

Analisis Kestabilan Lereng Tambang Terbuka Batubara Berdasarkan Data *Monitoring* Muka Air Tanah & Getaran Peledakan

Analysis of Coal Open Mine Slope Stability Based on Monitoring Data of Ground Water Level & Vibration Effect

Arswinda Radita R Sunusi^{1*}, Tri Karian², Budi Sulistianto³

¹ Mahasiswa Rekayasa Pertambangan, FTMM, Institut Teknologi Bandung

^{2,3} Rekayasa Pertambangan, FTMM, Institut Teknologi Bandung

Corr Author: raditaarwinda@gmail.com^{1*}

ABSTRAK

PT Bukit Asam, Tbk. merupakan salah satu perusahaan tambang batubara di Sumatera Selatan yang menggunakan metode peledakan dalam pembarian bahan galiannya, hal ini bertujuan agar kegiatan produksi lebih efektif dan efisien akan tetapi kegiatan peledakan yang dilakukan secara terus-menerus tentunya akan memberikan dampak negatif salah satunya getaran tanah. Selain itu, air tanah juga dapat memberikan permasalahan dalam pengelolaan tambang. Hal ini dikarenakan tekanan air pori menimbulkan gaya angkat, sehingga akan menurunkan kekuatan massa batuan penyusun lereng dan dapat meningkatkan risiko ketidakstabilan. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kestabilan lereng tambang batubara dilihat dari nilai Faktor Keamanan (FK) statik dan pseudostatik. Data yang digunakan meliputi data sifat fisik dan mekanik berupa kohesi dan sudut geser dalam, data getaran peledakan berupa Percepatan Partikel Puncak terhadap waktu, serta H_u 0, 0.6, 0.8, dan 1 yang menggambarkan pengukuran Muka Air Tanah (MAT). Analisis dilakukan dengan metode Kestimbangan Batas menggunakan perangkat lunak Slide 2D. Berdasarkan hasil analisis pada lereng highwall dan lowwall, dapat diketahui bahwa semakin kecil nilai kekuatan massa batuan dan semakin jenuh kondisi lereng maka nilai Faktor Keamanannya (FK) semakin kecil sedangkan nilai Probabilitas Kelongsorannya (PK) akan semakin besar. Kriteria stabil pada lereng statik yaitu $FK \geq 1.3$ dan $PK \leq 5\%$, dan pada lereng pseudostatik yaitu $FK \geq 1.1$ dan $PK \leq 5\%$.

Kata kunci: Faktor Keamanan (FK), Getaran Peledakan, Kestabilan Lereng

ABSTRACT

PT Bukit Asam, Tbk. is one of coal mining companies in South Sumatra that uses the blasting method in dissolving coal, this aims to make production activities more effective and efficient but continuous blasting activities will certainly have negative impact, which one is ground vibration. In addition, groundwater can also provide problems in mine management. This is because the pore water pressure causes lift, which will reduce the strength of the rock mass that makes up the slope and can increase the risk of instability. This research was conducted with the aim of determining the stability of coal mine slopes in terms of static and pseudostatic Safety Factor (FK) values. The data used includes data on physical and mechanical properties in the form of cohesion and internal shear angles, data on blasting vibrations in the form of Peak Particle Acceleration with respect to time, and H_u 0, 0.6, 0.8, and 1 which describe the measurement of the Ground Water Table (MAT). The analysis was carried out using the Boundary Equilibrium method using Slide 2D software. Based on the results of analysis highwall and lowwall slopes, it can be seen that the smaller value of rock mass strength and more saturated the slope conditions, the smaller value of the Safety Factor (FK) while the greater value of the Probability of Slippage (PK). Stable criteria on static slopes are $FoS \geq 1.3$ and $PoS \leq 5\%$, and on pseudostatic slopes are $FoS \geq 1.1$ and $PoS \leq 5\%$.

Keywords: Factor of Safety (FoS), Ground Vibration, Slope Stability

Submitted: 04-02-2023; Revised: 19-01-2024; Accepted: 08-03-2024; Available Online: 13-06-2024

Published by: Mining Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Lambung Mangkurat

This is an open access article under the CC BYND license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

©2024, Geosapta

PENDAHULUAN

Umumnya, massa batuan di alam berada dalam kondisi stabil. Tetapi, akibat adanya perubahan kondisi secara alamiah maupun aktivitas manusia menyebabkan terjadinya perubahan distribusi tegangan pada batuan, sehingga dalam beberapa kasus akan terjadi kelongsoran atau ketidakstabilan. Ketidakstabilan ini dapat berdampak buruk terhadap keselamatan, ekonomi, dan sosial.

