



EVALUASI ANALISIS KESTABILAN LERENG PADA TAMBANG TERBUKA BATUBARA *PIT NORTH WEST PT ANAK TAMBANG INDONESIA JOB SITE PT ADIMITRA BARATAMA NUSANTARA, KALIMANTAN TIMUR*

EVALUATION OF SLOPE STABILITY ANALYSIS IN THE PIT NORTH WEST COAL OPEN-PIT COAL MINE PT ANAK TAMBANG INDONESIA JOB SITE PT ADIMITRA BARATAMA NUSANTARA, EAST KALIMANTAN

Vinsentia Parissing^{1*}, Sundek Hariyadi^{2*}, Singgih Saptono³, Barlian Dwinagara³, S. Koesnaryo³

^{1,3}Jurusan Teknik Pertambangan, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta

²Jurusan Teknik Pertambangan, Universitas Kutai Kartanegara

Artikel masuk : 18-05-2024 , Artikel diterima : 03-09-2024

ABSTRAK

Keywords:

Finite Element Method (FEM), High-wall, Slope stability, Low-wall

Kata kunci:

Metode Elemen Hingga, *High-wall*, Kestabilan lereng, *Low-wall*

Pada suatu lereng tambang akan bekerja gaya pendorong dan gaya penahan. Lereng tambang akan runtuh apabila gaya pendorong lebih besar dari gaya penahan. Dengan demikian, prinsip penanggulangan keruntuhan lereng tambang adalah mengurangi gaya pendorong atau memperbesar gaya penahan. PT Adimitra Baratama Nusantara bermaksud untuk mengembangkan area penambangan baru di area Barat-Laut dalam wilayah IUP. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian geoteknik yang berfokus pada analisis kemantapan lereng untuk mendukung rencana penambangan Batubara sistem tambang terbuka berdasarkan data hasil penyelidikan geoteknik di lapangan, data sekunder dan data uji laboratorium geoteknik. Pemodelan geoteknik untuk analisis kemantapan lereng dilakukan dengan menggunakan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) dikarenakan batuan sedimen *overburden* dan *interburden* lapisan batubara dianggap mempunyai perilaku mendekati elasto-plastic, sehingga akan memberikan hasil yang mendekati keadaan sebenarnya di lapangan. Pemodelan dan analisis stabilitas lereng terhadap desain bukaan tambang yang diwakili oleh *section-01* dan *section-03* dengan tinggi masing-masing bukaan adalah 126 m dan 119 m menunjukkan desain lereng *high-wall* dan *low-wall* belum stabil, sehingga perlu dilakukan *re-design* dengan lantai bukaan tambang disimulasikan berada pada level -110 dan level -90.

*Penulis Koresponden: vinsentiaparissing54@gmail.com / sundecktambang@gmail.com

Doi : <https://doi.org/10.36986/impj.v6i1.128>

ABSTRACT

On a mine slope there will be a driving force and a resisting force. The mine slope will collapse if the driving force is greater than the resisting force. Thus, the principle of mitigating mine slope failure is to reduce the driving force or increase the resisting force. PT Adimitra Baratama Nusantara intends to develop a new mining area in the North-West area within the IUP area. Therefore, it is necessary to carry out a geotechnical study that focuses on slope stability analysis to support open-pit coal mining plans based on data from geotechnical investigations in the field, secondary data and geotechnical laboratory test data. Geotechnical modeling for slope stability analysis was carried out using the Finite Element Method because the overburden and interburden sedimentary rocks of coal seams are considered to have behavior approaching elasto-plastic, so that it will provide results that are close to the actual situation in the field. Modeling and slope stability analysis of the mine opening design represented by section-01 and section-03 with the height of each opening being 126 m and 119 m shows that the high-wall and low-wall slope designs are not yet stable, so a re-design is necessary. with the mine opening floor simulated at level -110 and level -90

PENDAHULUAN

Kegiatan penambangan galian sedimen seringkali diawali dengan pengupasan lapisan penutup untuk mendapatkan material yang diinginkan. Semakin rendah posisi material yang digali maka semakin banyak pula penutup yang harus dibongkar. Akibatnya, pemindahan lapisan penutup akan menyebabkan perbedaan ketinggian area kerja (depan) lapisan batuan di sekitarnya. Karena adanya perbedaan ketinggian antara kedua permukaan tersebut yang nantinya akan membentuk bidang miring atau bidang tegak yang menghubungkan kedua permukaan tersebut, yang sering disebut dengan lereng (Hariyadi, 2021).

Proses penggalian dan penimbunan merupakan permasalahan penting karena menyangkut keselamatan manusia, peralatan dan bangunan di sekitar lereng. Merujuk pada kaidah dalam ilmu pertambangan, maka prinsip dasar yang harus dipahami dalam menentukan desain bukaan tambang adalah menentukan sudut kemiringan bukaan tambang yang optimal, dalam artian menentukan sudut kemiringan keseluruhan yang stabil hingga akhir penambangan (Prabowo dkk, 2023).

