



PROBABILITAS LONGSOR PADA LERENG TAMBANG BATUBARA TERBUKA SISI *SIDEWALL* SELATAN *PIT X*, KALIMANTAN SELATAN

Silvy Oktari Rusni^{1*}, Raden Irvan Sophian¹, Zufialdi Zakaria¹
¹Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran

*Korespondensi: silvyarusni@gmail.com

ABSTRAK

Analisis kestabilan lereng sangatlah penting karena dapat menjamin kelancaran produksi dan keselamatan kerja pada tambang terbuka. Analisis kestabilan lereng tidak cukup hanya dengan perhitungan nilai faktor keamanan saja. Namun, perlu diperhitungkan nilai probabilitas kelongsorannya. Penelitian ini dilakukan pada desain lereng *sidewall* selatan *pit X* dengan metode probabilistik. Data statistik yang dijadikan sebagai variabel acak yaitu nilai kohesi, sudut geser dalam, dan nilai *unit weight* menggunakan metode Kolmogorov-Smirnov dengan metode *sampling* Monte-Carlo. Simulasi kestabilan lereng menggunakan metode Morgenstern-Price berdasarkan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb. Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain lereng *sidewall* selatan tidak memenuhi kriteria lereng stabil. Sehingga perlu dilakukan revisi desain. Revisi dilakukan dengan mengurangi nilai *overall slope* dengan memundurkan *crest*, mengurangi tinggi tiap jenjang, dan memperlebar lebar jenjang. Untuk penambahan jarak jalan di atas lereng, akan meningkatkan nilai faktor keamanan. Namun, pada batas titik tertentu, penambahan jarak beban tidak lagi berpengaruh terhadap peningkatan nilai FK maupun PK. Sedangkan antara nilai FK dan PK memiliki hubungan yang berbanding terbalik, dimana nilai FK yang semakin besar akan memperkecil nilai probabilitas kelongsorannya.

Kata Kunci: Analisis kestabilan lereng, Metode probabilitas, Probabilitas kelongsoran, Faktor keamanan

ABSTRACT

In open pit mining operational, slope stability is very important to ensure the continuity of production and work safety. Slope stability analysis is not only determined by the safety factor value, but also probability of failure is necessary. This research was conducted on south sidewall slope design at Pit X with the probabilistic method. Statistical data was used as a random variable including cohesion, internal friction angle, and unit weight with Kolmogorov-Smirnov method and Monte-Carlo sampling method. Slope stability simulation was using the Morgenstern-Price method based on the Mohr-Coulomb failure criterion. The simulation result shows that the south sidewall slope design was unstable. So, a redesign is necessary. Redesign was made by reducing the overall slope and set the crest slope back, reducing the bench height, and increasing the bench width. The additional road distance from the crest slope will increase the safety factor value. But, in a certain point, the additional road distance is no longer influential on the increasing both safety factor value and the probability of failure. Between safety factor and probability of failure have inversely relationship, where the increasing of safety factor value will reduce the probability of failure value.

Keywords: Slope stability analysis; Probabilistic method; Probability of failure; Safety factor

1. PENDAHULUAN

Dalam sistem tambang batubara terbuka kestabilan lereng sangatlah penting

karena dapat menjamin kelancaran operasional produksi maupun keselamatan kerja. Jika kondisi lereng tidak stabil atau

terganggu maka akan terjadi longsor. Untuk menentukan kestabilan suatu lereng, digunakan nilai FK (Faktor Keamanan). Namun nilai FK saja tidak cukup, karena lereng yang dikatakan stabil juga dapat terjadi longsor jika memiliki nilai probabilitas longsor (PK) yang tinggi. Sehingga, penentuan nilai PK juga sangat penting. Oleh sebab itu, pada penelitian ini penulis menggunakan metode probabilitas.

Sebagai salah satu langkah untuk mencapai optimalisasi penambangan, maka penulis melakukan penelitian mengenai analisis kestabilan lereng, yang dapat digunakan sebagai bahan dalam penilaian resiko untuk menjamin kelancaran dan keselamatan operasional penambangan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sifat Fisik dan Mekanik Batuan

Sifat fisik dan mekanik batuan yang dibutuhkan dalam analisis kestabilan lereng diantaranya yaitu berat isi (*unit weight*), kohesi, dan sudut geser dalam.