PT Bukit Asam, Tbk merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang pertambangan batubara dengan sistem tambang terbuka (*open pit*). Dalam kegiatan penambangannya, perusahaan ini menerapkan metode peledakan, hal ini dinilai lebih efisien dan efektif jika dibandingkan dengan penggalian langsung menggunakan alat mekanis sehingga target produksi perusahaan dapat

tercapai. Salah satu dampak negatif yang ditimbulkan dari kegiatan peledakan yaitu getaran tanah (*ground vibration*) yang akan meningkatkan risiko ketidakstabilan lereng. Hal ini dikarenakan saat peledakan berlangsung, dari seluruh total energi yang dihasilkan bahan peledak hanya sebagian yang dikonsumsi untuk memecahkan batuan, sebagian lagi menjadi energi sisa yang akan merambat melalui batuan sehingga mengakibatkan deformasi dalam batuan tetapi tidak memecahkan batuan karena masih dalam batas elastik.

Selain masalah getaran peledakan, air tanah juga dapat memberikan permasalahan dalam pengelolaan tambang. Hal ini dikarenakan tekanan air pori menimbulkan gaya angkat yang akan menurunkan kekuatan

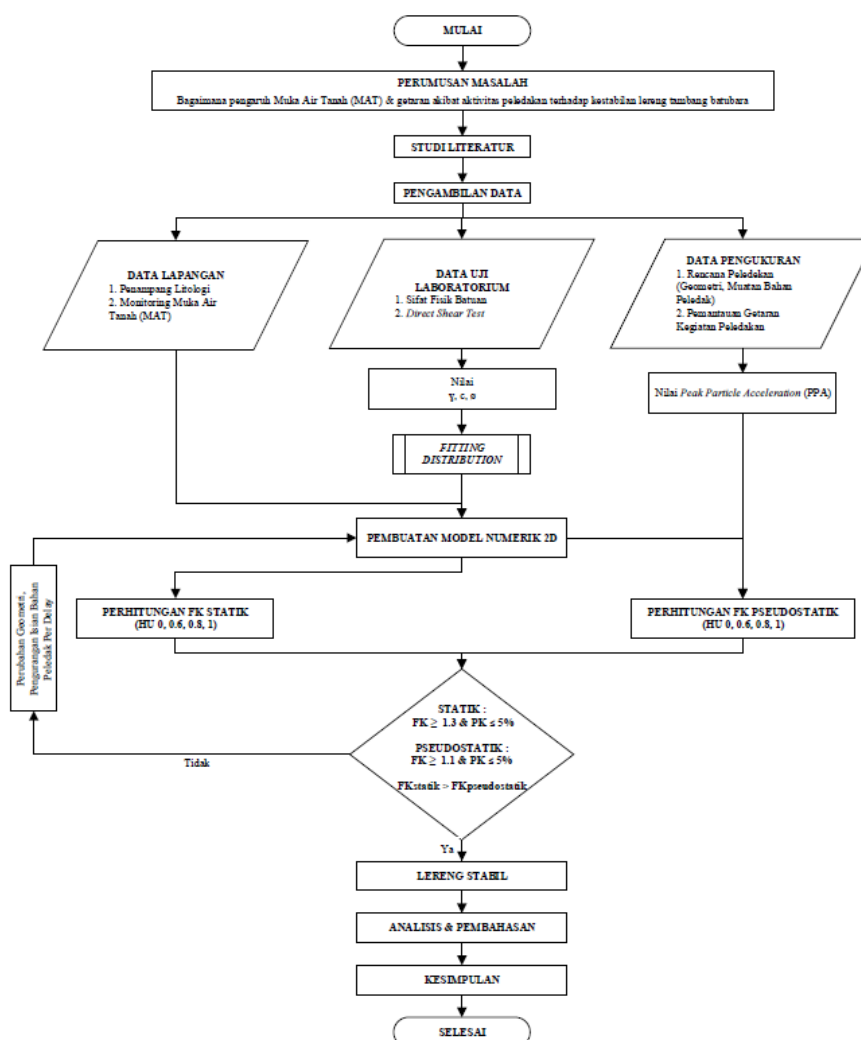
massa batuan penyusun lereng. Sehingga dapat meningkatkan risiko ketidakstabilan.

