

ANALISIS PROBABILITAS KELONGSORAN LERENG PADA DESAIN LERENG TAMBANG BATUBARA DENGAN MENGGUNAKAN METODE KESETIMBANGAN BATAS

¹⁾Panangian Manullang

¹⁾Prodi Teknik Pertambangan, Institut Teknologi Bandung

*E-mail: panangianmanullang98@gmail.com

ABSTRAK

Salah satu pengendalian risiko dari kegiatan pertambangan adalah merancang lereng tambang yang stabil. Sesuai dengan Keputusan Menteri (Kepmen) ESDM Nomor 1827K/30/MEM/2018/ tentang Pedoman Pengelolaan Teknis Pertambangan (Lampiran II), analisis kestabilan lereng dilakukan dengan menghitung nilai Faktor Keamanan (FK) dan menghitung Probabilitas Kelongsoran (PK) lereng secara statis dan dinamis. Penelitian ini difokuskan menelaah potensi longsor menggunakan metode kesetimbangan batas berdasarkan sifat fisik dan mekanik batuan utuh dan memberikan rekomendasi geometri lereng yang sesuai dengan standar. Perhitungan Probabilitas kelongsoran didahului dengan penentuan fungsi distribusi yang didapatkan melalui pengolahan Uji baik suai (*goodness of fit test*) dengan metode Kolmogorov-Smirnov dan uji Akaike Information Criterion terhadap data kohesi, sudut gesek dalam, dan bobot isi dari material penyusun lereng. Dari hasil pengolahan uji baik suai akan diperoleh distribusi terbaik yang menghasilkan parameter masukan pada metode simulasi Monte-Carlo. Karakteristik material dibangkitkan secara acak sebanyak 1000 kali dengan simulasi Monte-Carlo pada perangkat lunak Slide 6.0. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa ketiga lereng dengan faktor tekanan air pori sebesar 0,8 dan faktor pembebanan seismik sebesar 0,05g berada dalam kondisi tidak aman untuk semua kondisi. Lereng dengan penampang 1 memiliki nilai Faktor keamanan dinamis sebesar 0,959 dan probabilitas kelongsoran sebesar 98,7% ,lereng dengan penampang 2 memiliki nilai Faktor keamanan dinamis sebesar 1,01 dan nilai probabilitas kelongsoran sebesar 36,8%, serta lereng dengan penampang 3 memiliki nilai Faktor keamanan dinamis sebesar 0,868 dan nilai probabilitas kelongsoran sebesar 100%. Dikarenakan seluruh lereng dalam kondisi tidak aman, dilakukan perubahan geometri lereng dengan cara melandaikan kemiringan dan mengurangi ketinggian lereng dengan beberapa percobaan sehingga didapatkan rekomendasi terbaik dengan nilai FK dinamis dan PK untuk lereng penampang 1 sebesar 1,229 dan 0%, nilai FK dinamis dan PK untuk lereng penampang 2 sebesar 1,207 dan 0%, serta nilai FK dinamis dan PK untuk lereng penampang 3 sebesar 1,245 dan 0%.

Kata kunci: Probabilitas Kelongsoran, Monte-Carlo, Uji baik suai, Kolmogorov-Smirnov, Akaike Information Criterion

ABSTRACT

One of the risk controls from mining activities is to design a stable slope. In accordance with Ministry of Energy and Mineral Resources No. 1827K/30/MEM/2018 about mining technical management guidelines (Appendix II), slope stability analysis is done by calculating the value of the Safety Factor (FK) and calculating the Probability of Failure (POF) statically and dynamically. This research is focused on potential slope failure using the limit equilibrium method based on the physical and mechanical properties of the intact rock and providing slope geometric recommendations in accordance with standards. The POF calculation is preceded by the determination of the distribution function obtained through the processing of the goodness of fit test using the Kolmogorov-Smirnov method and the Akaike Information Criterion test for cohesion, friction angle and unit weight of the slope materials. From the results of processing the goodness of fit test will be obtained the best distribution that produces input parameters on the Monte-Carlo simulation method. Material characteristics are randomly generated 1000 times with Monte-Carlo simulation in Slide 6.0

software. The simulation results show that the three cross section of the slopes with a pore pressure factor of 0.8 and a seismic loading factor of 0.05g are unsafe for all conditions. Slope with cross section 1 has a value of dynamic safety factor is 0.959 and the probability of failure is 98.7% .Slope with cross section 2 has a dynamic safety factor value of 1.01 and a probability of failure value of 36.8%. Slope with cross section 3 has a dynamic safety factor value of 0.868 and a probability of failure value of 100%. Due to the fact that all slopes are failure conditions, changes in the geometry of the slopes are carried out by reducing the height and overall slope angle with several experiments, so that the best recommendations are obtained with FK and POF values when slope 1 dynamic conditions are 1.229 and 0%, dynamic FOF and POF values of slope 2 are 1.207 and 0%, and dynamic FK and POF for slope 3 of 1.245 and 0%.

Keywords: Probability of failure, Monte-Carlo, goodness of fit test, Kolmogorov-Smirnov, Akaike Information Criterion

A. PENDAHULUAN

Kegiatan pertambangan memiliki risiko kecelakaan dalam setiap kegiatannya, oleh karena itu diperlukan suatu pengendalian risiko dalam kecelakaan yang mungkin terjadi. Salah satu pengendalian risiko dari kegiatan pertambangan adalah merancang lereng tambang yang stabil. Perancangan lereng tambang termasuk kedalam bagian aspek geoteknik. Pada suatu tambang terbuka, aspek geoteknik merupakan aspek yang sangat penting dalam menentukan geometri lereng tambang serta memastikan operasi penambangan berjalan dengan aman. Geometri lereng tambang akan menentukan banyak nya jumlah cadangan yang tertambang. Oleh karena itu, geometri lereng tambang yang optimum serta aman secara geoteknik perlu dianalisis kestabilan lereng tersebut. Hasil kestabilan lereng dinyatakan dengan nilai faktor keamanan dan nilai probabilitas kelongsoran. Analisis probabilitas kelongsoran sangat dibutuhkan karena terdapat ketidakpastian dari faktor keamanan lereng secara deterministik yang telah diestimasi. Hal itu disebabkan oleh variabilitas spasial dari material penyusun lereng, dan juga ketidakpastian terkait tingkat kepercayaan (*reliability*) dari hipotesis yang digunakan dalam pemodelan massa batuan. Untuk memastikan ketidakpastian tersebut akan digunakan konsep analisis pendekatan probabilistik yang menggunakan seluruh data karakteristik batuan yang tersedia untuk mengakomodasi setiap variasi hasil yang mungkin terjadi dengan menggunakan metode sampling Monte Carlo