- Berat isi merupakan satuan gaya per satuan volume dengan satuan kN/m^3 . Berat isi termasuk ke dalam sifat fisik batuan. Persamaan untuk berat isi adalah sebagai berikut.

$$\gamma = \frac{\text{berat material}}{\text{volume material}}$$

- Kohesi merupakan kemampuan tarik menarik antar partikel atau ukuran daya tarik antar partikel, sehingga untuk memisahkannya diperlukan suatu gaya. Kohesi termasuk ke dalam sifat mekanik batuan. Nilai dari kohesi didapat dari hasil uji triaksial. Kohesi memiliki satuan kPa. Semakin besar kohesi maka material tersebut akan semakin tahan akan gerakan.
- Sudut geser dalam adalah sudut rekahan yang dibentuk jika suatu material diberi tegangan atau gaya terhadapnya melebihi tegangan gesernya. Semakin besar sudut geser dalam suatu material maka material tersebut akan lebih tahan menerima tegangan dari luar. Satuan dari sudut geser dalam adalah derajat.

Nilai sudut geser dalam didapat dari uji triaksial.

2.2 Metode Kestabilan Lereng

Dalam kestabilan lereng, terdapat dua metode yang digunakan yaitu metode kesetimbangan batas (*Limit Equilibrium Method / LEM*) dan metode elemen hingga (*Finite Element / FEM*). Pada metode LEM prinsip yang digunakan yaitu prinsip kesetimbangan gaya dan mengasumsikan bidang kelongsoran. Sedangkan metode FEM tidak dilakukan asumsi bidang longsor. Pada penelitian ini digunakan metode LEM.

Metode kesetimbangan batas (*Limit Equilibrium Method / LEM*) merupakan salah satu metode yang sering digunakan dalam analisis kestabilan lereng. Metode ini merupakan metode yang menggunakan prinsip kesetimbangan gaya. Metode analisis ini pertama-tama mengasumsikan bidang kelongsoran yang dapat terjadi. Terdapat dua asumsi bidang kelongsoran yaitu kelongsoran berbentuk *circular* dan bidang kelongsoran yang diasumsikan berbentuk *non-circular*. Perhitungan nilai faktor keamanan (FK) dengan metode kesetimbangan batas ini yaitu:

$$FS = \frac{\text{resisting force}}{\text{driving force}} = \frac{cA + W \cos\psi_p \tan\phi}{W \sin\psi_p}$$

Dimana:

C = kohesi (kPa)

A = luas bidang irisan (m^2)

W = berat massa segmen (kN)

ψ = sudut yang dibentuk antara bidang gelincir dan bidang horizontal

Φ = sudut geser dalam (derajat)

2.3 Metode Probabilistik

Metode probabilistik merupakan metode sistematis untuk menguji pengaruh keberagaman parameter dalam kestabilan lereng. Metode probabilistik ini merupakan suatu cara untuk menentukan nilai faktor keamanan dengan memperlakukan nilai masukan sebagai variabel acak.

Dalam metode probabilistik, terdapat beberapa parameter yang dibutuhkan dalam analisis kestabilan lereng, yaitu nilai rata-rata, standar deviasi, nilai relatif maksimum dan minimum.

- Nilai rata-rata didapat dari jumlah seluruh data dibagi dengan banyaknya data. Nilai rata-rata ini merupakan nilai yang mewakili besaran dari objek yang diamati. Persamaan nilai rata-rata adalah sebagai berikut:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$$

- Standar deviasi adalah suatu nilai yang menunjukkan tingkat variasi kelompok atau ukuran standar penyimpangan dari rata-ratanya. Persamaan standar deviasi adalah sebagai berikut:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}$$

- Nilai relatif maksimum didapatkan dari nilai maksimum dikurangi nilai rata-rata (Azizi, 2014), sedangkan nilai relatif minimum didapatkan dari nilai rata-rata dikurangi nilai minimum (Azizi, 2014). Nilai relatif maksimum dan nilai relatif minimum ini digunakan sebagai sebagai salah satu variabel statistik dalam analisis nilai faktor keamanan dan nilai probabilitas kelongsoran.