Oleh karena itu, untuk mengetahui pengaruh kegiatan peledakan dan Muka Air Tanah (MAT) terhadap kestabilan lereng, dilakukan pemantauan getaran peledakan dan MAT di sekitar lokasi penelitian, selanjutnya data hasil pemantauan akan diolah untuk mengetahui bagaimana getaran hasil peledakan dan MAT dapat mempengaruhi kestabilan lereng dilihat dari nilai faktor keamanan statik dan pseudostatik dengan menggunakan metode numerik.

METODOLOGI

Penelitian ini diawali dengan mengetahui latar belakang penelitian, kemudian mencari tau permasalahan di

lokasi penelitian, dilanjutkan dengan pengumpulan data primer dan sekunder. Penelitian ini dilakukan pada lereng *highwall* dan *lowwall*, dengan longoran berbentuk *circular* untuk lereng *highwall* dan bentuk *non – circular* untuk lereng *lowwall*. Permodelan dan analisis dilakukan dengan menggunakan metode kesetimbangan batas (*Limit Equilibrium Method*) dan metode Monte Carlo dengan bantuan perangkat lunak Slide 2 Dimensi. Hasil dari penelitian ini yaitu FK statik dan FK pseudostatik. Dimana Nilai FK statik bernilai lebih besar dibandingkan FK pseudostatik. Secara keseluruhan, alur penelitian ini dirangkum secara lengkap dalam bagan alir penelitian yang dapat dilihat pada Gambar-1.



Data Penelitian

Lokasi penelitian yaitu terletak di *pit* 1 PT. Bukit Asam, Tbk. Desa Tanjung Enim, Kecamatan Lawang Kidul. Berdasarkan logbor yang telah ada menunjukkan bahwa lapisan batuan terdiri dari batuan sedimen yaitu batupasir, batulempung, batulanau dengan sisipan batubara. Data yang akan digunakan dalam penelitian ini meliputi data sifat fisik dan mekanik batuan, data pengukuran getaran peledakan di lapangan berupa nilai *Peak Particle Acceleration* (PPA), dan data pengukuran MAT di lapangan.

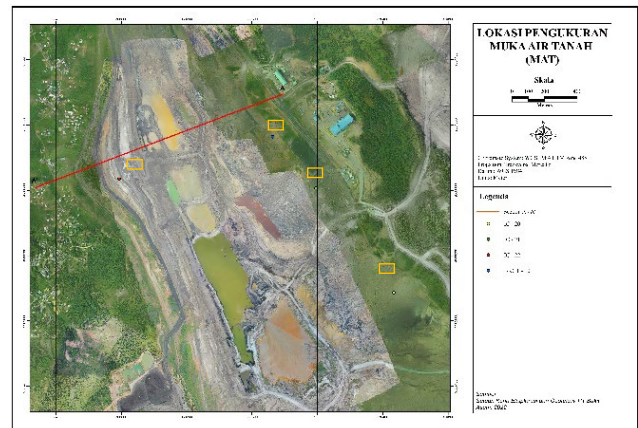
Berdasarkan sampel yang diperoleh dari hasil pengeboran geoteknik yang telah dilakukan pada beberapa titik penelitian, selanjutnya dilakukan pengujian di laboratorium. Selanjutnya dilakukan *fitting distribution* untuk menentukan distribusi terbaik dari sebaran data, dilakukan juga pengolahan statistik dasar untuk memperoleh nilai *mean*, maksimum, minimum, st. deviasi, rel. maksimum, dan rel. minimum. Adapun hasil rekapitulasi parameter masukan yang akan digunakan dalam analisis lereng dapat dilihat pada Tabel-1.