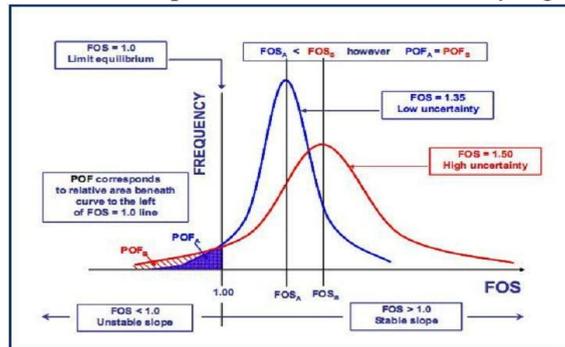
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran pada desain lereng yang sudah ditentukan sebelumnya, dan memberikan rekomendasi geometri lereng yang aman berdasarkan Kepmen ESDM Nomor 1827 K/30/MEM/2018 (Lampiran II)

B. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan cara mengumpulkan data sekunder dan proses analisis data dengan menggunakan bantuan perangkat lunak slide 6.0. Data hasil pengeboran berupa hasil uji sifat fisik dan uji sifat mekanik. Data uji sifat fisik berupa bobot isi natural dan sifat mekanik berupa kohesi dan sudut gesek dalam kondisi peak. Proses analisis dilakukan dengan menggunakan perpaduan antara metode deterministik dan probabilistik. Metode deterministik akan memberikan nilai faktor keamanan (FK) sebagai acuan dalam penentuan kestabilan lereng. Karena adanya variasi parameter mekanik maupun fisik dari material pembentuk lereng, sehingga metode probabilistik juga digunakan. Penelitian ini menghasilkan nilai faktor keamanan (FK) dan probabilitas kelongsoran (PK) dari beberapa skenario perubahan geometri lereng. Pada penelitian ini untuk mencari nilai faktor keamanan digunakan metode Keseimbangan Batas Bishop.

Hal menarik dari metode probabilistik adalah representasi yang eksplisit dari ketidakpastian dalam kajian stabilitas lereng. Nilai faktor keamanan desain lereng dapat dioptimasi dengan nilai probabilitas kelongsoran, sehingga dapat memberikan tingkat keyakinan terhadap desain lereng

tersebut. Probabilitas kelongsoran lereng ditentukan dari perbandingan antara luas area di bawah kurva dari distribusi nilai $FK < 1$ terhadap luar area FK keseluruhan yang disajikan pada gambar 1

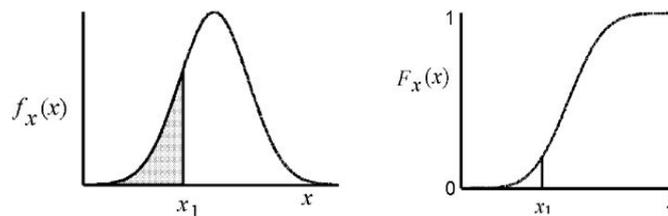


Gambar 1. Konsep Probabilitas Kelongsoran dan besaran ketidakpastian (Steffen dkk., 2008)

Dalam melakukan analisis dengan metode probabilitas, perlu dilakukan terlebih dahulu pendekatan statistik terhadap seluruh data karakteristik batuan untuk mengetahui distribusi terbaik dari data karakteristik batuan tersebut. Selanjutnya untuk menentukan nilai probabilitas kelongsoran (PK), perlu dilakukan analisis uji baik suai untuk mengetahui jenis distribusi data yang digunakan, dan menggunakan metode sampling data Monte Carlo

B.1. Fungsi Distribusi Probabilitas

Fungsi distribusi probabilitas menggambarkan penyebaran suatu variabel acak yang digunakan untuk memperkirakan nilai probabilitas kemunculan suatu parameter. Pada penelitian ini digunakan tujuh fungsi distribusi teoritis asumsi, yaitu fungsi distribusi normal, lognormal, gamma, beta, uniform, triangular, dan eksponensial. Grafik fungsi distribusi probabilitas dapat dideskripsikan menjadi fungsi densitas probabilitas (PDF/*Probability Density Function*) dan fungsi distribusi kumulatif (CDF/*Cumulative Distribution Function*).



Fungsi Densitas Probabilitas Fungsi Disribusi Kumulatif

Gambar 2. Fungsi distribusi probabilitas dideskripsikan menjadi fungsi densitas probabilitas (PDF/*Probability Density Function*) dan fungsi distribusi kumulatif (CDF/*Cumulative Distribution Function*) (Evert Hoek, 2007)

Fungsi densitas probabilitas mendeskripsikan daerah kemungkinan relatif dimana suatu bilangan acak dapat diasumsikan sebagai suatu nilai unik dibandingkan nilai lainnya. Untuk kurva distribusi faktor keamanan, maka luas kurva yang diarsir dibagi dengan luas total kurva merupakan probabilitas kelongsoran lereng.