2.4 Probabilitas Kelongsoran

Probabilitas kelongsoran merupakan presentase dari jumlah nilai faktor keamanan lereng yang memiliki nilai kurang dari 1 ($FK < 1$) dan dibandingkan dengan seluruh nilai faktor keamanan lereng yang telah dihitung berdasarkan jumlah iterasi pada metode *sampling*. Pada penelitian ini, digunakan metode *sampling* Monte Carlo. Pada penelitian ini kriteria ambang batas nilai faktor keamanan (FK) dan probabilitas kelongsoran (PK) yang digunakan yaitu berdasarkan Keputusan Menteri ESDM No.1827 Tahun 2018. Dimana untuk lereng keseluruhan dengan keparahan longsor tinggi nilai FK minimal (dalam keadaan dinamis) yaitu sebesar 1.1,

sedangkan untuk nilai PK maksimal yang dapat diterima yaitu sebesar 5%.

Tabel 1. Nilai FK dan PK (KEPMEN ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018)

Jenis Lereng	Keparahan Longsor (Consequences of Failure/ CoF)	Kriteria dapat diterima (Acceptance Criteria)		
		Faktor Keamanan (FK) Statis (Min)	Faktor Keamanan (FK) Dinamis (min)	Probabilitas Longsor (Probability of Failure) (maks) PoF ($FK \leq 1$)
Lereng tunggal	Rendah s.d. Tinggi	1,1	Tidak ada	25-50%
Inter-ramp	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%

3. METODE

Dalam penelitian ini, pengumpulan data terbagi menjadi dua yaitu data primer dan data sekunder. Pengumpulan data primer dilakukan dengan metode *windows mapping* yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik litologi daerah penelitian baik secara geologi maupun geologi teknik. Sedangkan data sekunder yang diperoleh berupa data sifat fisik dan mekanik batuan hasil uji laboratorium, peta topografi daerah penelitian, log hasil pemboran inti, dan data kegempaan daerah penelitian.

Penampang lereng didapat dari data topografi dan korelasi data litologi hasil pemboran inti. Selanjutnya dilakukan analisis statistik menggunakan *software* SPSS 25 yang bertujuan untuk mendapatkan nilai *mean*, standar deviasi, serta mendapatkan jenis distribusi yang sesuai menggunakan metode Kolmogorov – Smirnov (K-S).

Penentuan nilai faktor keamanan dilakukan menggunakan metode kesetimbangan batas Morgenstern – Price. Analisis probabilitas dan penentuan nilai faktor keamanan lereng ini menggunakan *software* SLIDE 6. Analisis probabilitas ini bertujuan untuk mendapatkan nilai probabilitas kelongsoran

(PK). Metode *sampling* yang digunakan menggunakan metode Monte Carlo. Simulasi lereng stabil dilakukan pada *overall slope* pada kondisi jenuh dan tak jenuh dengan pengaruh getaran. Setelah didapatkan nilai faktor keamanan dan nilai probabilitas kelongsoran, kemudian dilakukan redesain untuk mendapatkan desain lereng yang stabil. Kriteria keruntuhan yang dipakai pada penelitian ini yaitu kriteria keruntuhan Mohr – Colomb.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kondisi Geologi dan Geologi Teknik Daerah Penelitian

Berdasarkan hasil pemetaan yang telah dilakukan, daerah penelitian terdiri atas litologi batupasir kuarsa dengan ukuran butir pasir halus – pasir sangat halus, batulempung, dan batubara. Litologi tersebut bersifat nonkarbonatan. Dengan struktur sedimen yang dijumpai berupa laminasi sejajar dan masif.

Sedangkan secara geologi teknik, daerah penelitian terbagi atas tanah (*soil*) yang berukuran butir pasir, batulempung, batulempung lunak, batupasir, batupasir lepas dan batubara. Pembagian tersebut berdasarkan pada karakteristik kekuatan batuan. Dimana kekuatan batuan di daerah penelitian beragam mulai dari S2 (*soft clay*) sampai R4 (*strong rock*), namun didominasi oleh batuan dengan kekuatan lemah sampai medium.

4.2 Analisis Statistik

Variabel-variabel acak yang digunakan dalam analisis statistik ini yaitu nilai kohesi, sudut geser dalam, dan *unit weight*. Pengujian statistik ini dilakukan berdasarkan jenis litologinya, yaitu pada batulempung, batupasir, dan batubara, dimana masing-masing jenis litologi tersebut mempunyai nilai ketiga variabel acak yang telah disebutkan sebelumnya.