Tabel- 1. Parameter Masukan Analisis Lereng

Litologi	Statistik	Unit Weight	Direct Shear Test	
		UW (kN/m ³)	C (MPa)	Phi
OB A1 (Siltstone)	Distribusi	Normal	Lognormal	Beta
	Mean	15.75	0.18	22.48
	Max	21.63	0.65	30.90
	Min	6.79	0.10	7.25
	St. Dev	2.54	0.07	6.96
	Rel. Max	5.77	0.47	8.42
	Rel. Min	8.79	0.08	15.23
A1 (Coal)	Distribusi	Lognormal	Normal	Normal
	Mean	8.60	0.16	24.62
	Max	12.07	0.35	36.59
	Min	7.96	0.03	10.56
	St. Dev	1.02	0.09	6.53
	Rel. Max	3.47	0.18	11.97
IB A1-A2 (Sandstone)	Distribusi	Normal	Gamma	Beta
	Mean	16.11	0.19	24.62
	Max	19.52	0.34	33.33
	Min	0.75	0.07	14.60
	St. Dev	3.94	0.07	4.83
	Rel. Max	3.41	0.15	8.71
A2 (Coal)	Distribusi	Lognormal	Normal	Normal
	Mean	8.53	0.16	23.12
	Max	12.07	0.35	36.59
	Min	7.63	0.03	7.64
	St. Dev	0.93	0.08	8.39
	Rel. Max	3.53	0.19	13.46
IB A2-B1 (Claystone)	Distribusi	Triangular	Lognormal	Normal
	Mean	15.89	0.16	19.91
	Max	18.81	0.30	30.95
	Min	13.51	0.10	9.85
	St. Dev	1.24	0.05	5.24
	Rel. Max	2.92	0.14	11.04
B1 (Coal)	Distribusi	Triangular	Uniform	Uniform
	Mean	8.40	0.13	25.11
	Max	9.75	0.26	39.71
	Min	7.37	0.02	9.68
	St. Dev	0.64	0.08	8.19
	Rel. Max	1.35	0.13	14.60
IB B1-B2 (Claystone)	Distribusi	Lognormal	Exponen	Triangular
	Mean	16.54	0.16	17.77
	Max	20.39	0.36	31.91
	Min	14.37	0.11	10.07
	St. Dev	1.46	0.05	5.93
	Rel. Max	3.53	0.20	14.14
B2 (Coal)	Distribusi	Lognormal	Lognormal	Normal
	Mean	8.50	0.08	24.60
	Max	15.25	0.15	31.54
	Min	7.78	0.02	10.72
	St. Dev	1.76	0.04	7.09
	Rel. Max	6.75	0.08	6.94
IB B2-C (Sandstone)	Distribusi	Normal	Lognormal	Lognormal
	Mean	17.98	0.15	24.77
	Max	23.39	0.28	113.54
	Min	11.42	0.10	8.74
	St. Dev	1.87	0.04	10.99
	Rel. Max	5.41	0.13	88.77
C (Coal)	Distribusi	Lognormal	Lognormal	Triangular
	Mean	8.51	0.14	25.56
	Max	10.64	0.26	34.42
	Min	7.51	0.07	11.73
	St. Dev	0.63	0.04	6.56
	Rel. Max	2.12	0.12	8.86
	Distribusi	Lognormal	Lognormal	Triangular
	Mean	8.51	0.14	25.56
	Max	10.64	0.26	34.42
	Min	7.51	0.07	11.73
	St. Dev	0.63	0.04	6.56
	Rel. Max	2.12	0.12	8.86

Litologi	Statistik	Unit Weight	Direct Shear Test	
		UW (kN/m ³)	C (MPa)	Phi
IB C-D (Claystone)	Distribusi	Normal	Lognormal	Beta
	Mean	17.68	0.15	19.80
	Max	23.39	0.24	30.54
	Min	8.45	0.11	5.48
	St. Dev	1.77	0.03	6.36
	Rel. Max	5.70	0.09	10.74
	Rel. Min	9.23	0.03	14.32

Pemantauan Muka Air Tanah (MAT) di *pit* 1 menggunakan *Piezometer* manual. Dengan cara memasukan kabel yang di ujungnya terdapat sensor lampu ke dalam lubang, apabila lampu menyala berarti ujung kabel telah menyentuh air. Adapun titik pemantauan dapat dilihat pada Gambar-2.