B.2. Uji Baik Suai

Uji baik suai adalah metode pengujian hipotesis untuk menentukan apakah suatu himpunan frekuensi yang diharapkan sama dengan frekuensi yang diperoleh dari suatu distribusi. Jadi, uji baik suai merupakan pengujian kecocokan atau kebaikan antara hasil pengamatan (frekuensi pengamatan) tertentu dengan frekuensi yang diperoleh berdasarkan nilai harapannya (frekuensi teoretis). Terdapat beberapa metode yang dapat dipakai untuk melakukan uji baik suai, salah satunya adalah dengan uji

Kolmogorov-Smirnov, kemudian digunakan uji Akaike Information Criterion untuk menentukan distribusi terbaik yang sesuai dengan data tersebut.

B.3. Kolmogorov Smirnov

Metode Kolmogorov-Smirnov (K-S) merupakan pengujian normalitas yang banyak dipakai, terutama setelah adanya banyak program statistik yang beredar. Konsep dasar dari uji normalitas Kolmogorov-Smirnov adalah dengan membandingkan distribusi data (yang akan diuji normalitasnya) dengan distribusi normal baku. Dalam uji K-S, selisih maksimum antara distribusi teoritis ($F(x)$) dan distribusi normal baku ($S(x)$) untuk seluruh rentang x . Selisih maksimum dinyatakan dalam $D_n = \text{Max} [F(x) - S(x)]$

B.4. Metode Pengujian Akaike Information Criterion

Akaike Information Criterion (AIC) adalah penduga kualitas relatif dari model statistik untuk sekumpulan data yang diberikan. Hasil Uji Kolmogorov -Smirnov memberikan lebih dari satu distribusi fungsi, sehingga digunakan metode pengujian Akaike Information Criterion untuk mengeliminasi distribusi-distribusi fungsi hingga terpilih satu distribusi terbaik dengan prinsip metodenya adalah mengatasi nilai loglikelihood yang cukup besar dengan mengurangi banyak parameter model dari log likelihood nya. Distribusi yang memiliki nilai AIC terkecil akan dipilih menjadi distribusi terbaik.

B.5. Metode Monte Carlo

Monte-Carlo adalah percobaan pada unsur peluang (atau bersifat probabilistik) dengan menggunakan pengambilan sampel secara acak. Algoritma ini digunakan sebagai landasan simulasi bilangan acak untuk menentukan fungsi distribusi probabilitas yang sesuai. Umumnya analisis stabilitas lereng dengan metode Kesetimbangan Batas menggunakan simulasi Monte Carlo untuk menghitung probabilitas kelongsoran. Jumlah Sampling data dengan simulasi Monte Carlo pada penelitian ini sebanyak 1000 data. Simulasi Monte Carlo diawali dengan menetapkan suatu distribusi probabilitas bagi variabel kohesi, sudut gesek dalam dan bobot isi dengan mengikuti tujuh fungsi distribusi yang sudah ditetapkan sebelumnya.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

C.1. Geoteknik daerah Penelitian

Daerah penelitian pada makalah ini berada di salah satu tambang batubara yang berlokasi di Provinsi Kalimantan Selatan. Aspek geoteknik yang akan dibahas adalah sifat fisik dan sifat mekanik tanah/batuan terhadap kondisi kestabilan lereng tambang yang dibagi berdasarkan kedalaman lereng. Kedalaman lereng dibagi menjadi 4 bagian yaitu kedalaman 0-40 m, 40-80m, 80-120m dan 120-167m yang kemudian akan digunakan kedalam hasil perhitungan nilai faktor keamanan. Hal ini dilakukan agar pada saat pemodelan, material litologi dan lereng tidak dianggap homogen melainkan bersifat heterogen berdasarkan data kedalaman dan hasil uji laboratorium yang tersedia

C.2. Sifat Fisik dan Mekanik Batuan

Data sifat fisik dan mekanik batuan yang sudah dilakukan proses uji baik suai dengan metode Kolmogorov smirnov dan Akaike Information Criterion akan di masukkan kedalam parameter dalam perangkat lunak Slide 6.0 berdasarkan distribusinya. Sifat fisik yang digunakan dalam penelitian ini adalah bobot isi kondisi natural dan sifat mekanik yang digunakan meliputi sudut gesek dalam dan kohesi pada kondisi peak.

C.3. Hasil Uji Baik Suai

Pengolahan uji baik suai dengan menggunakan metode Kolmogorov-Smirnov dan uji Akaike Information Criterion akan mendapatkan hasil berupa fungsi distribusi terbaik dari data geoteknik untuk masing-masing litologi batuan. Dari hasil tersebut, kemudian akan dibentuk suatu parameter masukan yang akan digunakan dalam perhitungan probabilitas kelongsoran lereng menggunakan perangkat lunak Slide 6.0 dengan simulasi Monte-Carlo. Contoh hasil uji baik suai menggunakan

metode Kolmogorov-Smirnov dan uji Akaike Information Criterion untuk litologi claystone ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil Uji baik suai untuk litologi claystone untuk kedalaman 0-40m

CLAYSTONE									
Koehesi (Kpa)	Parameter	Beta	Expon	Gamma	Lognormal	Normal	Triangular	Uniform	
	Mean	105.540	104.508	105.585	-	105.585	106.224	98.177	
	Std Deviasi	18.489	45.264	19.587	-	18.401	18.682	22.922	
	Akaike (AIC)	366.408	410.560	370.498	-	362.835	364.620	371.771	
	K-S Statistic	0.092	0.320	0.127	-	0.098	0.123	0.239	
	Nilai Kritis Dn α					0.252			
	Jumlah Data					42			
Sudut Gesek Dalam ($^{\circ}$)	Parameter	Beta	Expon	Gamma	Lognormal	Normal	Triangular	Uniform	
	Mean	25.015	24.985	-	25.048	25.019	24.990	25.378	
	Std Deviasi	1.193	1.307	-	1.268	1.025	0.904	1.013	
	Akaike (AIC)	--	102.698	-	107.718	108.746	96.500	99.775	
	K-S Statistic	0.242	0.137	-	0.144	0.175	0.130	0.270	
	Nilai Kritis Dn α					0.264			
	Jumlah Data					38			
Bobot Isi (KN/m ³)	Parameter	Beta	Expon	Gamma	Lognormal	Normal	Triangular	Uniform	
	Mean	-	20.020	-	20.130	20.130	20.150	20.220	
	Std Deviasi	-	0.320	-	0.160	0.160	0.190	0.250	
	Akaike (AIC)	-	-5.340	-	-30.210	-34.540	-26.820	-8.410	
	K-S Statistic	-	0.270	-	0.060	0.080	0.110	0.290	
	Nilai Kritis Dn α					0.249			
	Jumlah Data					43			