Pada suatu lereng tambang akan bekerja gaya pendorong dan gaya penahan. Gaya pendorong adalah gaya tangensial dari berat massa tanah dan batuan, sedangkan gaya penahan berupa tahanan geser tanah dan batuan. Lereng tambang akan runtuh apabila gaya pendorong lebih besar dari gaya penahan. Dengan demikian, prinsip penanggulangan keruntuhan lereng tambang adalah mengurangi gaya pendorong atau memperbesar gaya penahan (Arif, 2016). Berdasarkan prinsip ini, (Hoek and Bray, 1981) mengkategorikan metode stabilisasi menjadi tiga, yakni:

- Metode stabilisasi lereng dengan cara mengurangi gaya pendorong
- Metode stabilisasi lereng dengan cara memperbesar gaya penahan

c. Metode perlindungan lereng (*slope protection*)

Kestabilan lereng dipengaruhi oleh beberapa faktor yang terdiri dari geometri lereng, sifat fisik dan sifat mekanik batuan, struktur geologi, hidrologi dan gaya-gaya dari luar (Jalil dkk., 2022). Lereng tambang yang tidak stabil dapat mengalami kelongsoran hingga lereng menemukan keseimbangan yang baru hingga menemukan titik stabil. Longsoran dapat terjadi kapan saja, baik secara perlahan maupun tiba-tiba dengan atau tanpa adanya peringatan terlebih dahulu (Pane dan Anaperta, 2019).

Desain bukaan tambang optimal, direncanakan dalam bentuk penentuan batas bukaan tambang (*pit limit*), kemiringan lereng bukaan tambang (*overall pit slope*) dan kedalaman bukaan tambang. Dinding tambang yang didesain dengan kemiringan yang curam dapat meningkatkan produksi tambang tetapi beresiko mengalami longsor (Lalitya dkk., 2017). Dalam penelitian ini tidak merekomendasikan *optimal pit slope design*, namun untuk merekomendasikan kemiringan lereng keseluruhan bukaan tambang yang cukup stabil untuk beberapa pilihan kedalaman lantai bukaan tambang.

Berdasarkan Kepmen ESDM RI No. 1827 K/30/MEM/2018 lereng dapat dinyatakan stabil apabila memenuhi standar yang telah ditetapkan berdasarkan tabel di bawah ini.

Tabel 1. Nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Longsor Lereng Tambang

Jenis Lereng	Keparahan Longsor	Kriteria Dapat Diterima		
		FK Statis	FK Dinamis	PoF (FK ≤1)
Lereng tunggal	Rendah s.d Tinggi	1,1	Tidak ada	25-50%
	Rendah	1,15-1,2	1,0	25%
	Menengah	1,2-1,3	1,0	20%
	Tinggi	1,2-1,3	1,1	10%
Lereng Keseluruhan	Rendah	1,2-1,3	1,0	15-20%
	Menengah	1,3	1,05	10%
	Tinggi	1,3-1,5	1,1	5%

(Kepmen ESDM RI No. 1827 K/30/MEM/2018)

PT Adimitra Baratama Nusantara bermaksud untuk mengembangkan area penambangan baru di area Barat-Laut dalam wilayah IUP. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian geoteknik yang berfokus pada analisis kemampuan lereng untuk mendukung rencana penambangan batubara sistem tambang terbuka berdasarkan data hasil penyelidikan geoteknik di lapangan, data sekunder dan data uji laboratorium geoteknik. Pada penelitian ini, faktor keamanan minimum yang akan digunakan adalah nilai SF mendekati atau sama dengan 1,25 sesuai nilai faktor keamanan menurut Bowles (1989) dan memenuhi standar nilai faktor keamanan berdasarkan Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi aktual massa batuan, kondisi aktual lereng dan melakukan rakaaya lereng yang sesuai untuk meningkatkan kestabilan lereng lokasi penelitian.

Metode kesetimbangan batas (LEM) merupakan metode yang populer digunakan dalam menganalisis kestabilan lereng dikarenakan metode ini relatif sederhana karena dalam perhitungannya hanya menggunakan kondisi kesetimbangan statik namun mengabaikan adanya hubungan tegangan-regangan pada lereng serta data yang digunakan terdiri dari bobot isi, kohesi dan sudut geser dalam (Arif, 2016). Sedangkan metode elemen hingga (FEM) merupakan metode analisis suatu lereng batuan/tanah yang lebih kompleks di mana analisinya dilakukan dengan menghitung perpindahan pada setiap titik simpul kemudian menggunakan fungsi interpolasi yang diasumsikan, selanjutnya regangan tersebut dapat dihitung tegangan yang bekerja pada setiap elemen dengan menggunakan pendekatan SRF. SRF merupakan besaran di dalam shear reduction method, di mana nilai SRF diasumsikan sama dengan nilai FK. Untuk mendapatkan nilai FK dengan pendekatan FEM dengan cara pengurangan kuat geser sampai menggambarkan keruntuhan lereng. Data yang digunakan dalam analisis menggunakan FEM antara lain bobot isi, kuat tekan/tarik, modulus elastisitas, nisbah poisson, kohesi dan sudut geser dalam (Loilatu dan Iswandaru, 2022). Sehingga dalam penelitian ini akan menggunakan metode elemen hingga (FEM) dikarenakan batuan sedimen *overburden* dan *interburden* lapisan batubara dianggap mempunyai perilaku mendekati elasto-plastic, sehingga akan memberikan hasil yang mendekati keadaan sebenarnya di lapangan. Hasil akhir kajian geoteknik ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi geometri sudut lereng keseluruhan dan kedalaman penambangan yang optimal.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di PT Adimitra Baratama Nusantara, secara administrasi berada pada Kecamatan Sangasanga, Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur. Pengambilan sampel dilakukan dengan menggunakan pengeboran geoteknik pada 9 titik bor. Sampel yang telah diperoleh kemudian dilakukan pengujian sifat fisik dan sifat mekanik batuan di Laboratorium Geomekanika Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara. Selanjutnya dilakukan penentuan input parameter geoteknik untuk pemodelan dan analisis kemantapan lereng berdasarkan data hasil pengolahan. Pemodelan geoteknik untuk analisis kemantapan lereng dilakukan dengan menggunakan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) dikarenakan batuan sedimen *overburden* dan *interburden* lapisan batubara dianggap mempunyai perilaku mendekati elasto-plastic, sehingga pemodelan dengan menggunakan elasto-plastic finite element analysis software (Phase2 ver. 8.0 dari RocScience), akan memberikan hasil yang mendekati keadaan sebenarnya di lapangan.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

