : 1,97 gr/cm³ = 19,77 KN/m³

Kohesi (c) : 0,157 Mpa = 148,47 KN/m²

Sudut geser dalam (θ) : 34,103°

$$\frac{c}{\gamma_{Nat} \times H \times \tan \alpha} = \frac{148,47 \text{ KN/m}^2}{19,77 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 38 \text{ m} \times \tan 34,103^\circ} = 0,29$$



Gambar 18. Chart 5 FK Lereng Kondisi Jenuh

$$\frac{c}{\gamma H F} = 0,192$$

$$0,192 = \frac{148,47 \text{ KN/m}^2}{19,77 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 38 \text{ m} \times F}$$

$$F = \frac{148,47 \text{ KN/m}^2}{19,77 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 38 \text{ m} \times 0,192}$$

$$F = \frac{148,47 \text{ KN/m}^2}{144,24 \text{ KN/m}^2}$$

$$F = 1,029$$

$$\frac{\tan \phi}{F} = 0,65$$

$$F = \frac{\tan 34,103^\circ}{0,65} = 1,042$$

Berdasarkan analisis menggunakan metode grafis *hoek and bray* diperoleh nilai Faktor Keamanan dengan kondisi lereng jenuh (*chart 5*) pada nilai kritisnya adalah $1,042 < 1,25$ 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 7

Tabel 7. Nilai Faktor Keamanan Lereng Aktual

Metode	Tinggi (m)	Sudut (°)	Nilai FK	
			Natural	Jenuh
Elemen Hingga (Phase 2)	38	81	1,22	0,88
Hoek & Bray	38	81	1,179	1,042

4.7 Pembahasan

Berdasarkan hasil analisis kestabilan lereng pada akhir penambangan, terlihat bahwa lereng memiliki nilai faktor keamanan (FK) $< 1,25$ dalam keadaan natural dan jenuh yang artinya lereng tersebut dalam kondisi tidak aman sehingga memungkinkan terjadinya longsor disekitar lereng.

Oleh sebab itu, penulis melakukan modifikasi pada lereng dengan melakukan perubahan pada geometri lereng tersebut. Perubahan yang dilakukan dengan mengurangi sudut kemiringan lereng pada akhir penambangan menggunakan analisis *Trial and Error*, sehingga penulis memodifikasi sudut kemiringan lereng pada akhir penambangan dengan menggunakan *software Phase 2* menggunakan metode Elemen Hingga

4.7.1 Modifikasi Geometri Lereng dengan Metode Elemen Hingga menggunakan *software Phase 2*

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 $> 1,25$ 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**.

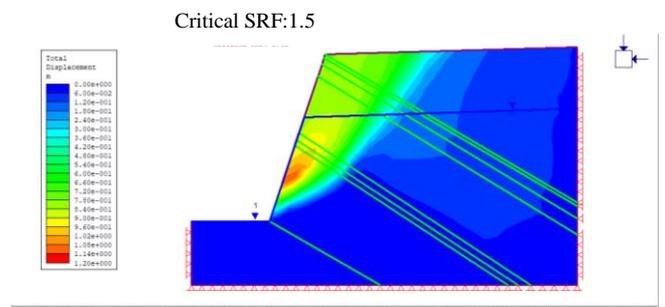
Tabel 7. Nilai faktor keamanan Lereng Setelah Dimodifikasi

Tinggi (m)	Sudut (°)	Faktor Keamanan SRF = FK	
		Natural	Jenuh
38	80	1,24	0,885
38	79	1,25	0,98
38	78	1,3	1
38	77	1,32	1,04
38	76	1,35	1,07
38	75	1,37	1,11
38	74	1,39	1,13
38	73	1,41	1,16
38	72	1,5	1,255
38	71	1,51	1,26

Dari data hasil modifikasi, penulis memberikan rekomendasi faktor keamanan lereng stabil yaitu dengan memperkecil sudut kemiringan lereng menjadi 72° pada kondisi jenuh dengan nilai faktor keamanan lereng 1,255 yang artinya lereng tersebut dalam kondisi aman. Bentuk analisis faktor keamanan dapat dilihat pada Lampiran H dan salah satu analisis faktor keamanan yang dibuat yaitu sudut lereng 72° sebagai berikut:

1. Faktor Keamanan dengan Sudut Lereng 72° Kondisi Natural

Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan *software Phase 2* dengan memodifikasi geometri lereng dalam kondisi natural dengan tinggi 38 m dengan sudut lereng menjadi 72° , didapatkan nilai SRF = FK 1,5 yang artinya lereng dalam kondisi aman.