Tabel 1. diatas merupakan hasil pengolahan Uji baik suai menggunakan perangkat lunak @RISK 7.6, untuk warna merah menunjukkan nilai *K-S Statistic* lebih dari nilai kritis Dn α sehingga fungsi distribusi tersebut ditolak dan warna biru menunjukkan fungsi distribusi terbaik atau yang dipilih. Distribusi yang sudah ditetapkan kemudian akan di analisis pada aplikasi Slide 6.0 untuk menghasilkan nilai probabilitas kelongsoran lereng. Nilai parameter masukan untuk setiap litologi pada kedalaman 0-40 m ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2. Parameter nilai masukan untuk setiap litologi ke dalam perangkat lunak slide 6.0 pada kedalaman 0-40 meter

Kedalaman (m)	Parameter Masukan	Lereng Keseluruhan					
		Properties	Distribution	Mean	Stdev	Min Relative	Max Relative
0-40	Siltstone	Koehesi (Kpa)	Uniform	115.88	21.77	37.71	37.71
		Sudut Gesek Dalam ($^{\circ}$)	Normal	27.55	1.25	2.59	2.41
		Bobot Isi (KN/m ³)	Normal	20.48	1.25	0.594	0.38
0-40	Sandstone	Koehesi (Kpa)	Normal	120.81	9.21	18.909	18.411
		Sudut Gesek Dalam ($^{\circ}$)	Normal	30.59	1.55	3.775	2.67

		Bobot Isi (KN/m ³)	Normal	22.54	0.03	0.078	0.057
0-40	Claystone	Kohesi (Kpa)	Normal	105.59	18.4	45.269	30.443
		Sudut Gesek Dalam (⁰)	Triangular	24.99	0.9	1.28	2.56
		Bobot Isi (KN/m ³)	Normal	20.13	0.16	0.321	0.503
0-40	Coal	Kohesi (Kpa)	Normal	148.74	10.12	18.082	23.831
		Sudut Gesek Dalam (⁰)	Normal	40.51	2.26	4.28	5.215
		Bobot Isi (KN/m ³)	Normal	14.95	1.74	3.601	5.402

C.4. Klasifikasi Kestabilan Lereng

Nilai faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran minimum menggunakan batas minimum yang ditetapkan dalam Kepmen ESDM Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pengelolaan Teknis Pertambangan (Lampiran II)

Tabel 3. Kriteria kestabilan lereng tambang Kepmen ESDM Nomor 1827 K/30/MEM/2018 (Lampiran II)

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 _≤ 1)
Lereng tunggal	Rendah s.d. Tinggi	1.1	Tidak Ada	25-50%
	Rendah	1.15-1.2	1	25%
Inter-ramp	Menengah	1.2-1.3	1	20%
	Tinggi	1.2-1.3	1.1	10%
Lereng Keseluruhan	Rendah	1.2-1.3	1	15%-20%
	Menengah	1.3	1.05	10%
	Tinggi	1.3-1.5	1.1	5%

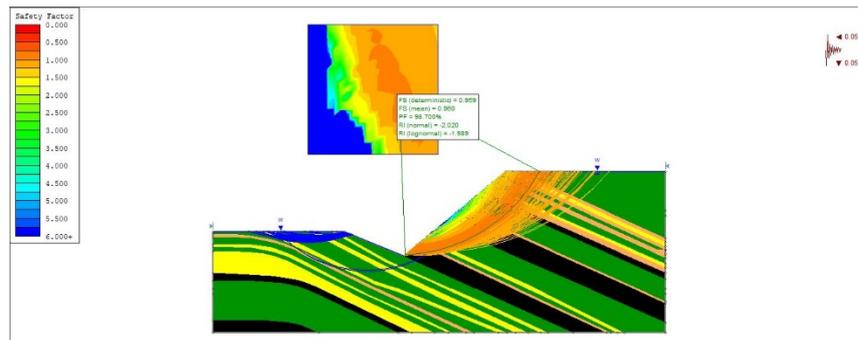
C.5. Kestabilan Lereng

Analisis kestabilan lereng dibuat dengan asumsi tinggi muka air tanah mengikuti permukaan lereng dengan Faktor tekanan air pori 0,8. Kestabilan lereng akan dimodelkan saat kondisi statis dan kondisi dinamis. Kondisi dinamis dimodelkan dengan memperhitungkan koefisien getaran gempa sebesar 0,05g. Analisis kestabilan lereng dilakukan dengan menggunakan metode kesetimbangan batas "Bishop simplified". Nilai keluaran Probabilitas kelongsoran pada aplikasi Slide 6.0 di tunjukkan pada gambar 3, 4 dan 5. Hasil perhitungan kestabilan untuk setiap penampang lereng ditunjukkan pada tabel 4.