4.2.1 Batulempung

Tabel 2. Hasil Uji Statistik Batulempung

LAPISAN	JENIS DISTRIBUSI	KOHESI (kN/m ²)	UNIT WEIGHT (kN/m ³)	SUDUT GESER DALAM (°)
CS01	Normal	106.3	17	22.6
CS02	Normal	117.9	18.2	26.2
CS02A	Normal	117.9	18.2	26.2
CS02B	Normal	117.9	18.2	26.2
CS03	Normal	120	20	27
CS04	Normal	122.4	20.6	28.1
CS05	Normal	126.5	21.3	29
CS06	Normal	129	24.7	29.9
Rata-rata		120	20	27
Standar Deviasi		6.86	2.463	2.23
Relatif Maksimum		9.26	4.93	3
Relatif Minimum		13.44	2.78	4.3

4.2.2 Batupasir

Tabel 3. Hasil Uji Statistik Batupasir

LAPISAN	JENIS DISTRIBUSI	KOHESI (kN/m ²)	UNIT WEIGHT (kN/m ³)	SUDUT GESER DALAM (°)
SS01	Normal	37.6	17.7	18.1
SS02	Normal	38.8	18.5	18.6
SS03	Normal	40.2	19	20.2
SS04	Normal	42.3	20.9	20.5
Rata-rata		39.725	19.025	19.35
Standar Deviasi		2.019	1.36	1.179
Relatif Maksimum		2.575	1.875	1.15
Relatif Minimum		2.125	1.325	1.25

4.2.3 Batubara

Tabel 4. Hasil Uji Statistik Batubara

LAPISAN	JENIS DISTRIBUSI	KOHESI (kN/m ²)	UNIT WEIGHT (kN/m ³)	SUDUT GESER DALAM (°)
A5B	Normal	94	11.4	21.4
A5A	Normal	98.7	12.6	24.2
A5A1	Normal	98.7	12.6	24.2
A5A2	Normal	98.7	12.6	24.2
A	Normal	102.3	13.6	26.3
AU	Normal	102.3	13.6	26.3
AL	Normal	102.3	13.6	26.3
X	Normal	103	14	27.1
Rata-rata		100	13	25
Standar Deviasi		3.069	0.855	1.865
Relatif Maksimum		3	1	2.1
Relatif Minimum		6	1.6	3.6

4.3 Hasil Simulasi dan Rekomendasi Lereng Stabil

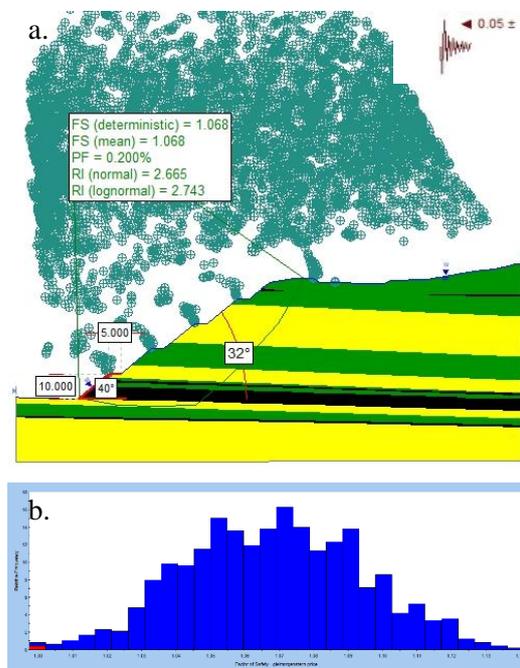
Lereng yang menjadi objek penelitian terletak di sisi *sidewall* selatan *pit X*. Pemilihan lereng ini dikarenakan lereng tersebut termasuk ke dalam lereng kritis, dimana telah terjadi longsoran yang dapat mengganggu serta membahayakan kegiatan

operasional pertambangan, sehingga perlu dilakukan analisis kestabilan lereng.



Gambar 1. Kondisi Aktual Lereng Sidewall Selatan dengan Garis Penampang A-A'

Hasil simulasi yang telah dilakukan terhadap lereng desain asli pada keadaan kondisi air tanah jenuh dan dinamis (dipengaruhi oleh adanya koefisien getaran) menunjukkan bahwa lereng desain asli belum memenuhi kriteria sebagai lereng stabil, karena memiliki nilai FK (mean) sebesar 1.068 dan nilai PK sebesar 0.2%. Berikut merupakan hasil simulasi lereng desain.