Gambar-2. Lokasi Pengukuran Muka Air Tanah (MAT)

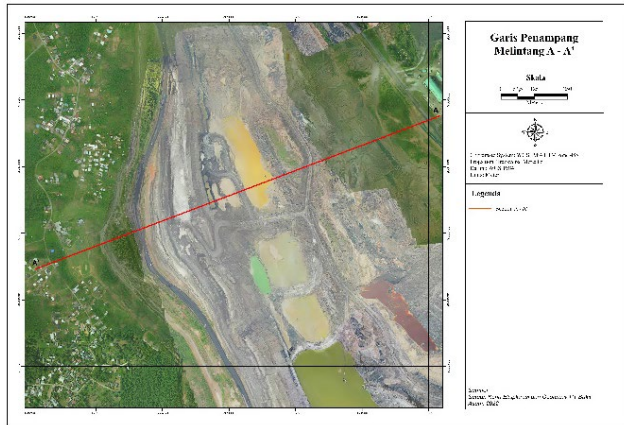
Selanjutnya dari Gambar-2 yaitu IC. 21 dan IC. 22 diperoleh data seperti pada Tabel-2 dengan kondisi jenuh (Hu 1) pada lereng *lowwall* sedangkan kedalaman air $\pm$ 5.250 m pada lereng *highwall*. Kemudian dilakukan analisis dimulai dari Hu 1, selanjutnya akan diturunkan perlahan pada Hu 0.8, Hu 0.6, dan Hu 0.

Tabel-2. Data Hasil Pengukuran Muka Air Tanah (MAT)

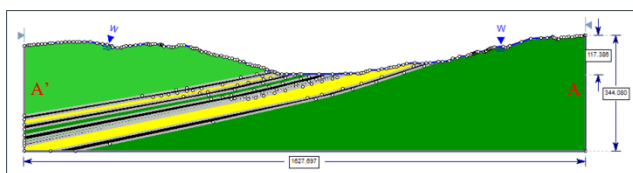
Bulan	IC.21		IC.22	
	369992 mE		368787 mE	
	9583614 mN		9583669 mN	
	Piezometer	MAT (m)	Piezometer	MAT (m)
Januari	v	Full Air	-	-
	v	Full Air	v	5.18
Februari	v	Full Air	v	5.20
	v	Full Air	v	5.22
	v	Full Air	v	5.25
Maret	v	Full Air	v	5.10
Mei	Akses Terhalang Pompa		v	4.16
Juni	Akses Terhalang Pompa		v	5.20
Juli	Akses Terhalang Pompa		-	-
Agustus	Akses Terhalang Pompa		v	5.19
September	Akses Terhalang Pompa		v	5.17

Penampang (A - A') yang akan dianalisis dalam penelitian dapat dilihat pada Gambar-3. Hasil dari garis penampang melintang pada Gambar-3 diperoleh penampang melintang lereng yang menggambarkan litologi di lokasi penelitian yang dapat di lihat Gambar-4. Berdasarkan gambar tersebut dapat diketahui panjang dari

penampang yaitu 1,627.697 m dengan kedalaman *pit* yaitu 117.386 m.



Gambar-3. Garis Penampang Melintang A – A’



Gambar-4. Penampang Litologi

Selanjutnya, data yang digunakan yaitu data getaran peledakan hasil dari pengukuran di lapangan berupa nilai *Peak Particle Acceleration* (PPA) dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel-3 Data Hasil Pengukuran Getaran Peledakan

No	Peak Acceleration (g)			PPA (g)	SD (m/kg ^{0.5})
	Transversal	Vertikal	Longitudinal		
1	0.030	0.026	0.023	0.030	37.650
2	0.023	0.023	0.026	0.026	65.211
3	0.033	0.030	0.020	0.033	25.914
4	0.030	0.020	0.020	0.030	26.360
5	0.023	0.016	0.020	0.023	61.892
6	0.020	0.020	0.026	0.026	45.656
7	0.030	0.026	0.030	0.030	70.428
8	0.030	0.023	0.023	0.030	88.868
9	0.036	0.030	0.043	0.043	43.474
10	0.020	0.033	0.023	0.033	40.988
11	0.016	0.016	0.020	0.020	81.514
12	0.020	0.020	0.016	0.020	65.211
13	0.023	0.023	0.023	0.023	71.579
14	0.023	0.020	0.020	0.023	75.299
15	0.016	0.020	0.020	0.020	52.720
16	0.023	0.016	0.020	0.023	52.720
17	0.026	0.019	0.026	0.026	65.211
18	0.012	0.011	0.013	0.013	82.158
19	0.062	0.024	0.047	0.062	30.144
20	0.010	0.008	0.010	0.010	207.372
21	0.007	0.006	0.007	0.007	150.673
22	0.122	0.181	0.079	0.181	31.632