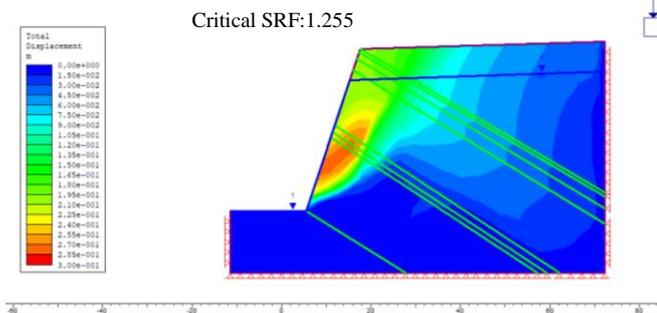


Gambar 18. Faktor Keamanan Lereng dengan Sudut Lereng 72° Kondisi Natural

2. Faktor Keamanan dengan Sudut Lereng Kondisi Jenuh

Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan

software Phase 2 dengan memodifikasi geometri lereng dalam kondisi natural dengan tinggi 38 m dengan sudut lereng menjadi 72°, didapatkan nilai SRF = FK 1,255 yang artinya lereng dalam kondisi aman.



Gambar 19. Faktor Keamanan Lereng dengan Sudut Lereng 72 Kondisi Jenuh

4.7.2 Modifikasi Geometri Lereng dengan Metode Hoek and Bray

Dilakukan perhitungan secara manual untuk membandingkan hasil analisis dengan menggunakan software Phase 2. Perhitungan secara manual menggunakan metode Hoek & Bray dengan menggunakan parameter kondisi setengah jenuh dan kondisi jenuh (chart 3 dan chart 5) Perhitungan untuk sudut Lereng 72°

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 : 38 m

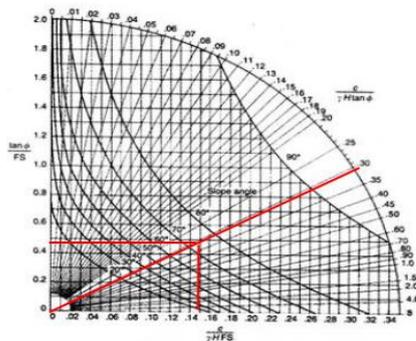
Kemiringan Lereng (α) : 72°

Bobot isi asli (γ nat) : 1,92 gr/cm³ = 18,62 KN/m³

Kohesi (c) : 0,1399 Mpa = 148,47 KN/m²

Sudut geser dalam (θ) : 34,103°

$$\frac{c}{\gamma_{Nat} \times H \times \tan \theta} = \frac{148,47 \text{ KN/m}^2}{18,62 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 38 \text{ m} \times \tan 34,103^\circ} = 0,31$$



Gambar 20. Chart 3 FK Lereng Kondisi Setengah Jenuh

$$\frac{c}{\gamma_{HF}} = 0,144$$

$$0,144 = \frac{148,47 \text{ KN/m}^2}{18,62 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 38 \text{ m} \times F}$$

$$F = \frac{148,47 \text{ KN/m}^2}{18,62 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 38 \text{ m} \times 0,144}$$

$$F = \frac{148,47 \text{ KN/m}^2}{99,59 \text{ KN/m}^2}$$

$$F = 1,49$$

$$\frac{\tan \theta}{F} = 0,48$$

$$F = \frac{\tan 34,103^\circ}{0,48} = 1,41$$

Berdasarkan analisis menggunakan metode grafis hoek and bray diperoleh nilai Faktor Keamanan dengan kondisi lereng setengah jenuh (chart 3) pada nilai kritisnya adalah 1,41 > 1,25 yang berarti lereng berada dalam kondisi 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 : 38 m