Gambar 2. (a.) Hasil Simulasi Lereng Desain Kondisi Jenuh dan Dinamis (b.) Histogram PK Lereng, Warna Merah Menunjukkan Nilai $FK < 1$

Berdasarkan hasil simulasi lereng desain akhir yang belum memenuhi kriteria sebagai lereng stabil, maka perlu dilakukan redesain untuk mendapatkan desain lereng stabil. Simulasi untuk mendapatkan desain lereng stabil dilakukan dengan melakukan beberapa perubahan pada beberapa kondisi yaitu perubahan *overall slope*, perubahan *bench face angle*, perubahan tinggi jenjang, perubahan lebar jenjang, perubahan jumlah jenjang, perubahan jarak beban di atas lereng dan perubahan kondisi Muka Air Tanah (MAT).

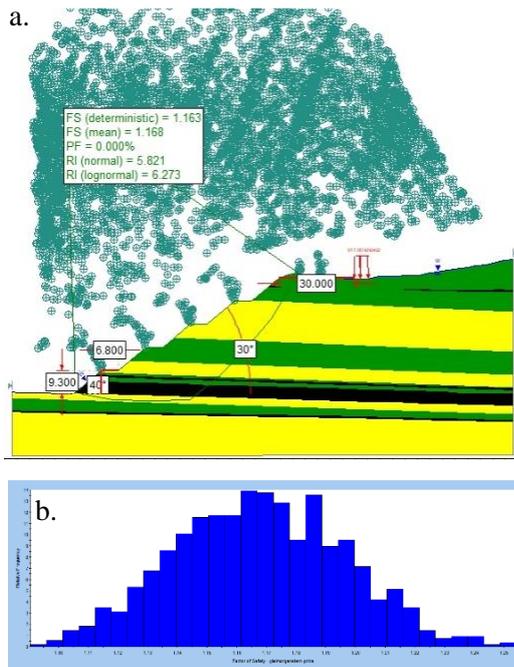
Variasi *overall slope* untuk simulasi lereng dilakukan pada sudut 30° , 31° , dan 32° . Untuk variasi jumlah jenjang pada simulasi lereng dilakukan pada kondisi 4 jenjang dan 5 jenjang. Sedangkan variasi *bench face angle* untuk simulasi lereng dilakukan pada sudut 35° , 38° , dan 40° . Variasi tinggi jenjang untuk simulasi dilakukan dengan tinggi 11.6 meter dan 9.3 meter. Sedangkan untuk variasi lebar jenjang pada simulasi mengikuti variasi dari *overall slope*, *bench face angle*, dan jumlah jenjang. Untuk variasi kondisi muka air tanah dilakukan pada kondisi lereng jenuh air (*saturated*) dan kondisi lereng kering (tanpa pengaruh muka air tanah). Selain itu, karena pada bagian atas lereng digunakan sebagai jalan melintasnya *haul dump truck* untuk mengangkut batubara dan *overburden*, maka dilakukan pula variasi pada jarak jalan terhadap puncak lereng. Variasi jarak beban di atas lereng dilakukan pada jarak 10 meter, 20 meter, 30 meter, 40 meter, 50 meter dan tanpa adanya beban.

Berdasarkan hasil simulasi sebanyak 216 yang telah dilakukan, terdapat 39 simulasi lereng yang tidak memenuhi kriteria sebagai lereng stabil, karena memiliki nilai $FK < 1.1$ dan nilai $PK < 5\%$. Lereng yang tidak memenuhi kriteria sebagai lereng stabil didominasi pada kondisi lereng jenuh dengan jarak beban yang terlalu dekat dengan puncak lereng (yaitu pada jarak 10 meter dan 20 meter). Sedangkan pada kondisi lereng kering, hasil simulasi

menunjukkan bahwa semua lereng dalam kondisi stabil.

Berdasarkan hasil simulasi, penambahan jarak beban dari puncak lereng akan meningkatkan nilai Faktor Keamanan (FK) dan menurunkan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK). Namun pada suatu titik, penambahan jarak beban tidak lagi berpengaruh terhadap nilai FK maupun PK. Pada lereng ini, peningkatan nilai FK dan penurunan nilai PK berhenti pada jarak beban 30 meter dari puncak lereng. Sehingga, beban yang berjarak lebih dari 30 meter dari puncak lereng memiliki nilai FK dan PK yang konstan.

Berikut ini merupakan desain lereng stabil hasil simulasi untuk lereng penampang A-A'.