HASIL DAN ANALISIS

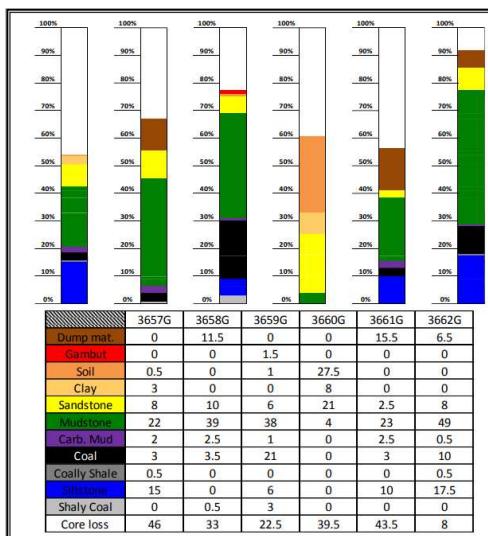
Penelitian yang dilakukan difokuskan pada area Barat Laut wilayah konsesi dan masih dalam kondisi *green-field* yang dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2. Lokasi Area Penelitian

1. Geologi Daerah Penelitian

Berdasarkan hasil pengeboran rinci, daerah penelitian tersusun oleh satuan batupasir dan batulempung dengan sisipan batubara yang merupakan bagian dari Formasi Balikpapan bagian atas. Satuan ini menempati dua per tiga daerah penelitian bagian timur. Satuan ini tertindih tidak selaras berupa bidang erosi oleh satuan batupasir dengan lapisan batubara yang merupakan bagian bawah dari Formasi Kampung Baru.



Gambar 3. Proporsi Lapisan Batuan Kumulatif Hasil Pengeboran Geoteknik

2. Karakteristik Massa Batuan

Massa batuan pada dasarnya adalah batuan utuh yang dipisahkan satu dan lainnya oleh diskontinuitas dengan perilaku yang berbeda. Sifat-sifat massa batuan tidak hanya tergantung pada sifat-sifat batuan utuh dan diskontinuitas secara terpisah, tetapi juga pada kombinasi ke dua faktor tersebut secara bersamaan (Dwinagara, 2006).

Untuk menentukan karakteristik massa batuan di lokasi penelitian digunakan metode *scanline*, yaitu pengukuran secara langsung di lapangan. Pendekatan metode klasifikasi massa batuan yang digunakan berupa *Rock Mass Rating* (RMR).

Metode RMR mengklasifikasikan massa batuan menggunakan parameter-parameter yang dapat mempengaruhi sifat batuan. Parameter ini terdiri dari Kekuatan batuan utuh, RQD, jarak diskontinuitas, kondisi diskontinuitas (*persistence*, *aperture*, *roughness*, *infilling* dan *weathered*) serta kondisi air tanah. Setiap parameter memiliki bobot yang berbeda-beda tergantung dengan kondisi massa batuan tersebut (Bieniawski, 1989). Kemudian bobor dari masing-masing parameter dijumlahkan untuk mengetahui kelas massa batuan.

Kelas massa batuan menurut Bieniawski, 1989 dibagi berdasarkan 5 kelas yang dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Kelas Massa Batuan RMR (Bieniawski, 1989)

Bobot	100-81	80-61	60-41	40-21	<21
Kelas	I	II	III	IV	V
Deskripsi	Sangat baik	Baik	Sedang	Lemah	Sangat lemah

Berdasarkan hasil pengukuran massa batuan secara langsung di lapangan menggunakan sistem klasifikasi RMR secara umum menggambarkan bahwa kondisi massa batuan *mudstone* termasuk dalam Kategori Lemah (Kelas IV) dan bersifat cenderung ekspansif bila tersingkap dan terkena air sehingga kekuatannya menurun dengan cepat. Sedangkan batuan *claystone* dan *sandstone* termasuk dalam kategori sedang (Kelas III). Lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 3.

Hasil pengukuran massa batuan ini akan menjadi informasi sebagai bahan pertimbangan pada saat memasuki tahap operasional penambangan.

3. Pemodelan Lereng

Pemodelan dan analisis kemantapan lereng menggunakan pemodelan numerik metode elemen hingga (FEM). Batuan sedimen *overburden* dan *interburden* lapisan batubara dianggap mempunyai perilaku mendekati elasto-plastic, sehingga pemodelan dengan menggunakan *elasto-plastic finite element analysis software* (*Phase2* ver. 8.0 dari *RocScience*), akan memberikan hasil yang mendekati keadaan sebenarnya di lapangan. Untuk menentukan kondisi stabilitas lereng, kriteria keruntuhan yang digunakan dalam analisis adalah kriteria keruntuhan geser Mohr-Coulomb untuk lapisan *overburden*, *interburden*, batubara maupun batuan alas (di bawah lapisan batubara).

a. Pemodelan Sistem Statika

Pemodelan sistem statika merupakan penggambaran keadaan sistem struktur penampang lereng bukaan tambang, yang telah memperhitungkan gaya yang bekerja, konfigurasi jenis dan sifat-sifat batuan, struktur perlapisan atau diskontinuitas massa batuan dan geometri lereng. Pemodelan ini menggunakan kaidah analisis regangan bidang (*plane strain*), atau model analisis dalam dua dimensi.

