

Analisis Kestabilan Lereng Tambang Batubara Berdasarkan *Limit Equilibrium Method* dan *Finite Element Method* di PT. Marunda Graha Mineral Kecamatan Laung Tuhup, Kabupaten Murung Raya, Provinsi Kalimantan Tengah

Adi Saputro¹, Novandri Kusuma Wardana¹, Ag. Isjudarto¹

¹ Program Studi Teknik Pertambangan, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

Fakultas Teknologi Mineral, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

Korespondensi : tsuzetsu6@gmail.com

ABSTRAK

PT. Marunda Graha Mineral dalam penambangan batubara terbuka dihadapkan pada dua hal yaitu batuan utuh (intact rock) dan massa batuan (rock mass), selain itu kondisi yang disebabkan oleh perubahan kadar air tanah atau limpasan menyebabkan batuan memiliki potensi untuk tanah longsor. Analisis kestabilan lereng atau geometri rekomendasi di daerah penelitian ini menggunakan dua metode, yaitu metode Limit Equilibrium (LEM) dan metode elemen hingga (FEM) dengan kriteria keruntuhan Mohr-Coloumb. Faktor keamanan lereng secara keseluruhan berpedoman pada Keputusan Menteri ESDM 1827/30/MEM/2018 dengan kriteria kerawanan longsor sedang pada kondisi statis FK 1.3 dan dinamis 1.1. Hasil analisis kemiringan tunggal dengan tinggi tangga 8 m, kemiringan 40 dan kemiringan keseluruhan kondisi statis, kesetimbangan batas untuk Janbu disederhanakan pada ketinggian 32 meter dengan sudut keseluruhan 30,5 dengan tinggi tangga 8 m, lebar bangku 5,5 m, sudut tangga 40 dan untuk Spencer pada ketinggian 32 m di sudut keseluruhan 33,5 lebar bangku 4 m sudut tangga 40, sedangkan untuk metode elemen hingga diperoleh kondisi statis memiliki geometri pada ketinggian 32 m dengan sudut keseluruhan 30 lebar bangku 5 m. Dalam kondisi dinamis, kesetimbangan batas untuk Janbu sederhana pada ketinggian 32 meter dengan sudut total 33° lebar bangku 4 m dan untuk spencer pada ketinggian 32 m pada sudut total 34° lebar bangku 3 m, sedangkan elemen hingga diperoleh pada ketinggian 32 m dengan total sudut 31 dengan lebar bangku 5 m. Analisis dengan menggunakan dua metode menghasilkan perbedaan nilai faktor keamanan yang tidak berbeda jauh antara kesetimbangan batas dan elemen hingga. Nilai keamanan pada metode elemen hingga menunjukkan hasil yang lebih rendah jika dibandingkan dengan metode kesetimbangan batas. Dimana selisih antara nilai keamanan Janbu yang disederhanakan dan SRF adalah 2% - 5%, sedangkan selisih antara Spencer dan SRF adalah 12% - 14%. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh perbedaan input data, perbedaan iterasi perhitungan, dan perbedaan limit masing-masing aplikasi.

Kata kunci: *Overall slope, limit equilibrium method, finite element method, Mohr-Coulomb*

ABSTRACT

PT. Marunda Graha Mineral in open-pit coal mining is faced with two things, namely intact rock (intact rock) and rock mass (rock mass), in addition to conditions caused by changes in ground water content or runoff, causing rocks to have the potential for landslides. Analyzing slope stability or recommending geometry in this research area uses two methods, namely the Limit Equilibrium (LEM) method and the finite element method (FEM) with Mohr-Coloumb failure criteria. The overall slope safety factor is guided by the Minister of Energy and Mineral Resources Decree 1827/30/MEM/2018 with the criteria of medium landslide severity under static conditions of FK 1.3 and dynamic 1.1. The results of the analysis of a single slope with a ladder height of 8 m, a slope of 40 and the overall slope of static conditions, boundary equilibrium for simplified Janbu at a height of 32 meters with an overall angle of 30.5 with a ladder height of 8 m, bench width 5.5 m, ladder angle 40 and for Spencer at a height of 32 m in the overall corner of 33.5 bench width 4 m ladder angle 40, while for the finite element method obtained static conditions have a geometry at a height of 32 m with an overall angle of 30 bench width 5 m. Under dynamic conditions, the boundary equilibrium for a simplified Janbu at a height of 32 meters with a total angle of 33° bench width 4 m and for spencer at a height of 32 m at a total angle of 34° bench width 3 m, while the finite element is obtained at a height of 32 m with a total angle of 31 with a bench width of 5 m. Analysis using two methods resulted in a difference in the value of the safety factor that did not differ much between boundary and finite element equilibrium. The safety value in the finite element method shows lower results when compared to the boundary equilibrium

method. Where the difference between the security value of the simplified Janbu and the SRF is 2% - 5%, while the difference between Spencer and the SRF is 12% - 14%. This difference can be caused by differences in data input, differences in calculation iterations, and differences in the limits of each application.