Permodelan

Scaled Distance (SD) merupakan salah satu cara yang digunakan dengan tujuan mengontrol getaran tanah, menggunakan system metrik SD dapat dirumuskan[4] :

$$SD = \frac{R}{\sqrt{Q_{\max}}} \quad (1)$$

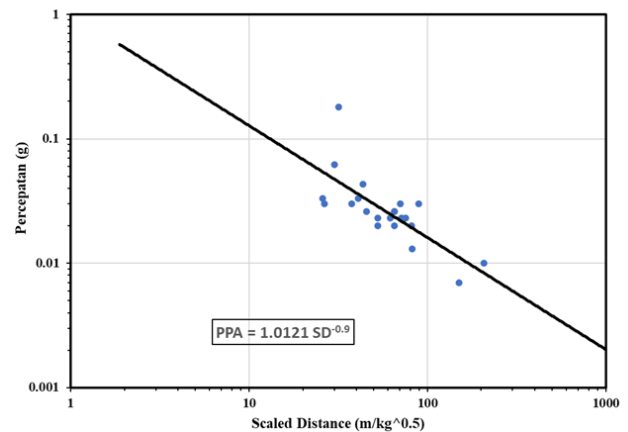
Dengan :

R = Jarak Titik Pengukuran ke Titik Peledakan (m)

$Q_{\max}$ = Muatan Bahan Peledak Maksimum (kg)

Sebelum dilakukan pemodelan, dilakukan regresi linier *Scaled Distance* vs *Peak Particle Acceleration* (PPA) untuk memperoleh konstanta (k & n). Dimana k & n merupakan konstanta yang akan digunakan untuk mengetahui besar nilai PPA dari titik pengukuran ke lokasi yang akan dianalisis seperti Gambar-5.

Kurva Regresi Scaled Distance vs PPA



Gambar-5. Regresi *Scaled Distance* (SD) vs PPA

Dari Gambar-5 diperoleh persamaan PPA, sebagai berikut :

$$PPA = 1.0121 (SD)^{-0.9} \quad (2)$$

Selanjutnya, nilai SD dapat dicari dengan menggunakan muatan bahan peledakan maksimum ($Q_{\max}$) yaitu sebesar 95.24 kg. Dengan jarak analisis (R) sebesar 25 m, sehingga diperoleh perhitungan nilai SD, sebagai berikut :

$$SD = \frac{25}{\sqrt{95.24}} = 2.562 \text{ m.kg}^{-0.5} \quad (3)$$

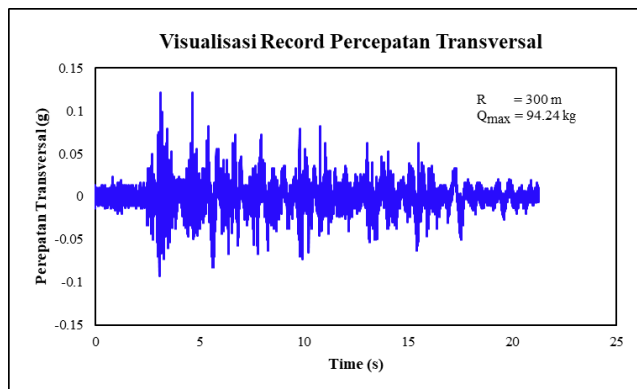
Dari nilai SD yang telah diperoleh, kemudian dilakukan perhitungan nilai PPA pada jarak 25 m, sebagai berikut :

$$\begin{aligned} PPA &= k \times SD^{-n} \\ &= 1.0121 \times (2.562)^{-0.9} = 0.434 \text{ g} \end{aligned} \quad (4)$$

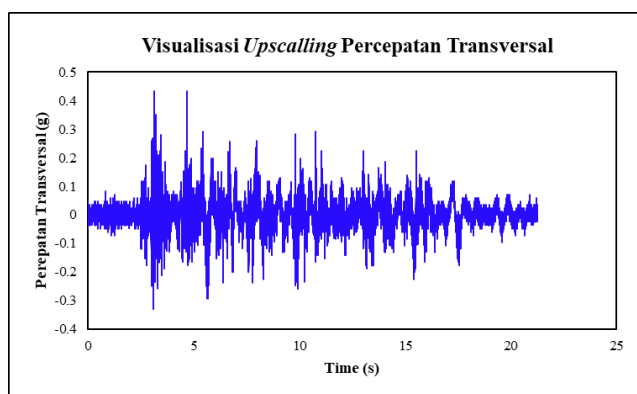
Dalam penelitian ini, dilakukan analisis terhadap lereng yang dikenai beban seismik dan beban akibat getaran peledakan. Input dinamik yang digunakan mengacu pada rekaman getaran peledakan tertinggi dari seluruh getaran peledakan yang diperoleh. Hal ini untuk mempertimbangkan kondisi terburuk yang dapat terjadi.