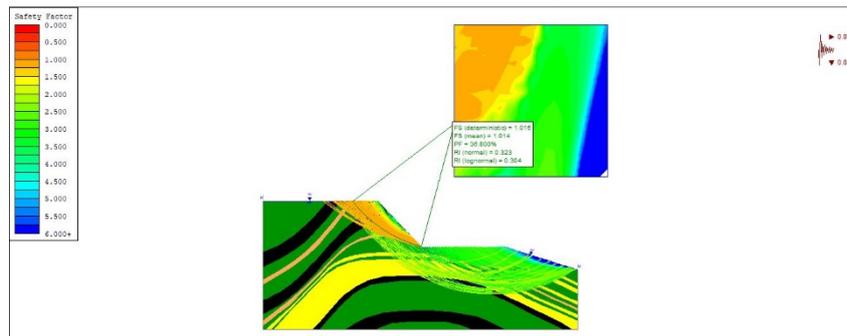
Tabel 4. Hasil perhitungan kestabilan lereng untuk ketiga penampang kondisi statis dan dinamis

Lereng	Kondisi Statis			Keterangan
	FK Deterministik	FK Mean	PK (%)	
1	0.992	0.99	63.9	Tidak Aman

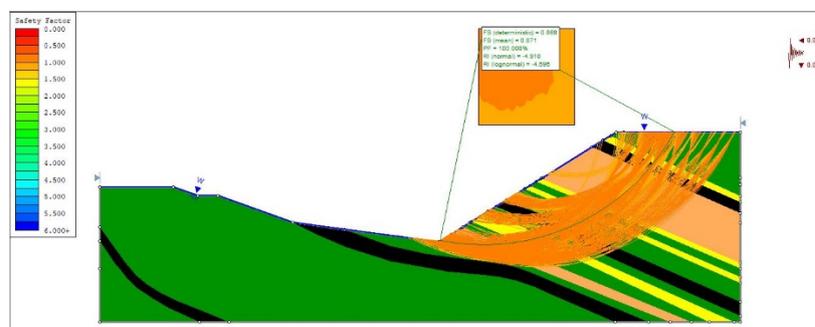
2	1.144	1.14	0,3	Aman namun belum sesuai standar Kepmen 1827
3	0.942	0.946	94.6	Tidak Aman
Kondisi Dinamis				
Lereng	FK Deterministik	FK Mean	PK (%)	Keterangan
1	0.959	0.960	98.7	Tidak Aman
2	1.016	1.014	36.8	Tidak Aman
3	0.868	0.871	100	Tidak Aman



Gambar 3. Hasil pengolahan data PK Lereng Penampang 1 dalam kondisi dinamis pada perangkat lunak Slide 6.0



Gambar 4. Hasil pengolahan data PK Lereng Penampang 2 dalam kondisi dinamis pada perangkat lunak Slide 6.0

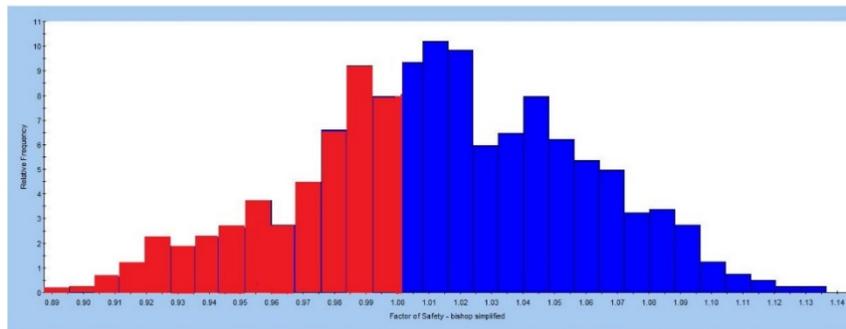


Gambar 5. Hasil pengolahan data PK Lereng penampang 3 dalam kondisi dinamis pada perangkat lunak Slide 6.0

Keterangan:

- = Litologi *Siltstone*
- = Litologi *Claystone*
- = Litologi *Sandstone*
- = Litologi *Coal*

Distribusi probabilitas yang dihasilkan dengan menggunakan metode sampling Monte Carlo sebanyak 1000 iterasi pada faktor keamanan diplot pada gambar 6.



Gambar 6. Distribusi pada faktor keamanan lereng Penampang 2 dalam kondisi dinamis pada perangkat lunak Slide 6.0

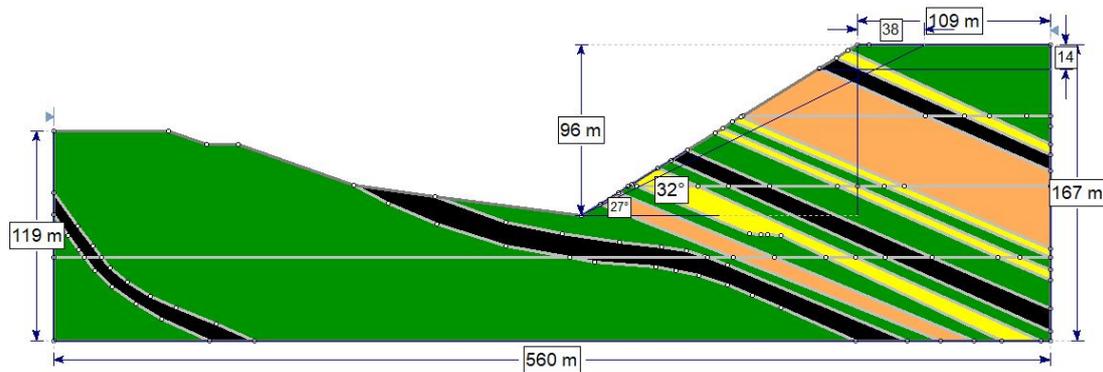
Nilai probabilitas kelongsoran lereng penampang 2 saat kondisi dinamis sebesar 36.8%, ditunjukkan oleh rasio area dibawah kurva distribusi untuk $FK < 1$ (area merah) dibagi dengan total area dibawah kurva disribusi. Ini berarti bahwa, untuk kombinasi geometri lereng, nilai kuat geser batuan, tekanan air pori dan parameter percepatan gempa yang sudah diasumsikan, 368 dari 1000 lereng serupa diperkirakan akan runtuh pada suatu waktu selama umur lereng.