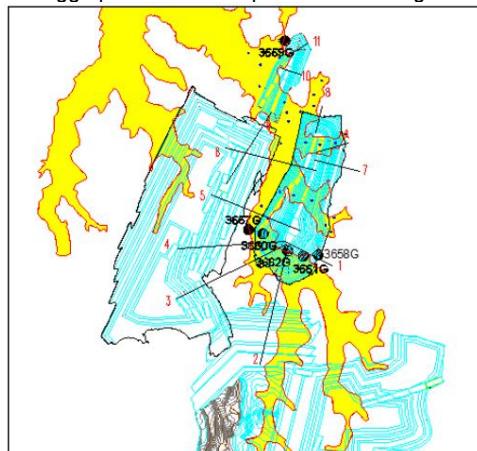
Tabel 3. Hasil Pengukuran Klasifikasi Massa Batuan Sistem RMR

Scanline	1			2			3			4		
From to	0-2 m			0-1.06 m			0-1.2 m			0.3,2 m		
Lithology	Coal			Claystone			Mudstone			Sandstone		
Parameter RMR	Fam	Value	Rating	Fam	Value	Rating	Fam	Value	Rating	Fam	Value	Rating
Strength of intact rock		1-5 Mpa	1		1-5 Mpa	1		<1 Mpa	0		<1 Mpa	0
RQD		<25%	3		<25%	3		<25%	3		50-75%	13
Spacing of discontinuities		<60 mm	5		<60 mm	5		<60 mm	5		60-200 mm	8
Persistence	A	<1 m	6	A	<1 m	6	A	1-5 mm	1	A	>20 m	0
Aperture		0,1-1 mm	4		0,1-1 mm	4		SR	3		0,1-1 mm	4
Roughness		SM	1		SM	1		none	6		SM	1
Infilling		none	6		none	6		SW	5		SW	5
Weathering		UW	6		SW	5		Dry	15		Dry	15
Groundwater		Dry	15		Dry	15		Dry	15		Dry	15
Total RMR		47			46			38			48	
Strength of intact rock		1-5 Mpa	1		1-5 Mpa	1		<1 Mpa	0		<1 Mpa	0
RQD		<25%	3		<25%	3		<25%	3		50-75%	13
Spacing of discontinuities		<60 mm	5		<60 mm	5		<60 mm	5		60-200 mm	8
Persistence		<1 m	6		1-3 m	4		1-3 m	4		>20 m	0
Aperture		<0,1 mm	5		0,1-1 mm	4		1-5 mm	1		0,1-1 mm	4

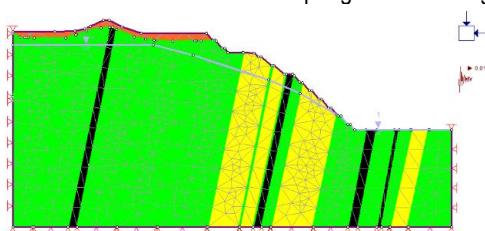
Scanline	1		2		3		4
Roughness	SM	1	SM	1	SR	3	
Infilling	none	6	none	6	none	6	
Weathering	UW	6	SW	5	SW	5	
Groundwater	Dry	15	Dry	15	Dry	15	
Total RMR	48		44		42		
RMR average	47,5		45		40		48
Class of rock mass	III (Fair rock)		III (Fair rock)		IV (Poor rock)		III (Fair rock)
Cohesion	200-300 kPa		200-300 kPa		100-200 kPa		200-300 kPa
Friction angle	25-30 deg		25-30 deg		1-25 deg		25-30 deg
GSI	42,5		40		35		43

Dalam melakukan analisis ini, regangan ke arah tegak lurus luas model (arah sumbu Y) dianggap nol, sehingga analisis regangan hanya dilakukan ke arah sumbu x dan sumbu z.

Dalam penelitian ini diwakilkan oleh 2 section model statistika yang masing-masing memotong rencana pit yang akan terbentuk, yakni section-01 dan section-03 dikarenakan hasil analisis awal pada kedua section ini memiliki nilai faktor keamanan yang rendah ($FK \leq 1$) sehingga perlu dilakukan pelandaian lereng.



Gambar 4. Posisi Garis Penampang Model Lereng



Gambar 5. Contoh Ilustrasi Model Sistem Statika Lereng (FEM)

b. Pemodelan Perilaku Batuan

Pemodelan perilaku batuan yaitu memilih perilaku atau sifat khas massa batuan yang sesuai dengan kondisi batuan sebenarnya yang digambarkan dalam model. Dalam penelitian ini, model batuan dianggap mempunyai perilaku elasto-plastic, sehingga memungkinkan dilakukan analisis dengan asumsi elastic sampai batas terjadinya kondisi plastic pada beberapa bagian di dalam sistem statika model.