Keywords: Overall slope, limit equilibrium method, finite element method, Mohr-Coulomb

1. PENDAHULUAN

Tambang batubara Indonesia sebagian besar dilakukan dengan tambang terbuka (*surface mining*) yakni metode penambangan yang aktivitas pembongkaran, gali, muat angkut dilakukan di atas permukaan bumi yang langsung berhubungan udara bebas. Aktivitas tambang terbuka untuk mendapatkan bahan galian perlu dilakukan penggalian tanah penutup (*over burden*) terutama di tambang batubara. Kegiatan tambang terbuka *open pit* selalu dihadapkan permasalahan dengan lereng baik lereng kerja (*working slope*) maupun lereng akhir (*final slope*). Lereng-lereng tersebut memiliki potensi terjadinya kelongsoran atau kegagalan lereng secara lokal atau keseluruhan, hal ini dikarenakan adanya beberapa faktor seperti sifat fisik dan mekanik batuan, karakteristik massa batuan, geometri lereng, kondisi air tanah serta struktur pada batuan.

Pada lokasi penelitian PT. Marunda Graha Mineral ditambang terbuka batubara dihadapkan atas dua hal, yaitu batuan utuh (*intact rock*) dan massa batuan (*rock mass*), disamping itu dari kondisi yang diakibatkan adanya perubahan kandungan air tanah atau resapan air limpasan (*run off*) menyebabkan batuan berpotensi longsor (Wardana, N.K., 2019) khususnya pada lereng *highwall*. Pada lereng *highwall* adanya air tanah yang akan menambah beban lereng tersebut sehingga air tanah akan meningkatkan gaya dorong material dan menimbulkan berkurangnya kekuatan geser material pada badan lereng untuk menahan longsor, kondisi ini mengabaikan adanya kuat geser yang kecil untuk menahan bidang yang berpotensi longsor oleh karena itu, untuk mencegah potensi kelongsoran perlunya suatu metode analisis kestabilan. Menganalisis kestabilan lereng pada penelitian ini menggunakan dua metode sebagai pembanding yaitu metode *Limit Equilibrium* (LEM) dan *finite element method* (FEM) dengan kriteria keruntuhan *Mohr-Coloumb*.

Luaran dari penelitian ini akan menghasilkan rekomendasi geometri lereng yang aman dan perbandingan dari nilai faktor keamanan menggunakan metode *limite equilibrium method* dengan *finite elemen method* dalam penurunan persamaan angka keamanan, yang berpedoman pada Kepmen Energi Sumber Daya Mineral (ESDM) No. 1827 tahun 2018 dengan merekomendasi faktor keamanan kondisi statis dan dinamis. Oleh karena itu, penelitian ini penting untuk menganalisis kestabilan lereng pada daerah penelitian agar proses penambangan dapat berjalan sesuai dengan harapan perusahaan.

2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini menggunakan jenis penelitian kuantitatif. Hal itu dikarenakan dalam penelitian nantinya, akan menggunakan data-data berupa angka-angka. Penelitian kuantitatif adalah suatu proses menemukan pengetahuan yang menggunakan data berupa angka sebagai alat menganalisis keterangan mengenai apa yang ingin diketahui. Metode penelitian ini melakukan pengujian sifat fisik dan sifat mekanik pada batuan.

a Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mencari bahan-bahan pustaka yang bertujuan mendapatkan referensi yang akan menunjang penelitian, yang diperoleh dari instansi terkait, perpustakaan, jurnal ilmiah. Mengenai analisis kestabilan lereng tambang dengan metode *limit equilibrium method* (LEM) dan *finite element method* (FEM) sebagai referensi untuk melakukan penelitian ini.

2.2 Tahap Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan pengujian labotarium dengan uji sifat fisik dan sifat mekanik.

2.2.1 Data Primer

Data primer berupa data uji labotarium dilakukan dengan pengujian sifat fisik antara lain bobot isi, kadar air, *apparent specific gravit*, *true specific gravity*, porositas, drajat kejenuhan, *void ratio*. Sedangkan pengujian sifat mekanik menggunakan uji kuat tekan uniaksial dan triaksial antara lain nilai kohesi, sudut geser dalam, kuat tekan uniaksial, *modulus young*, *poisson's ratio*.

2.2.2 Data Sekunder

Data sekunder berupa peta lokasi penelitian, getaran gempa, model geologi, litologi, data curah hujan.

2.3 Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan setelah pengujian labotarium mendapatkan data primer property material. Pengolahan data untuk mendapatkan rekomendasi geometri yang aman dengan menggunakan dua metode *limit equilibrium method* dan *finite element method*.

2.4 Tahap Analisis Data

Rekomendasi kestabilan lereng berpedoman Kepmen Energi Sumber Daya Mineral (ESDM) No. 1827 tahun 2018.