Nilai PK dan FK yang diperoleh dari hasil pemodelan bergantung pada bidang gelincir yang dianalisis. Setiap bidang gelincir akan memberikan nilai PK dan FK yang berbeda yang disebabkan karena besarnya beban atau gaya-gaya penggerak yang harus diatasi oleh tiap bidang gelincir. Beban tersebut ditunjukkan melalui dimensi material atau jenis batuan yang berada di atas bidang gelincir. Berdasarkan hasil analisis yang di sajikan pada tabel 4, ketiga lereng tersebut menghasilkan nilai PK lebih dari 20% saat kondisi dinamis sedangkan saat kondisi statis lereng penampang 1 dan 3 menghasilkan nilai PK lebih dari 20% dan pada lereng penampang 2 menghasilkan nilai PK kurang dari 20% namun masih belum memenuhi standar Kepmen ESDM 1827 K/30/MEM/2018 (Lampiran II). Pada lereng penampang 1 nilai PK saat kondisi statis sebesar 63,9% dan saat kondisi dinamis dengan adanya faktor pembebanan gempa nilai PK lereng menjadi 98,7%. Ini berarti dalam kondisi dinamis sebanyak 98,7% blok batuan pada lereng penampang 1 akan mengalami keruntuhan pada bidang gelincir nya. Pada lereng penampang 2 nilai PK saat kondisi statis sebesar 0,3% dan saat kondisi dinamis dengan adanya faktor pembebanan gempa nilai PK lereng menjadi 36.8%. Ini berarti dalam kondisi dinamis sebanyak 36.8% blok batuan pada lereng penampang 2 akan mengalami keruntuhan pada bidang gelincir nya. Pada lereng penampang 3 nilai PK saat kondisi statis sebesar 94,6% dan saat kondisi dinamis dengan adanya faktor pembebanan gempa nilai PK lereng menjadi 100%. Ini berarti dalam kondisi dinamis sebanyak 100% blok batuan pada lereng penampang 3 akan mengalami keruntuhan pada bidang gelincir nya.

Lereng keseluruhan pada penampang satu, dua dan tiga dinyatakan tidak aman dari segala tingkat keparahan longsor. Ini berarti akan dilakukan perubahan geometri lereng (*Redesign*) pada ketiga lereng tersebut agar menghasilkan nilai FK dan PK yang sesuai berdasarkan Kepmen ESDM 1827 K/30/MEM/2018 (Lampiran II).

Perubahan geometri lereng bertujuan untuk membuat penahan yang lebih besar berupa geometri lereng yang berada di atas bidang gelincir, sehingga didapatkan nilai probabilitas kelongsoran yang lebih kecil dan nilai faktor keamanan yang lebih besar. Upaya yang dapat dilakukan untuk dapat meningkatkan nilai faktor keamanan lereng keseluruhan adalah dengan cara melandaikan lereng dan

mengurangi ketinggian lereng. Perubahan geometri lereng akan dimodelkan dengan tiga kondisi diantaranya kondisi pertama dengan mengurangi ketinggian lereng sebesar 15% dari keadaan semula, kondisi kedua saat *overall slope angle* dilandaikan sebesar 15% dari keadaan semula, dan kondisi ketiga saat keduanya dikombinasikan. Jika ketiga percobaan tersebut masih menghasilkan nilai FK dan PK tidak aman maka akan di modelkan kembali hingga didapati nilai FK dan PK yang sesuai standar. Pemodelan ketiga percobaan tersebut digambarkan pada gambar 7 untuk kondisi lereng penampang 3



Gambar 7. Sketsa Pemodelan perubahan geometri lereng penampang 3

Upaya modifikasi desain lereng pada penampang 3 dilakukan dengan beberapa percobaan diantaranya:

1. Mengurangi ketinggian lereng 15% dari tinggi semula dan *overall slope angle* tetap. Upaya untuk mengurangi ketinggian lereng adalah dengan menurunkan posisi *crest* dari posisi semula sejauh 14 m sehingga tinggi lereng menjadi 82 m dari tinggi awal 96 m.
2. Melandaikan *overall slope angle* 15% dari semula dan ketinggian lereng tetap. Upaya untuk melandaikan kemiringan lereng keseluruhan dilakukan dari kemiringan lereng keseluruhan sebesar 32° menjadi 27° dengan cara menggeser posisi *crest* dari posisi semula sejauh 38 m kearah timur
3. Melandaikan *overall slope angle* 15% dari semula dan menurunkan ketinggian lereng 15% dari semula. Upaya yang dapat dilakukan adalah dengan menurunkan posisi *crest* dari posisi semula sejauh 14 m dan juga dilakukan pergeseran untuk dapat menyesuaikan dengan kemiringan lereng keseluruhan yang direncanakan sejauh 38m kearah timur.

Pada prinsip nya upaya untuk memodifikasi desain lereng pada penampang 1 dan 2 adalah sama seperti pada penampang 3. Dari ketiga percobaan tersebut, selanjutnya akan di tentukan rekomendasi lereng yang aman untuk ketiga lereng sesuai dengan nilai ambang batas Kepmen ESDM 1827 K/30/MEM/2018 (Lampiran II). Hasil nilai faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran dari beberapa pemodelan lereng saat kondisi dinamis di tunjukkan pada tabel 5.

Tabel 5. Hasil Rekapitulasi perubahan geometri lereng untuk beberapa percobaan untuk kondisi Dinamis

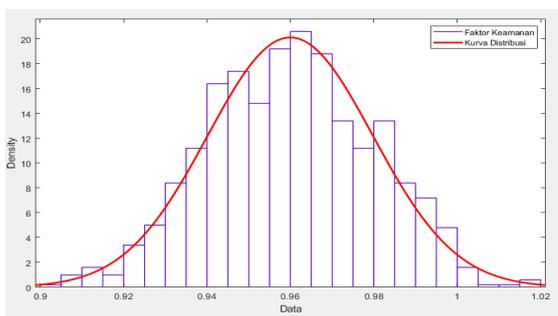
Lereng	Data Awal		Percobaan Ke-	Perubahan Geometri		FK Deterministik	FK Mean	PK (%)	Keterangan
	Tinggi (m)	Overall Slope angle ($^{\circ}$)		Tinggi (m)	Overall Slope Angle ($^{\circ}$)				
1	87	40	1	74	40	1.023	1.025	14.9	Aman
			2	87	34	1.055	1.056	0.7	Aman
			3	74	34	1.229	1.231	0	Aman