Untuk menentukan kondisi stabilitas lereng, *criteria of failure* yang digunakan dalam analisis ini adalah kriteria keruntuhan geser Mohr-Coulomb untuk lapisan overburden, interburden, batubara maupun batuan alas (di bawah lapisan batubara).

c. Input Parameter

Input parameter geoteknik (sifat fisik dan mekanik) batuan untuk semua lapisan pembentuk lereng model ditentukan berdasarkan karakterisasi massa batuan hasil analisis dari uji laboratorium geoteknik yang diambil dari 9 lubang bor sepanjang 2026 m yang dianggap mewakili area bukaan tambang. Input parameter yang digunakan berdasarkan data hasil uji laboratorium serta hasil pengamatan geoteknik di lapangan untuk pemodelan dan analisis terdiri dari bobot isi alami (γ_n), Modulus Young (E), Poisson's ratio (ν), kuat tarik (σ_t), sudut gesek dalam (ϕ) dan kohesi (C). Data input parameter dapat dilihat pada tabel 4 dan 5. Hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa kekuatan batuan relatif merata sangat lemah (kuat tekan 0,1 – 2,0 Mpa).

Tabel 4. Input Parameter Kekuatan Batuan Model FEM, Section-01

Mat	Lapisan Batuan	Bobot Isi	Modulus Elastisitas	Poisson Ratio	Kuat Tarik	Sudut Gesek Dalam		Kohesi	
		kN/m ³	kPa	-	kPa	Peak (°)	Residual (°)	Peak (kPa)	Residual (kPa)
1	Mudstone	20,24	33,020	0,38	441,00	23,00	11,50	210,00	105,00
2	S26 U/L	12,38	599,554	0,39	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
3	Mudstone	20,24	33,020	0,38	441,00	23,00	11,50	210,00	105,00
4	S28	12,38	599,554	0,39	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
5	Mudstone	20,00	27,596	0,42	478,00	20,25	10,13	200,50	100,25
6	S30	12,38	599,554	0,39	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
7	Mudstone	18,90	17,800	0,49	465,00	22,50	11,25	205,00	102,50
8	S31	12,38	599,554	0,39	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
9	Siltstone	20,41	180,537	0,35	565,75	27,00	13,50	265,00	132,50
10	S32	12,38	599,554	0,39	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
11	Mudstone	19,90	146,115	0,29	476,00	20,00	10,00	200,00	100,00
12	S33 U/L	12,38	599,554	0,39	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
13	Mudstone	20,40	190,826	0,30	554,75	19,70	9,85	203,50	101,75

Mat	Lapisan Batuan	Bobot Isi	Modulus Elastisitas	Poisson Ratio	Kuat Tarik	Sudut Gesek Dalam		Kohesi	
		kN/m ³	kPa	-	kPa	Peak (°)	Residual (°)	Peak (kPa)	Residual (kPa)
14	S34 U/L	12,38	599,554	0,39	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
15	Mudstone	19,76	21,236	0,42	510,00	21,00	10,50	207,30	103,65
16	S35	12,38	599,554	0,39	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
17	Sandstone	20,40	159,740	0,35	481,00	25,00	12,50	125,00	62,50

Tabel 5. Input Parameter Kekuatan Batuan Model FEM, Section-03

Mat	Lapisan Batuan	Bobot Isi	Modulus Elastisitas	Poisson Ratio	Kuat Tarik	Sudut Gesek Dalam		Kohesi	
		kN/m ³	kPa	-	kPa	Peak (°)	Residual (°)	Peak (kPa)	Residual (kPa)
1	Mudstone	20,40	190,826	0,30	554,75	21,70	10,85	203,00	101,50
2	S34 U/L	12,65	529,690	0,36	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
3	Mudstone	19,76	21,236	0,42	510,00	20,10	10,05	204,00	102,00
4	S35	12,65	529,690	0,36	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
5	Sandstone	20,40	159,740	0,35	481,00	25,00	12,50	125,00	62,50
6	S36	12,65	529,690	0,36	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
7	Mudstone	20,40	147,773	0,41	535,00	21,70	10,85	209,70	104,85
8	S37	12,65	529,690	0,36	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
9	Mudstone	20,68	70,620	0,41	585,00	20,00	10,00	210,00	105,00
10	S38	12,65	529,690	0,36	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
11	Sandstone	19,70	63,420	0,40	425,00	25,00	12,50	125,00	62,50
12	S40	12,65	529,690	0,36	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
13	Sandstone	20,40	159,740	0,35	481,00	25,00	12,50	125,00	62,50
14	S41	12,65	529,690	0,36	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
15	Sandstone	20,40	159,740	0,35	481,00	25,00	12,50	125,00	62,50
16	S42L	12,65	529,690	0,36	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
17	Mudstone	20,76	16,234	0,45	602,00	21,50	10,75	215,00	107,50
18	S42U	12,65	529,690	0,36	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
19	Sandstone	20,76	16,234	0,45	602,00	26,50	13,25	128,00	64,00
20	S43	12,65	529,690	0,36	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
21	Sandstone	19,70	63,420	0,40	481,00	25,00	12,50	125,00	62,50
22	S44	12,65	529,690	0,36	500,00	30,00	15,00	300,00	150,00
23	Sandstone	19,70	63,420	0,40	481,00	25,00	12,50	125,00	62,50

d. Tegangan In-situ

Beban yang bekerja dianggap hanya beban karena gaya gravitasi bumi saja, tidak ada beban statik dari luar sistem. Sedangkan beban dinamik berupa getaran dianggap berasal dari kemungkinan adanya gempa bumi, yang pada area studi termasuk daerah dengan faktor kegempaan $f = 0,010g$. Besarnya tegangan karena pengaruh gaya gravitasi merupakan fungsi kedalaman di bawah permukaan atas dari model dan densitas rata-rata batuan.

Dalam analisis pemodelan FEM ini, tidak ada input tegangan insitu yang diberikan oleh karena semua tegangan yang terjadi di dalam model dianggap hanya berasal dari tegangan akibat berat material itu sendiri karena gaya gravitasi.