2.5 Hasil dan Kesimpulan

Kesimpulan diperoleh rekomendasi geometri lereng dan perbandingan analisis nilai faktor keamanan (FK) atau *strength reduction factor* (SRF).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pemboran Geoteknik

Pemboran geoteknik dilakukan pada titik bor GT 01 (Tabel 1) dilakukan pemboran dengan kedalaman maksimum 47 m. Pada lapisan tersebut dijumpai 6 litologi batuan antara lain:

Tabel 1. Litologi di Titik Bor GT 01

Material	From (m)	To (m)
Soil	0	4.989
Mudstone	4.989	6.042
Siltstone	6.042	6.262
Mudstone	6.264	6.911
Siltstone	6.911	7.175
Mudstone	7.175	8.841
Siltstone	8.416	8.988
Carbonaceous Claystone	8.988	18.988
Sandstone	18.988	26.712
Mudstone	26.712	27.566
Claystone	27.566	29.36
Coal	29.36	30.185
Siltstone	30.185	30.35
Coal	30.3	31.356
Claystone	31.356	35.247
Sandstone	35.247	41.368
Claystone	41.368	47

3.2 Hasil Uji Laboratorium Sampel Coring Titik Bor GT 01

Tahapan pengolahan data laboratorium data material properties yang dibutuhkan pada analisis kestabilan lereng berdasarkan kriteria *Mohr-Coulomb* (Tabel 2) hanya beberapa saja diantaranya;

3.2.1 Uji Fisik

Tabel 2. Nilai Properties *Unit Weight Natural State* GT 01

Lubang Bor	Material	Nilai Unit Weight Natural State	Nilai Unit Weight Natural State
		(gr/cm^3)	(kN/m^3)
GT 01	Soil	3.610	35.40
	Mudstone	2.080	20.39
	Siltstone	1.550	11.45
	Mudstone	2.068	20.28
	Siltstone	1.880	18.44
	Mudstone	1.845	18.09
	Siltstone	1.440	14.120
	Carbonaceous Claystone	1.683	16.504
	Sandstone	2.026	20.39
	Mudstone	2.026	19.86
	Claystone	1.548	15.18
	Coal	1.800	17.65
	Siltstone	1.850	18.14
	Coal	1.260	12.35
	Claystone	1.550	15.200
Sandstone	2.237	21.94	
Claystone	1.440	13.58	

3.2.2 Uji Mekanik

a. *Triaxial Compressive Strenght (TCS)*

Uji kuat tekan triaksial pada batuan dilakukan dengan alat pembebanan pengatur tekanan, sel triaksial tekan, alat ukur deformasi dan rengangan, benda uji, bahan penunjang uji dan perlengkapan lainnya. Parameter yang di dapat uji triaksial (Tabel 3).

- i. *Cohession* (Kohesi)
- ii. *Int.Friction Angle* (Sudut geser dalam)

b. *Uniaxial Compressive Strenght (UCS)*

Nilai kuat tekan uniaksial dari sampel batuan merupakan tegangan yang terjadi pada sampel batuan tersebut mengalami keruntuhan (*failure*) (Tabel 4) akibat dari pembebanan dan di peroleh nilai

- i. *Comp strength qu*
- ii. *Modulus Young*
- iii. *Poisson Ratio*

Tabel 3. Nilai Properties Kohesi dan *Friction Angle* GT 01

Lubang Bor	Material	<i>Triaxial Compressive Strenght</i>	
		Kohesi (kPa)	<i>Friction Angle</i> (°)
	<i>Soil</i>	19.2	18.5
	<i>Mudstone</i>	89.24	26.35

GT 01	<i>Siltstone</i>	27.09	21.35
	<i>Mudstone</i>	207.70	37.54
	<i>Siltstone</i>	21.38	27.34
	<i>Mudstone</i>	90.61	28.02
	<i>Siltstone</i>	26.05	27.34
	<i>Carbonaceous Claystone</i>	25.001	27.8
GT 01	<i>Sandstone</i>	123.56	30.86
	<i>Mudstone</i>	123.56	30.86
	<i>Claystone</i>	23.93	32.70
	<i>Coal</i>	21.08	29.38
	<i>Siltstone</i>	18.97	28.33
	<i>Coal</i>	20.22	28.1
	<i>Claystone</i>	27.09	21.35
	<i>Sandstone</i>	168.87	28.43
	<i>Claystone</i>	26.07	27.34

Tabel 4. Nilai Properties Pengujian UCS

Lubang Bor	Material	Uniaxial Compressive Strenght		
		UCS (kPa)	Modulus Young (kPa)	Possion Ratio
GT 01	Mudstone	1392.54	136729.2176	0.39
	Siltstone	3982.542	2964422	0.31
	Mudstone	1392.54	136729.22	0.39
	Siltstone	4075.64	296553.10	0.30
	Mudstone	1543.57	93196.52	0.39
	Siltstone	4075.64	2965531.00	0.30
	Carbonaceous Claystone	4075.643	296553.096	0.303
	Sandstone	4064.86	1419825.42	0.37
	Mudstone	4064.86	92985.67	0.37
	Claystone	3975.7	2960021	0.291
	Coal	4109.967	31371.473	0.336
	Siltstone	2479.12	121602.50	0.32
	Coal	4140.1715	3138128	0.336
	Claystone	3982.542	2964422	0.310
	Sandstone	1046.37	1454917.54	0.40
	Claystone	4075.6437	2965531	0.303