Analisis dilakukan pada lereng *highwall* dan *lowwall* dimana kedua lereng ini menggunakan data getaran gelombang transversal. Hal ini dikarenakan gelombang transversal merupakan gelombang yang tegak lurus dengan arah rambat sehingga gelombang ini berdasarkan titik lokasi pengukuran dan lokasi titik peledakan merupakan

gelombang yang dapat mewakili kondisi sebenarnya. Sehingga untuk input pseudostatik digunakan nilai tertinggi hasil *upscaling* pada gelombang transversal.

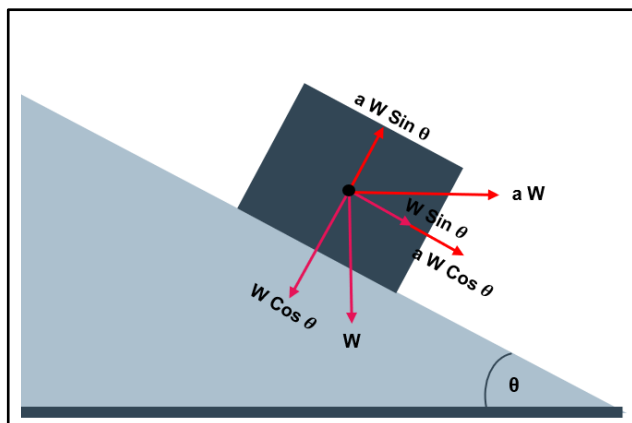


Gambar-6. Visualisasi Rekaman Getaran Peledakan



Gambar-7. Visualisasi *Upscaling* Rekaman Getaran Peledakan

Kestabilan lereng dinyatakan oleh nilai Faktor Keamanan (FK). FK dihitung berdasarkan parameter gaya penggerak dan gaya penahan seperti pada Gambar-8. Dimana jika suatu lereng diberikan beban dinamik bernilai a , maka akan mempengaruhi parameter gaya penggerak dan gaya penahan. Semakin besar beban dinamik diberikan, maka gaya penggerak akan semakin besar dan gaya penahan akan semakin kecil. Sehingga nilai FK yang diperoleh semakin kecil, oleh karena itu pada beberapa kasus terjadi kelongsoran.



Gambar-8. Gaya yang Bekerja pada Lereng

$$\text{Faktor Keamanan (FK)} = \frac{\text{Gaya Penahan}}{\text{Gaya Penggerak}} \quad (5)$$

Dimana :

$$\text{Gaya Penggerak} = w \cdot \sin \theta + m \cdot a \cos \theta$$

$$\text{Gaya Penahan} = c \cdot A + (w \cdot \cos \theta - m \cdot a \cdot \sin \theta) \cdot \tan \phi$$

Dengan :

$$w = \text{Berat Irisan Lereng} = m \cdot g \text{ (MN)}$$

$$m = \text{Massa Irisan Lereng (ton)}$$

$$\theta = \text{Sudut Kemiringan Lereng (}^\circ\text{)}$$

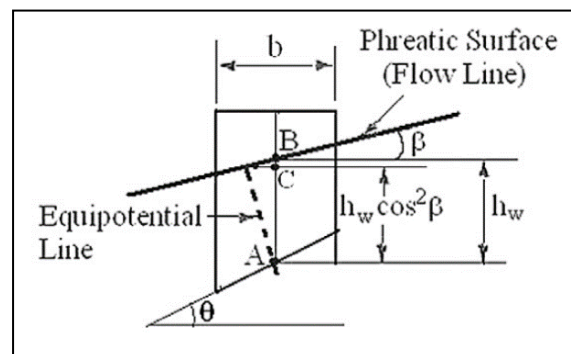
$$\phi = \text{Sudut Gesek Dalam (}^\circ\text{)}$$