4. Analisis Kemantapan Lereng

Analisis ini dilakukan terhadap model-model lereng yang diwakili oleh section-01 dan section-03. Penentuan stabilitas lereng menggunakan *Shear Strength Reduction Method* (SSR-method), yang secara otomatis dapat menghitung nilai *Strength Reduction Factor* (SRF) dari setiap elemen model. SRF kritis (*critical SRF*) adalah ekivalen dengan nilai FK dari model lereng yang dianalisis. Metode SSR mempunyai algoritma perhitungan sebagai berikut:

- Parameter kekuatan batuan direduksi dengan faktor tertentu (SRF), kemudian tegangan dari setiap elemen dapat dihitung,

- Proses ini dilakukan secara berulang-ulang (iterasi) dengan nilai SRF yang berbeda-beda sampai model mengalami kondisi *failure* (hasil analisis tidak konvergen),
- Nilai SRF yang ditampilkan adalah nilai SRF kritis, yang dalam hal ini diartikan sama sebagai faktor keamanan lereng yang dimodelkan.

1. Analisis Kemantapan Lereng Keseluruhan Section-01

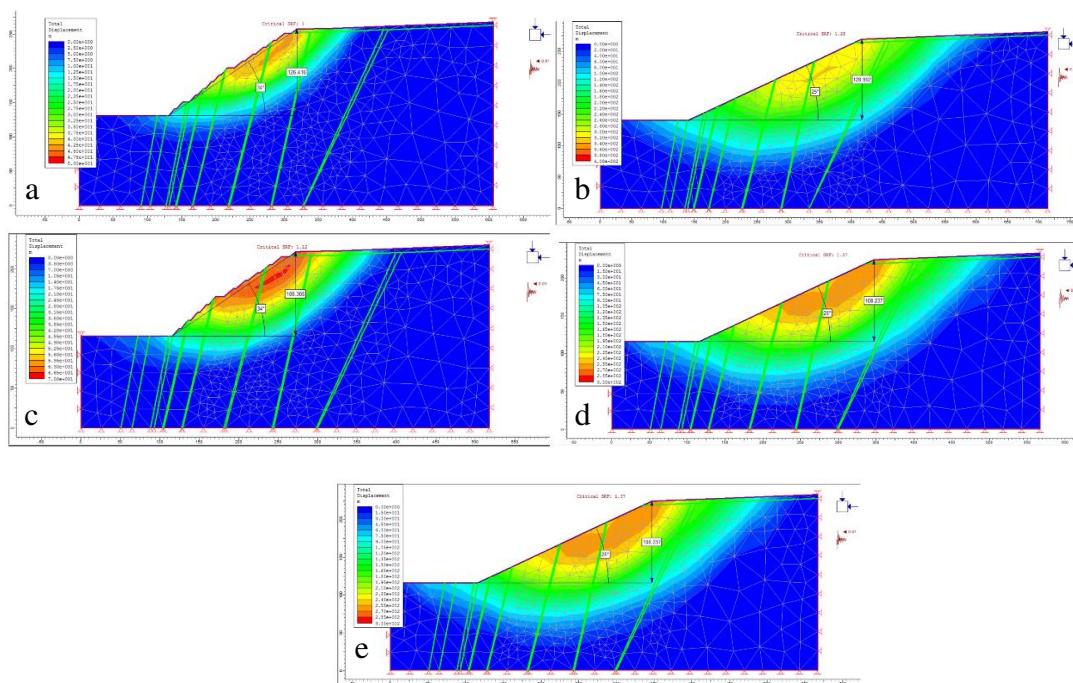
Pemodelan dan analisis kestabilan *overall pit slope* untuk section-01, didukung data dari titik-titik bor geoteknik nomor 3658G, 3661G dan 3662G yang didominasi oleh material *mudstone*. Dari keseluruhan simulasi dan analisis stabilitas lereng yang sudah dilakukan, diperoleh hasil sebagai berikut:

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis kestabilan lereng keseluruhan pada section-01, desain awal yakni lereng *low wall* berada pada elevasi -110 mdpl dengan sudut kemiringan lereng sebesar 34° memiliki ketinggian 126 m diperoleh nilai SF sebesar 1,00. Nilai SF ini belum memenuhi standar kestabilan lereng berdasarkan Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018 yakni untuk lereng keseluruhan memiliki FK 1,2-1,5 untuk lereng statis dan kriteria atau tolak ukur penilaian stabilitas lereng bukaan tambang yakni $SF \geq 1,25$ (Bowles, 1989). Sehingga dilakukan *redesign* berupa pelandaian lereng dengan beberapa simulasi dan diperoleh hasil simulasi seperti yang ditunjukkan pada tabel 6 dan gambar 6. Berdasarkan hasil

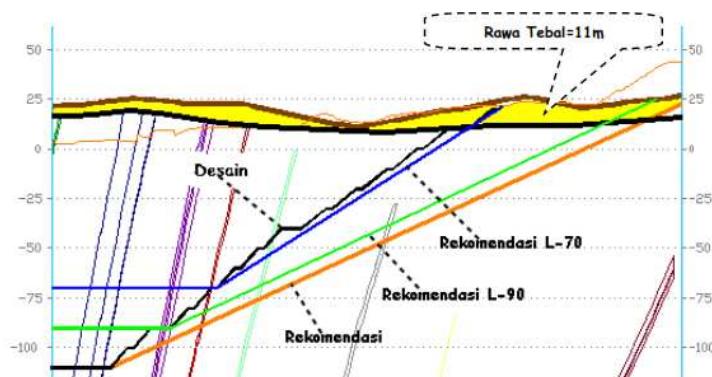
simulasi diperoleh nilai SF sebesar 1,28 dengan dilakukan pelandaian kemiringan lereng dari 34° menjadi 25° . Selain itu dengan menaikkan elevasi lantai dari elevasi -110 mdpl menjadi -90 mdpl dengan kenaikan lantai sebesar 20 m dan pelandaian kemiringan lereng sebesar 25° diperoleh nilai SF sebesar 1,37. Nilai ini sudah memenuhi standar ketebalan lereng menurut Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018.