3.3 Getaran Gempa

Pengaruh gempa bumi di Kalimantan secara statistik tidak dipertimbangkan, namun tetap diperhitungkan dalam penentuan FK. Hal ini mengacu pada peta zonasi gempa bumi Indonesia yang dikeluarkan Kementerian Pekerjaan Umum (2010) yang menggambarkan zona Kalimantan memiliki pengaruh gempa bumi yang relatif kecil dibandingkan dengan pulau-pulau lainnya. Getaran kegempaan di daerah Kalimantan memiliki sisimik yang kecil terutama di daerah Kecamatan Laung Tuhup Kabupaten Murung Raya Propinsi Kalimantan Tengah.

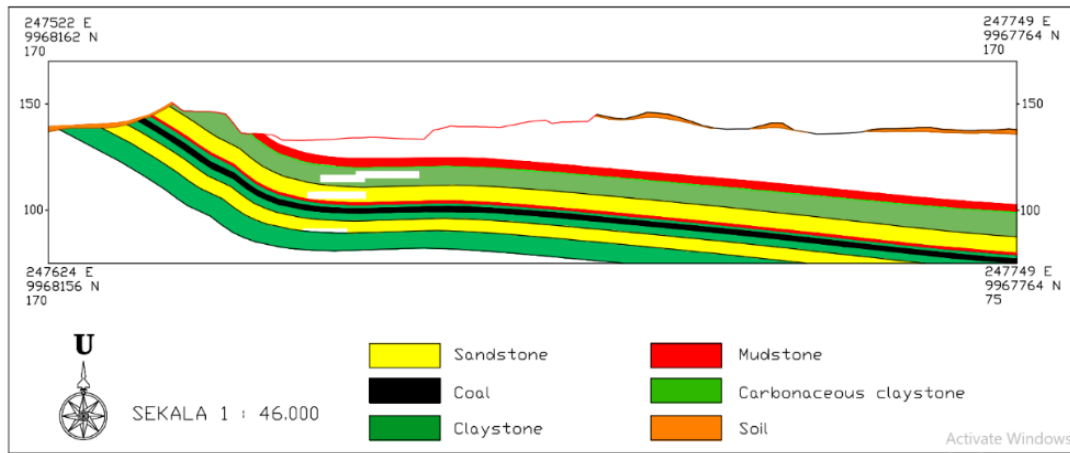
Berikut grafik nilai spektral percepatan terhadap waktu dengan Probabilitas Keruntuhan Bangunan 1%. Grafik berwarna merah jenis batuan yang digunakan dalam penelitian ini (Tabel 5).

Tabel 5. Nilai Sismik Gempa Murung Raya
(Kementerian PUPR Desain Spektra Indonesia, 2022)

Variabel	Nilai
PGA (g)	0.042
Ss (g)	0.085
S1 (g)	0.037
CRS	0.925
FpGA	1.000

3.4 Sayatan Penampang Blok Menyago

Sayatan penampang blok menyago $1441^{\circ}44'312.84''S$ $230^{\circ}45'57''E$ merupakan blok *highwall* yang dilakukan penelitian rekomendasi lereng dengan 6 litologi.