			1	51	47	1.050	1.048	14.2	Aman
2	60	47	2	60	40	1.085	1.084	0.4	Aman
			3	51	40	1.207	1.205	0	Aman
3	96	32	1	82	32	0.992	0.995	57,8	Tidak Aman
			2	96	27	0,896	0,901	98,7	Tidak Aman
			3	82	27	1.029	1.038	20.7	Tidak Aman
			4	70	27	1.245	1.246	0	Aman

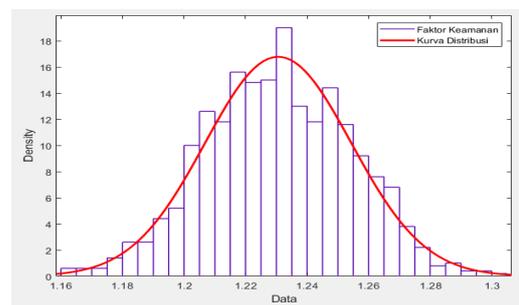
Rekomendasi akhir untuk lereng penampang satu adalah percobaan ketiga dengan menurunkan ketinggian lereng sebesar 15% dari semula dan menurunkan *overall slope angle* sebesar 15% dari semula sehingga menghasilkan nilai PK sebesar 0% dan nilai FK sebesar 1.229. Dengan begitu rekomendasi geometri akhir untuk lereng satu adalah tinggi lereng sebesar 74 m dan *overall slope angle* sebesar 34°. Lereng penampang satu dinyatakan aman dalam semua tingkat keparahan longsoran.

Rekomendasi akhir untuk lereng penampang dua adalah percobaan ketiga dengan menurunkan ketinggian lereng sebesar 15% dari semula dan menurunkan *overall slope angle* sebesar 15% dari semula sehingga menghasilkan nilai PK sebesar 0% dan nilai FK sebesar 1,207. Dengan begitu rekomendasi geometri akhir untuk lereng dua adalah tinggi lereng sebesar 51 m dan *overall slope angle* sebesar 40°. Lereng penampang dua dinyatakan aman dalam semua tingkat keparahan longsoran.

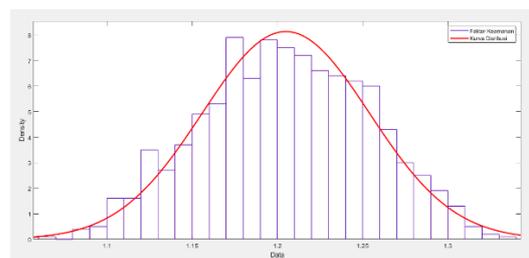
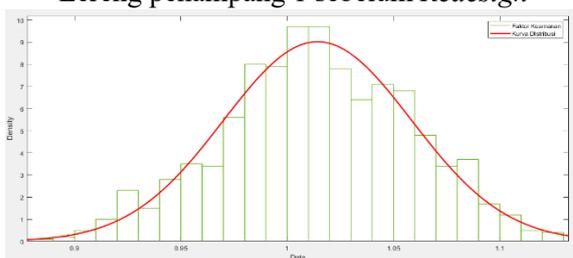
Pada lereng dengan penampang tiga ,setelah ketiga percobaan tersebut dilakukan masih dihasilkan nilai FK dan PK lereng yang belum sesuai standar.Selanjutnya lereng akan dimodelkan dengan menurunkan kembali ketinggian sebesar 15% sehingga didapat nilai PK sebesar 0% dan nilai FK sebesar 1.245. Rekomendasi geometri akhir untuk lereng penampang tiga adalah tinggi lereng sebesar 70 m dan *overall slope angle* sebesar 27°. Lereng penampang tiga dinyatakan aman dalam semua tingkat keparahan longsoran. Dari hasil akhir percobaan perubahan geometri lereng pada penampang 1,2 dan 3 di dapatkan nilai probabilitas kelongsoran akhir kondisi dinamis sebesar 0%, dari sebelum perubahan geometri sebesar 98,7% untuk lereng penampang 1, untuk lereng penampang 2 sebesar 36,8% dan untuk lereng penampang 3 sebesar 100%. Ini berarti terjadi perubahan persebaran data dari masing-masing lereng dikarenakan akibat dari menurunkan ketinggian lereng ataupun melandaikan kemiringan lereng. Kurva distribusi lereng ketiga penampang sebelum dan sesudah dilakukan perubahan geometri lereng ditunjukkan pada gambar 8



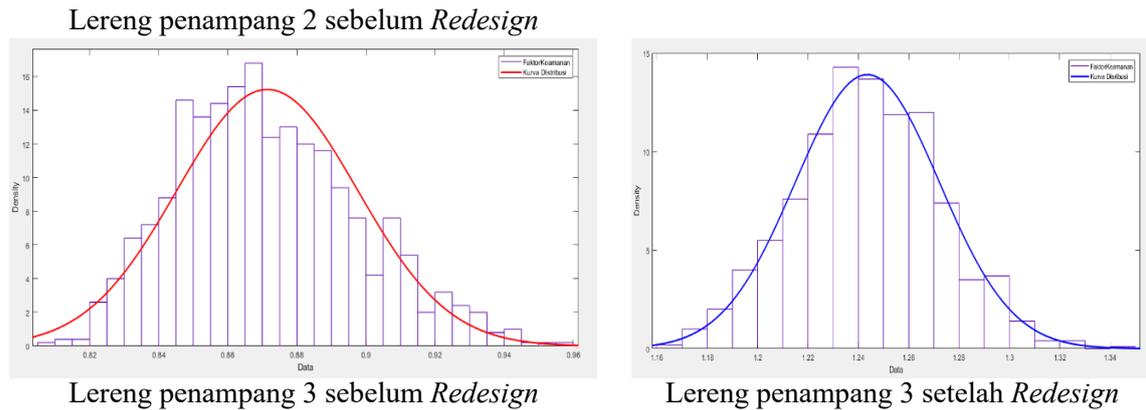
Lereng penampang 1 sebelum *Redesign*



Lereng penampang 1 setelah *Redesign*



Lereng penampang 2 setelah *Redesign*



Gambar 8. kurva distribusi FK lereng ketiga penampang sebelum dan sesudah perubahan geometri