Tabel 6. Hasil Simulasi dan Analisis Kestabilan Lereng Keseluruhan Section -01

Section	Floor Elevation (mdpl)	Slope	Slope angle ($^\circ$)	Height (m)	SF	Keterangan
Section-01	-110	LW	34	126	1,00	Desain awal
	-110	LW	25	129	1,28	Rekomendasi
	-90	LW	34	106	1,12	Lantai naik 20 m
	-90	LW	25	108	1,37	Rekomendasi (Lantai naik 20 m)
	-70	LW	33	86	1,36	Lantai naik 40 m



Gambar 6. Output model a. pit design FK = 1; b. simulasi FK = 1,28; c. simulasi FK = 1,12; d. simulasi FK = 1,37; e. simulasi FK = 1,36.



Gambar 7. Desain Lereng dan Simulasi Section-01

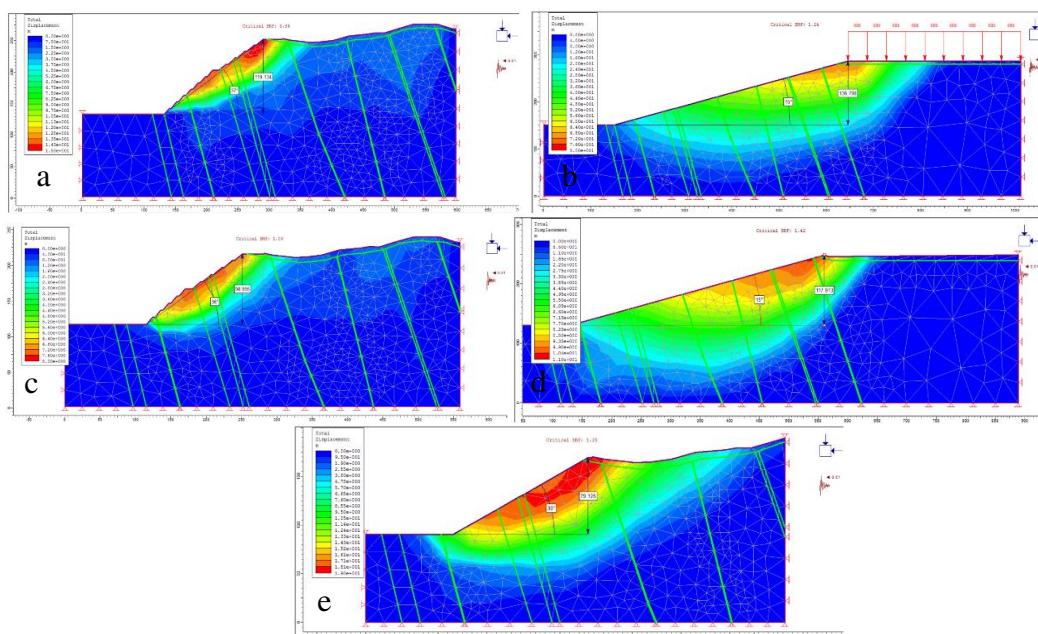
2. Analisis Kemantapan Lereng Keseluruhan Section-03

Pemodelan dan analisis kestabilan *overall pit slope* pada Section-03, didukung data dari titik-titik bor geoteknik

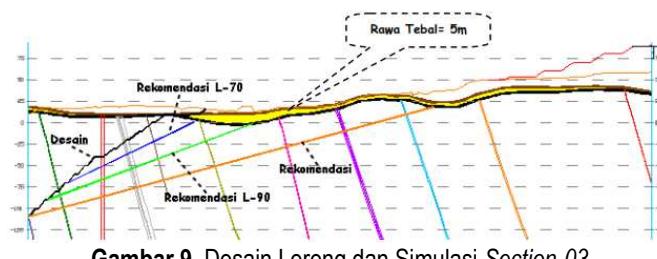
nomor 3662G. Dari keseluruhan simulasi analisis stabilitas lereng yang sudah dilakukan, diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 7. Hasil Simulasi dan Analisis Kestabilan Lereng Keseluruhan Section -03

Section	Floor Elevation (mdpl)	Slope	Slope angle (°)	Height (m)	SF	Keterangan
Section-03	-110	HW	37	119	0,86	Desain awal
	-110	HW	15	135	1,24	Rekomendasi
	-90	HW	36	99	1,03	Lantai naik 20 m
	-90	HW	15	117	1,42	Rekomendasi (Lantai naik 20 m)
	-70	HW	30	79	1,25	Rekomendasi Lantai naik 40 m



Gambar 8. Output model a. *pit design* FK = 0,86; b. simulasi FK = 1,24; c. simulasi FK = 1,03; d. simulasi FK = 1,42; e. simulasi FK = 1,25.