Gambar 1. Sayatan Penampang Blok Menyago

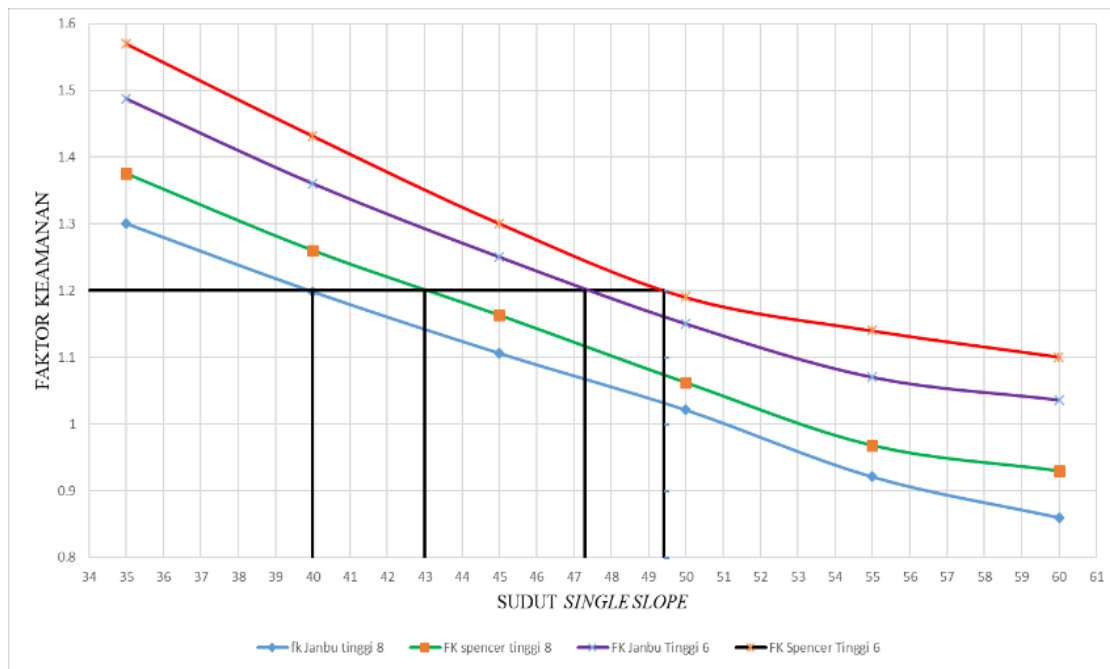
3.5 Analisis Lereng Tunggal

Analisis kestabilan lereng keseluruhan dilakukan terlebih dahulu dilakukan menganalisis lereng tunggal. Pengolahan lereng tunggal sangat berguna untuk simulasi geometri lereng penambangan optimum dilakukan dengan mensimulasikan beberapa kemungkinan sudut dan ketinggian lereng yang dapat dipilih. Analisis lereng tunggal dilakukan dengan material *claystone* dimana memiliki nilai pesimis atau nilai terendah dari pengujian sifat mekanik.

Simulasi lereng tunggal terdapat beberapa tinggi lereng yang disimulasikan yakni 8 dan 6 meter dengan nilai kemiringan yaitu 35° sampai 60°. Berdasarkan hasil FK dan SRF diatas kemudian dibuat kurva pemodelan parameter geoteknik untuk geometri lereng tunggal dengan memanfaatkan *Microsoft excel* dengan nilai FK dan SRF lereng tunggal 1,2 (Tabel 6).

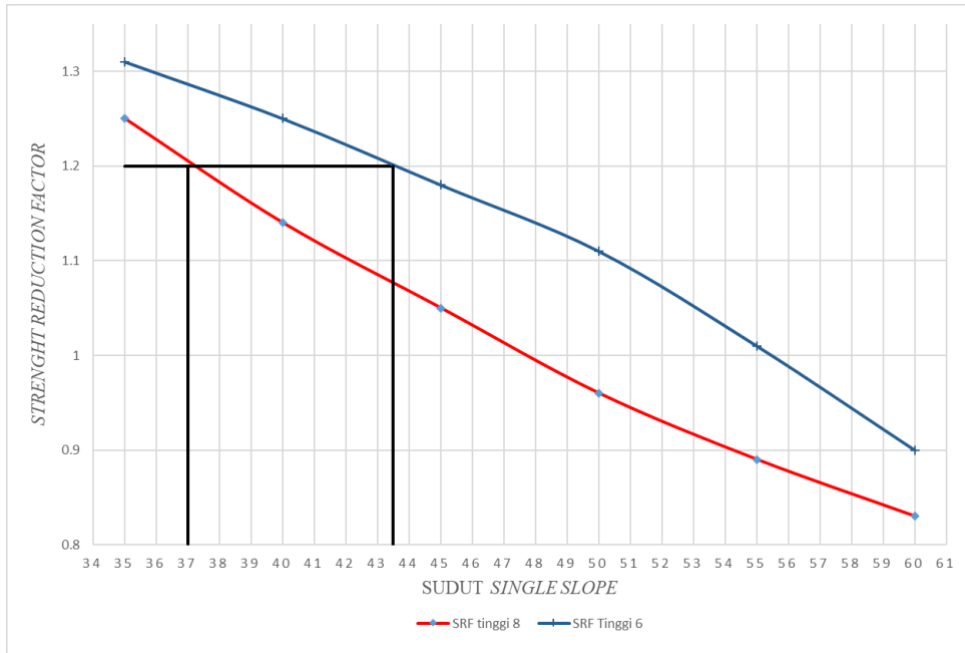
Tabel 6. FK dan SRF Lereng Tunggal

Tinggi (m)	Sudut (°)	FK Janbu Simplified	FK Spencer	SRF
8	35	1.3	1.375	1.25
	40	1.186	1.234	1.14
	45	1.106	1.163	1.05
	50	1.021	1.062	0.96
	55	0.921	0.968	0.89
	60	0.86	0.93	0.83
6	35	1.487	1.57	1.31
	40	1.379	1.431	1.25
	45	1.25	1.3	1.18
	50	1.15	1.19	1.11
	55	1.07	1.14	1.01
	60	1.036	1.1	0.9



Gambar 2. Grafik LEM Faktor Keamanan vs Sudut *Single Slope*

Dari grafik diatas didapatkan suatu kesimpulan untuk sudut lereng tunggal yang memenuhi kriteria nilai kemanan 1.2 dari perusahaan, baik dari kesetimbangan batas dan elemen hingga memiliki sudut dan ketinggian yang berbeda.