Dari kurva distribusi pada gambar 8 menunjukkan perubahan geometri lereng akan memengaruhi persebaran data dari kurva distribusi FK. Perubahan geometri lereng seperti penurunan tinggi lereng dan pelandaian kemiringan lereng akan menyebabkan perubahan karakterisasi material penyusun lereng sehingga jumlah sampel dari material kohesi, sudut gesek dalam dan bobot isi akan semakin berkurang. Dengan begitu kurva distribusi pada lereng setelah perubahan geometri akan semakin terfokus atau terkonsentrasi pada nilai *mean* dan nilai tengah data sehingga menyebabkan persebaran data semakin menurun dengan begitu tingkat ketidakpastian (*uncertainty*) data juga akan semakin menurun. Akibatnya pada suatu kondisi dengan jumlah sampel 1000 nilai FK yang kurang dari 1 tidak ada lagi sehingga menyebabkan nilai PK dari lereng menjadi 0%.

D. KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini antara lain:

1. Nilai faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran lereng pada penampang 1 dengan tinggi 87 m dan kemiringan 40° pada kondisi statis masing-masing sebesar 0,992 dan 63,9% dan saat kondisi dinamis masing-masing sebesar 0,959 dan 98,7%. Lereng pada penampang 2 dengan tinggi 60m dan kemiringan 47° menghasilkan nilai FK dan PK masing-masing saat kondisi statis sebesar 1,144 dan 0,3% dan saat kondisi dinamis masing-masing sebesar 1,016 dan 36,8%. Lereng pada penampang 3 dengan tinggi 96 m dan kemiringan 32° menghasilkan nilai FK dan PK masing-masing saat kondisi statis sebesar 0,942 dan 94,6% dan saat kondisi dinamis masing-masing sebesar 0,868 dan 100%. Ini menunjukkan ketiga lereng tersebut tidak aman sesuai dengan Kepmen ESDM Nomor 1827 K/30/MEM/2018 (Lampiran II)
2. Dikarenakan kondisi ketiga penampang lereng tidak aman, maka akan dilakukan perubahan geometri lereng dengan menurunkan ketinggian lereng, melandaikan *overall slope angle* atau kombinasi dari keduanya. Rekomendasi akhir perubahan geometri untuk lereng penampang 1 adalah kombinasi antara penurunan tinggi lereng menjadi 74 m dan pelandaian *overall slope angle* menjadi 34° sehingga didapat nilai FK dan PK masing -masing sebesar 1,209 dan 0%. Rekomendasi akhir perubahan geometri untuk lereng penampang 2 adalah kombinasi antara penurunan tinggi lereng menjadi 51m dan pelandaian *overall slope angle* menjadi 40° sehingga didapat nilai FK dan PK masing -masing sebesar 1,207 dan 0%. Rekomendasi akhir perubahan geometri untuk lereng penampang 3 adalah kombinasi antara penurunan tinggi menjadi 70 m dan pelandaian *overall slope angle* menjadi 27° , sehingga didapat nilai FK dan PK masing -masing 1,245 dan 0%. Dengan begitu setelah dilakukan perubahan geometri untuk lereng dengan penampang 1,2 dan 3, lereng dinyatakan aman untuk semua tingkat keparahan longsor berdasarkan Kepmen ESDM Nomor 1827 K/30/MEM/2018 (Lampiran II)

UCAPAN TERIMAKASIH

Pada kesempatan ini, saya ingin mengucapkan terimakasih kepada seluruh dosen Teknik Pertambangan Institut Teknologi Bandung terkhusus kepada Bapak Prof., Dr., Ir., Made Astawa Rai, DEA karena telah membimbing saya dalam memahami konsep Probabilitas Kelongsoran ini. Dan saya juga sampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada PERHAPI karena telah menyelenggarakan TPT XXIX PERHAPI 2020.

DAFTAR PUSTAKA

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., and Boyce, G. M. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods*. New York: John Wiley & Sons.Inc.
- Ahmad, Massagus, dkk. (2011). *Aplikasi probabilistic untuk analisis kestabilan lereng tunggal. Prosiding .TPT XX PERHAPI*
- Arif, I. (2016). *Geoteknik Tambang*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- Hoek, E. (2007). *Practical Rock Engineering*. Evert Hoek Consulting Engineer Inc. North Vancouver, Canada
- Hoek, E., Bray, J.W. (1981). *Rock Slope Engineering: 3rd Edition*. London. The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Iswandaru, dkk. (2019). *Probabilistic Of Slope Failure Grasberg Open Pit Mining PT Freeport Indonesia*. Promine Jurnal Vol 7. (1), page 01 – 07
- KEPMEN ESDM Nomor 1827 K/30/MEM 2018. Pedoman Pelaksanaan Teknik Pertambangan yang Baik (Lampiran II)
- Rai, M.A., Kramadibrata, S., Wattimena, R.K.(2011). *Mekanika Batuan*. Bandung: Institut Teknologi Bandung
- Romana, M. (1993). *A Geomechanical Classification for Slope: Slope Mass Rating*, dalam *Comprehensive Rock Engineering*. Volume 3. Editor: Hudson. J.A.Pergamon
- Steffen, O.K.H., Contreras, L.F.,Terbrugge, P.J., Venter, J., (2008), *A Risk Evaluation Approach for Pit Slope Design* the 42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd US-Canada Rock Mechanics Symposium, San Francisco