Gambar 9. Desain Lereng dan Simulasi Section-03

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis kestabilan lereng keseluruhan pada section-03, desain awal yakni lereng *high wall* berada pada elevasi -110 mdpl dengan sudut kemiringan lereng sebesar 37° memiliki ketinggian 119 m diperoleh nilai SF sebesar 0,86. Nilai SF ini belum memenuhi standar kestabilan lereng berdasarkan Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018 yakni untuk lereng keseluruhan memiliki FK 1,2-1,5 untuk lereng statis dan kriteria atau tolak ukur penilaian stabilitas lereng bukaan tambang

yakni $SF \geq 1,25$ (Bowles, 1989). Sehingga dilakukan redesign berupa pelandaian lereng dengan beberapa simulasi dan diperoleh hasil simulasi seperti yang ditunjukkan pada tabel 7 dan gambar 8. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh nilai SF sebesar 1,24 dengan dilakukan pelandaian kemiringan lereng dari 37° menjadi 15° namun perlu dilakukan pembuatan *bund wall* untuk menahan material rawa di belakang *pit crest*. Selain itu dengan menaikkan elevasi lantai dari elevasi -110 mdpl menjadi -90 mdpl dengan

kenaikan lantai sebesar 20 m dan pelandaian kemiringan lereng sebesar 15° diperoleh nilai SF sebesar 1,42. Nilai ini sudah memenuhi standar kestabilan lereng menurut Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018.

KESIMPULAN

Dari hasil analisis kestabilan lereng yang disimulasikan dapat disimpulkan bahwa desain awal yang telah dibuat belum stabil yakni memiliki nilai faktor keamanan di bawah 1 sehingga perlu dilakukan *redesign*. Perilaku batuan pada lereng tergolong ke dalam batuan sedang hingga sangat lemah yang ditentukan menggunakan pendekatan klasifikasi massa batuan dan hasil uji kuat tekan (0,1 Mpa – 2,0 Mpa). Hasil simulasi pada section-01 dengan elevasi lantai berada pada -110 mdpl dan sudut kemiringan lereng 25° dengan tinggi lereng keseluruhan 129 m diperoleh SF sebesar 1,28. Kemudian simulasi kedua dengan menaikkan elevasi lantai dari elevasi -110 mdpl menjadi -90 mdpl dengan kenaikan lantai sebesar 20 m dan sudut kemiringan lereng sebesar 25° diperoleh nilai SF sebesar 1,37. Dari hasil simulasi pada section-03 pada elevasi lantai -110 dan sudut kemiringan lereng sebesar 15° tinggi lereng 129 m diperoleh SF sebesar 1,24. Kemudian dengan menaikkan elevasi lantai dari elevasi -110 mdpl menjadi -90 mdpl dengan kenaikan lantai sebesar 20 m dan pelandaian kemiringan lereng sebesar 15° diperoleh nilai SF sebesar 1,42. Dengan menaikkan elevasi lantai dari elevasi -110 mdpl menjadi -70 mdpl dengan kenaikan lantai sebesar 40 m dan sudut kemiringan lereng 30° diperoleh nilai SF sebesar 1,25. Berdasarkan hasil analisis dan simulasi kestabilan lereng diperoleh nilai SF mendekati $\geq 1,25$ sehingga dapat dijadikan sebagai acuan dalam mendesain geometri lereng pada lokasi penelitian.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kepada PT Anak Tambang Indonesia yang telah memfasilitasi dalam penyelesaian riset ini.

DAFTAR PUSTAKA

Arif, I., (2018). *Geoteknik Tambang*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.

Bieniawski, Z.T., (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*, 251 pp. John Wiley & Sons, New York.

Bowles, J. E. (1989). *Sifat-sifat Fisis Dan Geoteknis Tanah:(mekanika Tanah)*. Erlangga.

Deny, T. T., dan Hariyadi, S. (2021). Stability Study Of Open Mine Slopes At Pit 22 Gn Pt Kitadin Site Embalut, Kutai Kartanegara Regency, East Kalimantan Province. *Indonesian Mining Journal*, 24(1), 47-56.

Hoek, E dan Bray, J.W., (1981). *Rock Slope Engineering*. Institution of Mining and Metallurgy, London.

Jalil, A., Nagara, B.D. dan Wicaksono, E., (2022). Kajian dan Evaluasi Geoteknik pada Tambang Terbuka Batubara PT Dizamtra Powerindo Kecamatan Merapi Barat, Kabupaten Lahat, Provinsi Sumatera Barat. *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi XVII Tahun 2022 (ReTII)*, pp. 145-153.

Lalitya, T.J., Indrawan, I., dan Bassmantra, A., (2017). Analisis Kestabilan Lereng Tambang Terbuka Batubara dengan Metode Probabilitas pada Highwall dan Lowwall Pit Tania Panel 2, PT. Kaltim Prima Coal, Kalimantan Timur. In Proceeding, Seminar Nasional Kebumian ke-10 Peran Penelitian Ilmu Kebumian dalam Pembangunan Infrastruktur di Indonesia. 13–14 September 2017.

Loilatu, R. Dan Iswandaru, (2022). Analisis Kestabilan Lereng Andesit Menggunakan Metode FEM pada PT. X. *Jurnal Riset Teknik Pertambangan*. Vol. 2, No. 1, e-ISSN: 2798-6357.

Pane, R.A. dan Anaperta, Y.M., (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. ISSN: 2302-3333.

Prabowo, H., Barlian, E., Syah, N. Dan Sastra, A.T., (2023). Slope Stability Analysis at Coal Mining Sites in Central Kalimantan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 3rd International Conference on Disaster Management.