Gambar 3. Grafik FEM Faktor Keamanan vs Sudut Lereng

Rekomendasi Single Slope

Dilihat dari hasil analisis lereng tunggal dengan ketinggian jenjang 6 meter dan 8 meter dengan sudut 35° sampai 60° dan dikondisikan pada keadaan jenuh. Dapat diketahui bahwa nilai faktor keamanan yang aman 1.2 yang diterima sesuai standar yang telah ditetapkan oleh Perusahaan, Maka geometri lereng yang digunakan yaitu lereng dengan ketinggian 8 m dengan kemiringan 40°.

3.6 Analisis Lereng Keseluruhan

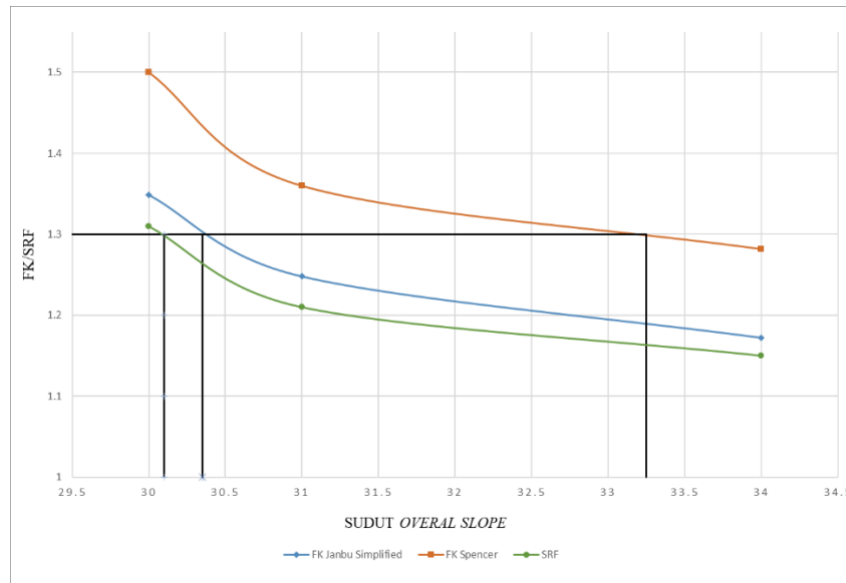
3.6.1 Analisis Lereng Keseluruhan Kondisi Statis

Nilai kermanan lereng tunggal didapat ketinggian 8 m dengan kemiringan 40°. Berikut hasil analisis lereng keseluruhan (*overall slope*) dengan menggunakan kesetimbangan batas dan elemen hingga (Tabel 7).

Tabel 7. FK Overall Slope Kondisi Statis

Geometri	Sudut Overall Slope (°)	Tinggi Overall Slope (m)	Lebar Bench (m)	FK Janbu Simplified	FK Spencer	SRF
1	34	32	3	1.172	1.289	1.15
2	31	32	5	1.248	1.36	1.21
3	30	32	6	1.36	1.476	1.32

Berdasarkan Tabel 7. dibuat kurva pemodelan geometri lereng keseluruhan dengan memanfaatkan *spreadsheet* dengan nilai FK lereng keseluruhan 1,3.



Gambar 4. Grafik Faktor Keamanan vs Sudut Overall Slope

3.6.2 Analisis Lereng Keseluruhan Kondisi Dinamis

Berikut hasil analisis lereng keseluruhan (*overall slope*) kondisi dinamis dengan menggunakan kesetimbangan batas dan elemen hingga. Berdasarkan table 4.3 dibuat kurva pemodelan geometri lereng keseluruhan dengan memanfaatkan *spreadsheet* dengan nilai FK lereng keseluruhan 1,1 (Tabel 8 dan Tabel 9)

Tabel 8. FK Overall Slope Kondisi Dinamis

Geometri	Sudut Overall Slope (°)	Tinggi Overall Slope (m)	Lebar Bench (m)	FK Janbu Simplified	FK Spencer	SRF
1	34	32	3	1.081	1.167	1.02
2	31	32	5	1.141	1.256	1.1
3	30	32	6	1.239	1.365	1.19

Rekomendasi Overall Slope

Tabel 9. Selisih FK Lereng Berdasarkan Analisis FEM dan LEM Kondisi Dinamis

Geometri	Dinamis			Selisih Janbu - SRF (%)	Selisih Spencer - SRF (%)
	Janbu	Spencer	SRF		
1	1.081	1.167	1.02	5.98	14.4
2	1.141	1.256	1.1	4	14.2
3	1.239	1.365	1.19	4.1	14.71

Simulasi geometri lereng keseluruhan dilakukan didapat bahwa rekomendasi pada lereng keseluruhan statis dan dinamis memiliki selisih yang kecil dikarenakan getaran sisimik di Kalimantan Tengah yang relative rendah jadi didapat geometri pada kondisi statis, dengan tinggi jenjang 8 m, sudut jenjang 40°, pada FK janbu simplified didapat diketinggian 32 meter dengan sudut keseluruhan 30.5° lebar *bench* 5.5 m dan FK spencer didaopat diketinggian 32 m sudut keseluruhan 33.5° lebar *bench* 4 m, sedangkan untuk metode *finite element* didapat kondisi statis memiiki geometri diketinggian 32 m dengan sudut keseluruhan 30° lebar *bench* 5 m.