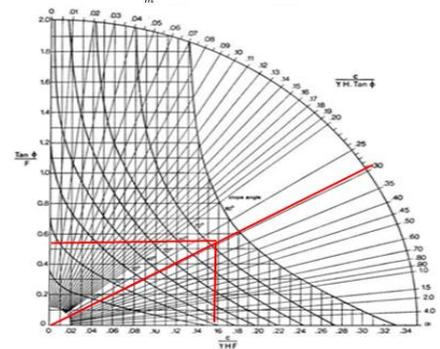
Kemiringan Lereng (α) : 72°

Bobot isi Jenuh (γ) : 1,97 gr/cm³ = 19,77 KN/m³

Kohesi (c) : 0,1399 Mpa = 148,47 KN/m²

Sudut geser dalam (θ) : 34,103°

$$\frac{c}{\gamma_{Nat} \times H \times \tan \theta} = \frac{148,47 \text{ KN/m}^2}{19,77 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 38 \text{ m} \times \tan 34,103^\circ} = 0,29$$



Gambar 21. Chart 5 FK Lereng Kondisi Jenuh

$$\frac{c}{\gamma_{HF}} = 0,158$$

$$0,158 = \frac{148,47 \text{ KN/m}^2}{19,77 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 38 \text{ m} \times F}$$

$$F = \frac{148,47 \text{ KN/m}^2}{19,77 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \times 38 \text{ m} \times 0,158}$$

$$F = \frac{148,47 \text{ KN/m}^2}{118,7 \text{ KN/m}^2}$$

$$F = 1,251$$

$$\frac{\tan \theta}{F} = 0,54$$

$$F = \frac{\tan 34,103^\circ}{0,54} = 1,254$$

Berdasarkan analisis menggunakan metode grafis hoek and bray diperoleh nilai Faktor Keamanan dengan kondisi lereng jenuh (chart 5) pada nilai kritisnya adalah 1,254 > 1,25 yang berarti lereng berada dalam kondisi aman.

Hasil modifikasi geometri lereng dengan menggunakan metode elemen hingga yang dibantu dengan metode Hoek and Bray sebagai pembanding dapat dilihat pada **Tabel 8**.

Tabel 8. Hasil Modifikasi Geometri Lereng

Metode	Tinggi (m)	Sudut ($^{\circ}$)	Nilai FK	
			Natural	Jenuh
Elemen Hingga (Phase 2)	38	72	1,5	1,255
Hoek & Bray	38	72	1,41	1,254

5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

- Hasil pengujian laboratorium mekanika batuan didapatkan nilai sifat fisik : batu lanau dengan bobot isi asli $2,13 \text{ gr/cm}^3$, bobot isi kering $1,93 \text{ gr/cm}^3$ dan $2,18 \text{ gr/cm}^3$ bobot isi jenuh, untuk material batu pasir didapatkan nilai bobot isi asli $2,33 \text{ gr/cm}^3$, bobot isi kering $2,24 \text{ gr/cm}^3$, dan bobot isi jenuh $2,45 \text{ gr/cm}^3$, dan untuk batubara didapat nilai bobot isi asli $1,26 \text{ gr/cm}^3$, bobot isi kering $1,16 \text{ gr/cm}^3$, bobot isi jenuh $1,39 \text{ gr/cm}^3$. Hasil Uji Point Load Index batuan dilokasi penelitian pada lereng di depan tunnel Bukit Tambun (BT 02) PT. Nusa Alam Lestari didapatkan nilai kuat tekan rata-rata sebesar 3,07 Mpa untuk batubara, 5,33 MPa untuk siltstone dan 4,174 untuk sandstone. Hasil uji geser langsung untuk tegangan puncak didapatkan nilai kohesi (c) $180,3 \text{ KN/m}^3$ dan sudut geser dalam $34,77$ untuk batu lanau, nilai kohesi (c) $153,1 \text{ KN/m}^3$ dan sudut geser dalam $40,33$ untuk batu pasir dan nilai kohesi (c) 112 KN/m^3 dan sudut geser dalam $31,44$ untuk batubara. Hasil uji geser langsung untuk tegangan residual didapatkan nilai kohesi (c) 160 KN/m^3 dan sudut geser dalam $34,77$ untuk batu lanau, nilai kohesi (c) $153,1 \text{ KN/m}^3$ dan sudut geser dalam $40,33$ untuk batu pasir.
- Hasil analisis Kinematik, didapatkan potensi kelongsoran yang akan terjadi yaitu Longsoran Bidang (Plane Failure) dengan presentase sebesar 25,37%.
- Hasil analisis faktor keamanan (FK) lereng menggunakan metode Elemen Hingga menunjukkan bahwa lereng akhir penambangan PT. Nusa Alam Lestari berada dalam kondisi tidak aman dengan nilai FK sebesar 1,22 keadaan natural dan FK 0,88 pada keadaan jenuh.
- Upaya peningkatan kestabilan lereng pada lereng akhir penambangan PT.Nusa Alam Lestari untuk mendapatkan nilai FK > 1,25 (kondisi aman) dilakukan dengan mengurangi sudut kemiringan lereng maksimal menjadi 72° .