Gambar 3. (a.) Desain Lereng Stabil (*Over Slope*: 30° , *BFA*: 40° , Tinggi:9.3 m, Lebar: 6.8 m) Kondisi Jenuh dan Dinamis (Jarak Beban di Atas Lereng 30m) (b.) Histogram PK Desain Lereng Stabil

Perbandingan nilai FK dan PK lereng desain asli dengan nilai FK dan PK lereng redesain adalah sebagai berikut.

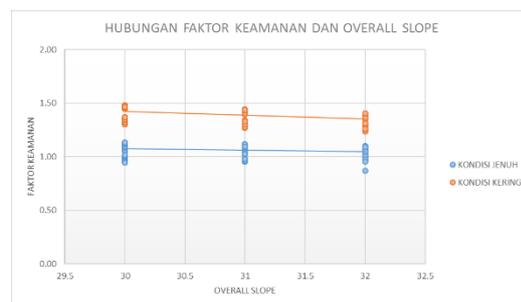
Tabel 5. Nilai FK dan PK Lereng Desain Asli dan Lereng Rekomendasi

Desain Lereng	Kondisi MAT	FK mean	PK (%)	Geometri Lereng
Asli	Jenuh	1.068	0.2	<i>Overall slope</i> 32° , <i>BFA</i> 40° , tinggi jenjang 10 meter, lebar jenjang 5 meter
Rekomendasi	Jenuh	1.168	0	<i>Overall slope</i> 30° , <i>BFA</i> 40° , tinggi jenjang 9.3 meter, lebar jenjang 6.8 meter, jarak jalan dari puncak lereng 30 meter

4.4 Hubungan Nilai Faktor Keamanan dan Variabel Acak

Terdapat beberapa variabel acak yang digunakan pada penelitian ini, yaitu nilai *overall slope*, lebar jenjang, tinggi jenjang, nilai *bench face angle*, kondisi muka air tanah, serta jarak beban di atas lereng. Keenam variabel acak tersebut berpengaruh terhadap nilai faktor keamanan lereng maupun probabilitas kelongsoran lereng.

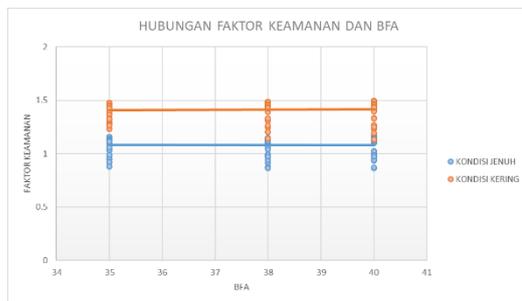
Berdasarkan plot pada diagram *scatter* di bawah, dapat dilihat bahwa hubungan antara nilai faktor keamanan dan *overall slope* memiliki garis *trend* negatif. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan sudut *overall slope* akan menaikkan nilai faktor keamanan baik itu pada kondisi jenuh maupun pada kondisi kering. Sehingga semakin landai sudut *overall slope* maka nilai faktor keamanan akan semakin besar.



Gambar 4. Hubungan Nilai Faktor Keamanan dan Sudut *Overall Slope*

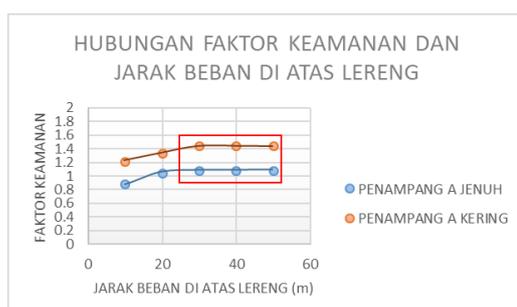
Untuk hubungan antara nilai faktor keamanan dan lebar jenjang menunjukkan garis *trend* yang positif, dimana penambahan lebar jenjang akan meningkatkan nilai faktor keamanan lereng. Sedangkan untuk hubungan antara nilai

faktor keamanan dan *BFA* (*bench face angle*) menunjukkan garis *trend* yang juga positif, dimana peningkatan nilai *BFA* akan meningkatkan nilai faktor keamanan. Hal ini berkaitan dengan lebar jenjang dimana nilai sudut *BFA* yang semakin besar, akan memperbesar lebar jenjang, sehingga akan meningkatkan juga nilai faktor keamanan lereng, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Sebaliknya nilai sudut *BFA* yang semakin landai akan mempersempit lebar jenjang, sehingga akan menurunkan nilai faktor keamanan lereng. Sehingga dapat disimpulkan bahwa lebar jenjang lebih berpengaruh terhadap nilai faktor keamanan lereng dibandingkan dengan nilai *BFA*.