Pada kondisi dinamis, FK janbu simplified didapat ketinggian 32 meter dengan sudut keseluruhan 33°, lebar *bench* 4 m dan FK spencer sudut keseluruhan 34°, lebar *bench* 3 m, sedangkan untuk metode *finite*

element didapat kondisi dinamis memiliki geometri diketinggian 32 m dengan sudut keseluruhan 31° lebar bench 5 m.

3.7 Perbandingan *Limit Equilibrium Method* dan *Factor Finite Element Method*

Menggunakan metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium method*) yaitu Janbu dan Spencer serta metode elemen hingga (*finite element method*). Pedoman dalam kesetabilan lereng statis adalah FK 1,3 dan dinamis FK 1.1. Berdasarkan pembuatan geometri menggunakan dua metode memiliki hasil perbedaan nilai faktor keamanan yang tidak berbeda jauh antara Slide dan Phase. Nilai keamanan dimetode elemen hingga menunjukkan hasil yang lebih rendah jika dibandingkan dengan metode kesetimbangan batas. Selanjutnya, jika dibandingkan antara FK hasil analisis Slide terhadap analisis Phase dalam kondisi statik dan dinamik, maka didapatkan perbedaan selisih kedua SF yaitu:

Tabel 4.4 Selisih FK Lereng Berdasarkan Analisis FEM dan LEM Kondisi Statis

Geometri	Statis			Selisih Janbu - SRF (%)	Selisih Spencer - SRF (%)
	Janbu	Spencer	SRF		
1	1.172	1.282	1.15	1.91	12.1
2	1.248	1.36	1.21	3	12.9
3	1.36	1.476	1.32	3.0	11.82

Penentuan nilai FK pada Slide berbasis *auto refine search* dimana Slide secara otomatis menentukan bidang lemah lereng pada setiap *slip surfaces* untuk kemudian menunjukkan nilai global minimum *slip surfaces* atau nilai FK yang paling kecil dari semua bidang yang sudah dianalisis, sedangkan penentuan FK pada Phase berbasis *phi-c reduction* atau pengurangan nilai kekuatan material secara bertahap hingga mengalami keruntuhan berdasarkan hasil analisis Phase. Berdasarkan hasil kedua aplikasi, nilai keamanan dari lereng hampir mendekati nilai yang sama, berdasarkan hasil pemodelan pada kasus ini, didapatkan selisih Janbu simplified dengan SRF kisaran 2% - 5%, sedangkan selisih Spencer dengan SRF 12% - 14%. Perbedaan ini dapat diakibatkan karena perbedaan input data, perbedaan iterasi perhitungan, dan perbedaan batasan masing-masing aplikasi serta perbedaan ketelitian dan pembulatan dalam perhitungan. Perbedaan tersebut tidak jauh berbeda, sehingga analisis untuk permasalahan geoteknik khususnya kestabilan lereng dapat dilakukan berdasarkan kedua metode LEM dan FEM

4. KESIMPULAN

1. Rekomendasi desain lereng tunggal (*single slope*) dan lereng keseluruhan (*overall slope*), berikut analisis rekomendasi lereng
 - A. Rekomendasi desain lereng tunggal (*single slope*) dari hasil analisis ini berguna dalam proses penanganan lereng untuk perencanaan lereng jangka pendek dan jangka panjang. Didapatkan hasil analisis lereng tunggal dengan ketinggian jenjang 8 m, kemiringan 40°
 - B. Rekomendasi lereng keseluruhan (*overall slope*) sesuai dengan Kepmen ESDM 1827/30/MEM/2018 dengan kriteria keparahan longsoran menengah dan dalam kondisi statis FK 1,3 dan dinamis 1,1 menggunakan dua analisis yakni kesetimbangan batas dan elemen hingga dan masing-masing dalam kondisi statis dan dinamis didapat:
 - Kondisi statis, kesetimbangan batas untuk *Janbu simplified* pada ketinggian 32 meter dengan sudut keseluruhan 30.5° dengan tinggi jenjang 8 m, lebar bench 5,5 m, sudut jenjang 40° dan untuk *Spencer* pada ketinggian 32 m di sudut keseluruhan 33.5° lebar bench 4 m sudut jenjang 40°, sedangkan untuk metode *finite element* didapat kondisi statis memiliki geometri diketinggian 32 m dengan sudut keseluruhan 30° lebar bench 5 m.
 - Kondisi dinamis, kesetimbangan batas untuk *Janbu simplified* pada ketinggian 32 meter dengan sudut keseluruhan 33° lebar bench 4 m dan untuk *Spencer* pada ketinggian 32 m di sudut keseluruhan 34° lebar bench 3 m, sedangkan dielemen hingga didapat diketinggian 32 m dengan sudut keseluruhan 31° dengan lebar bench 5 m.