5.2 Saran

- Perlu dilakukannya perancangan geometri lereng yang baik sebelum kegiatan penambangan dilakukan yang sesuai dengan sifat fisik dan mekanik batuan pada lereng tersebut, serta kontrol geoteknik terhadap aktivitas lereng, sehingga nantinya apabila ada potensi bahaya dapat diatasi sedini mungkin.
- Ketika lereng dalam keadaan jenuh perlu dilakukan upaya/solusi untuk menjaga lereng dalam keadaan aman seperti dengan membuat paritan sebagai aliran air atau melakukan modifikasi pada geometri lereng

tersebut.

- Perlu ketelitian pada saat melakukan pengujian sampel di laboratorium agar hasil yang didapatkan lebih akurat.
- Langkah pemeliharaan, pemantauan, dan penanganan pada lereng tambang sangat diperlukan untuk menjaga agar lereng tetap dalam kondisi aman.

DAFTAR PUSTAKA

- A. E, Thyac Korah Turangan dan Alva, N. S. (2014), Analisis Stabilitas Lereng dengan Metode Janbu (Studi Kasus : Kawasan Citraland Manado). Universitas Sam Ratulangi Manado : Tidak diterbitkan.
- Ardhi, H. A., Azizi, M. A., Marwanza, I., Hartami, P. N., Nugroho, B., & Saptono, S. (2017). Perbandingan analisis stabilitas lereng metode kesetimbangan batas dengan metode elemen hingga menggunakan pendekatan probabilistik. In Seminar Nasional Geomekanika (Vol. 4, pp. 179-185).
- Arif, Irwandy. 2016. Geoteknik Tambang. Bandung: ITB.
- Barton, N., R. Lien, dan J. Lunde. 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mech. 6, pp. 183-236
- Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classifications of jointed rock masses. Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng. 15, 335 - 344.
- Bieniawski, Z.T. 1976. Rock mass classification in rock engineering. In Exploration for rock engineering, proc. of the symp., (ed. Z.T. Bieniawski) 1, 97-106. Cape Town: Balkema
- Bieniawski, Z.T., 1979. The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications. Proc. 4th Int. Cong. Rock Mech., ISRM, Montreux, vol. 2.
- Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual For Engineers And Geologists In Mining, Civil, And Petroleum Engineering. Wiley-interscience.
- Fauzi, I. M., & Hamdhan, I. N. (2019). Analisis Stabilitas Lereng Dengan Perkuatan Geotekstil Woven Akibat Pengaruh Termal Menggunakan Metode Elemen Hingga.(Hal. 61-72). RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil, 5(2), 61.
- Goro, G. L. (2007). Studi Analisis Stabilitas Lereng Pada Timbunan Dengan Metode Elemen Hingga. Wahana TEKNIK SIPIL, 12(1), 9-18.
- Hoek, E. and Bray, J.W. 1981. Rock Slope Engineering, Instituion of Mining and Metallurgy, London, pp. 18-34;83-114;381-385.
- Hoek, E. and Bray, J.W. (1991). Rock Slope Engineering, Elsevier Science Publishing: New York, 358 pp.
- Hoek, E., Kaiser, PK & Bawden, W.F1.1995. Support of underground excavations in hard rock. Balkema.
- Hoek,e.& Diederichs,M.S. 2006. Empirical estiation of rock mass modulus. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 43203-215.
- Pane, Riski Adelina & Yoszi M. Anaperta. 2019. "Karakterisasi Massa Batuan dan Analisis Kestabilan Lereng Untuk Evaluasi Geometri Lereng di Pit Barat Tambang Terbuka PT. AICJ (Allied Indo Coal Jaya) Kota Sawahlunto Provinsi Sumatera Barat". Jurnal. Bina Tambang Vol 4 No 3.
- Permana, G. W. (2016). Analisis Stabilitas Lereng Dan Penanganan Longsoran Menggunakan Metode Elemen Hingga Plaxis V. 8.2 (Studi Kasus: Ruas Jalan Liwa-Simpang Gunung Kemala STA. 263+ 650).