Gambar 5. Hubungan Nilai Faktor Keamanan dan BFA

Sementara itu, hubungan antara jarak beban di atas lereng dengan nilai faktor keamanan berbanding lurus, dimana penambahan jarak beban di atas lereng akan meningkatkan nilai faktor keamanan. Namun, pada batas titik tertentu, penambahan jarak beban tidak lagi berpengaruh terhadap peningkatan nilai FK maupun PK. Seperti pada diagram di bawah ini, dimana setelah batas jarak tertentu nilai FK akan konstan, bahkan akan memiliki nilai yang sama dengan lereng yang tidak diberi beban.



Gambar 6. Hubungan Nilai Faktor Keamanan dan Jarak Beban di Atas Lereng Sementara dalam satu lereng yang sama, antara nilai faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran memiliki hubungan yang berbanding terbalik, dimana peningkatan nilai faktor keamanan akan memperkecil nilai probabilitas kelongsoran. Semakin besar nilai faktor keamanannya maka probabilitas lereng tersebut longsor akan semakin kecil, sehingga lereng akan semakin stabil

5. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu:

- Hasil simulasi lereng desain akhir menunjukkan bahwa lereng tersebut tidak memenuhi kriteria sebagai lereng stabil, karena lereng tersebut memiliki nilai $FK < 1.1$ yaitu sebesar 1.068, walaupun memiliki nilai $PK < 5\%$ yaitu sebesar 0.2%.
- Antara nilai FK dan PK memiliki hubungan yang berbanding terbalik, dimana peningkatan nilai FK akan memperkecil nilai PK. Semakin besar nilai FK maka akan semakin kecil pula nilai PKnya, sehingga lereng semakin stabil
- Hubungan antara jarak beban di atas lereng dengan nilai FK berbanding lurus, dimana penambahan jarak beban di atas lereng akan meningkatkan nilai FK. Namun, pada batas titik tertentu, penambahan jarak beban tidak lagi berpengaruh terhadap peningkatan nilai FK maupun PK. Nilai FK dan PK mulai konstan pada jarak beban 30 meter dari puncak lereng.
- Rekomendasi desain lereng stabil dilakukan dengan mengubah *overall slope* menjadi 30° , tinggi jenjang 10 m, lebar jenjang 6.8 m, BFA 40° , dan jarak jalan sejauh 30 m dari puncak lereng.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 2017, *Peta Sumber dan Bahaya Gempabumi Indonesia Tahun 2017*, Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Anonim, 2018, *Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik*, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.
- Azizi, 2014. *Pengembangan Metode Penentuan Reliabilitas Kestabilan Lereng Tambang Terbuka Batubara di Indonesia*. Bandung: Disertasi Institut Teknologi Bandung (ITB).
- Azizi, Kramadibrata, Wattimena, Indra, dan Adriansyah, 2012. *Analisis Resiko Kestabilan Lereng Tambang Terbuka (Studi Kasus Tambang Mineral X)*. Prosiding Simposium dan Seminar Geomekanika Ke-1.
- Bowles, 1979, *Physical and Geotechnical Properties of Soils*. McGraw-Hill, Inc.
- Harr, 1977. *Mechanics of Participate Media: a Probabilistic Approach*. New York: McGraw-Hill.
- Hoek dan Bray, 1981, *Rock Slope Engineering: 3rd Edition*. New York: CRC Press.
- Liong dan Herman, 2012, *Analisa Stabilitas Lereng Limit Equilibrium Vs Finite Element Method*. Jakarta: HATTI – PIT – XVI 2012, 4 – 5 DEC 2012.
- Romeu, 2003, *Anderson – Darling: A Goodness of Fit Test for Small Samples Assumption, Selected Topics in Related Technologies*, 5 – (10): 1 – 6pp.
- Steffen, Contreras, Terbrugge, dan Venter, 2008, *A Risk Evaluation Approach for Pit Slope Design*. San Francisco: The 42nd US Rock Mechanics Symposium dan 2nd US – Canada Rock Mechanics Symposium.
- Wyllie dan Mah, 2004, *Rock Slope Engineering: 4th Edition*. London: Spon Press Taylor and Francis Group.