Perbandingan antara metode *limit equilibrium method* (LEM) dibandingkan dengan metode *finite element method* (FEM), yakni analisis menggunakan dua metode memiliki hasil perbedaan nilai faktor keamanan yang tidak berbeda jauh antara kesetimbangan batas dan elemen hingga. Nilai keamanan di metode elemen hingga menunjukkan hasil yang lebih rendah jika dibandingkan dengan metode

kesetimbangan batas. Dimana selisih nilai kemanan janbu simplified dengan SRF kisaran 2% - 5%, sedangkan selisih spencer dengan SRF 12% - 14%. Perbedaan ini dapat diakibatkan karena perbedaan input data, perbedaan iterasi perhitungan, dan perbedaan batasan masing-masing aplikasi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Bapak Novandri Kusuma Wardana, S.T, S.Si, M.T selaku Dosen Pembimbing I, Ir. A. Isjudarto, M.T selaku Dosen Pembimbing II, Dosen-dosen Teknik Pertambangan Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, dan teman-teman mahasiswa jurusan Program Studi Teknik Pertambangan yang tidak dapat penyusun sebutkan satu persatu.

DAFTAR PUSTAKA

1. Arif, Irwandy. 2016. *Geoteknik Tambang Mewujudkan Produksi Tambang yang Berkelanjutan dengan Menjaga Kestabilan Lereng*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.
2. Brinkgreve, R.B.J et. al. 1998. *PLAXIS Finite Element for Soil and Rock Analysis*. Version 8.2 Dynamics. A.A. Balkema, Rotterdam.
3. Eveny, ON., 2014, Perbandingan Metode Bishop, Janbu dan Spencer dalam Perhitungan Stabilitas Lereng pada Batuan Tuff, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran", Yogyakarta
4. Griggs, D. T. and J.Handin. 1960. *Observations on Freacture and a Hypothesis of Earthquakes*. Geological Society Of America, New York.
5. Hoek, E., and J. Bray. 2005. *Rock Slope Engineering Civil and Mining*. 4th Edition, Press Spon, New York.
6. Hoek E. and Brown ET. 1980. *Underground Ecavation in Rock*. The Institution Of Mining and Metallurgy, London.
7. Kementerian Pekerja Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), 2021 Desain Spektra http://puskim.pu.go.id/Aplikasi/desain_spektra_indonesia_2011/. diakses pada 8 September 2021 pukul 10.27.
8. Krahn, John. 2004. *The relationship between Limit Equilibrium Slope Stability Method*. Dept. of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Canada.
9. Kramadibrata, dkk. 2000. *Sifat Fisik dan Mekanika Batuan*. Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
10. Lambe, T. W and Whitman, R.V., 1979. *Soil Mechanics*, John Willey & Sons, Inc., New York.
11. Liong, G. T., & Herman, D. J., 2012. *Analisa Stabilitas Lereng Limit Equilibrium vs Finite Element Method*. HATTI-PIT-XVI. Jakarta.
12. Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral., 2018. *Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 1827 K/30/MEM/2018 Tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan Yang Baik*, hlm 57.
13. Oageng, Otlotleng. 2016. *Buffer Blasting as Applicable to Spontaneous Combustion in Coal Surface Mines*. University of Johannesburg Department of Mining Engineering.
14. Ramadhani, Nuzurudha Rizki. 2020. *Desain Stabilitas Dumping Tambang Batubara Berdasarkan Analisis Limit Equilibrium Method dan Finite Element Method*. Skripsi. Fakultas Perencanaan Infrastruktur Program Studi Jurusan Teknik Sipil Universitas Pertamina, Jakarta.
15. Satyana, A.H., 1994, The Northern Massives of the Meratus Mountains, South Kalimantan : Nature, Evolution and Tectonic Implications to the Barito Structures, *Proceedings Indonesian Association of Geologists (IAGI)*, 23rd Annual Convention, Jakarta, p. 457- 470.
16. Supriatna, S., dkk, 1995. Geologi Ragonal Blok Menyago dan satatigrafi Umum Cekungan Barito. Laporan Akhir Analisis Geoteknik dan Periferal di Blok Menyago PT. Asmin Bara Bronang, 2002 GeoAce, Bandung.
17. Standar Nasional Indonesia 03-2455. 1991. *Metode Pengujian Triaxial A*
18. Standar Nasional Indonesia 03-4813. 1998. *Metode Pengujian Triaksial untuk Tanah Kohesif dalam Keadaan Tanpa Konsolidasi dan Drainase*, ASTM D 2850.
19. Standar Nasional Indonesia 2815. 2019. *Cara Uji Tekan Triaksial pada Batu di Labotarium*.
20. Standar Nasional Indonesia 2825. 2008. *Cara Uji Kuat Batu Uniaksial*.

21. Wardana, N.K., 2019. *Analisis Kestabilan Lereng Berdasarkan Kekuatan Geser Massa Batuan Terhadap Kandungan Air pada Tambang Batubara di area Blok Menyango*. PROMINE, vol 7(2), Hlm 72-79.