$$a = \text{Percepatan Dinamik (g)}$$

$$c = \text{Koheesi Batuan (MPa)}$$

$$A = \text{Luas Gaya kontak pada Bidang Gelincir (m}^2\text{)}$$

Pemodelan ketinggian Muka Air Tanah (MAT) saat analisis menggunakan *water table* dengan metode *Hu Coefficient*. Metode *Hu Coefficient* ini merupakan metode yang digunakan berguna untuk memperkirakan tekanan pori. Jika pada saat melakukan analisis tidak diperoleh data yang akurat untuk memperkirakan ketinggian air maka penggunaan metode Hu ini akan sangat membantu. Dalam perangkat lunak Slide 2 *Hu coefficient* didefinisikan dalam faktor 0 dan 1. Dimana $H_u = 1$ adalah kondisi jenuh dan $H_u = 0$ adalah kondisi kering[7].



Gambar-9. Pore Pressure Pada Bawah Irisan

Pada Gambar-9 menunjukkan bahwa garis permukaan freatik dan garis ekuipotensial yang melewati titik A di dasar irisan. Jika titik B pada permukaan freatik yang terletak tepat di atas titik A berada pada jarak h_w di atas titik A, *head* tekanan di titik A adalah $h_w \cos^2 \beta$. Dimana β merupakan kemiringan permukaan di titik B. Ketika piezometer berada pada titik A, maka muka air dalam tabung *piezometer* akan naik ke titik C pada jarak $h_w \cos 2\beta$ di atas titik A, sehingga titik C berada pada permukaan *piezometer*. Tekanan pori di bagian bawah irisan dapat dilihat pada persamaan di bawah ini :

$$U = \gamma_w \cdot h_w \cdot H_u \quad (6)$$

$$U = \gamma_w \cdot h_w \cdot (\cos^2 \beta) \quad (7)$$

Dimana u = *pore pressure*, γ_w = *unit weight air*, h_w ketinggian air, dan β = kemiringan permukaan freatik [7].

Metode yang digunakan dalam menganalisis lereng yaitu metode kesetimbangan batas, metode ini merupakan metode yang paling sering digunakan dalam menganalisis kestabilan lereng dengan tipe gelinciran

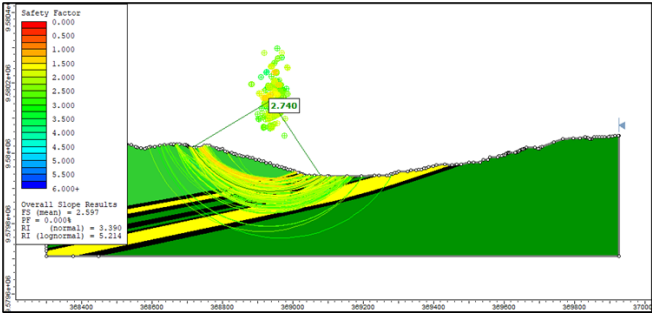
translational dan rotasional. Pada metode ini, perhitungan analisis kestabilan lereng hanya menggunakan kondisi kesetimbangan statik dan mengabaikan adanya hubungan tegangan – regangan pada lereng^[2]. Selain itu, digunakan juga metode Probabilitas Monte Carlo dalam menghitung nilai Probabilitas Kelongsoran (PK). Metode ini merupakan salah satu metode pendekatan alternatif dalam menentukan kestabilan suatu lereng, yang dapat menjawab kemungkinan suatu lereng akan mengalami kelongsoran selain nilai faktor keamanan (FK). Hal menarik dari metode probabilitas adalah representasi yang eksplisit dari ketidakpastian pada setiap parameter yang digunakan dalam analisis stabilitas lereng. Pada akhirnya nilai FK dapat dioptimasi dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) sehingga dapat memberikan tingkat keyakinan terhadap desain tersebut [1].

Pemodelan dilakukan pada penampang dengan kondisi statik yang akan mensimulasikan lereng tanpa pengaruh getaran peledakan, baik beban dinamik dalam waktu tertentu ataupun beban dinamik maksimum. Sedangkan pada kondisi pseudostatik akan mensimulasikan lereng dengan memasukkan nilai getaran maksimum dari gelombang yang akan digunakan, dalam hal ini yaitu gelombang transversal sebesar 0.434 g. Analisis ini dilakukan untuk lereng *highwall* maupun lereng *lowwall*.

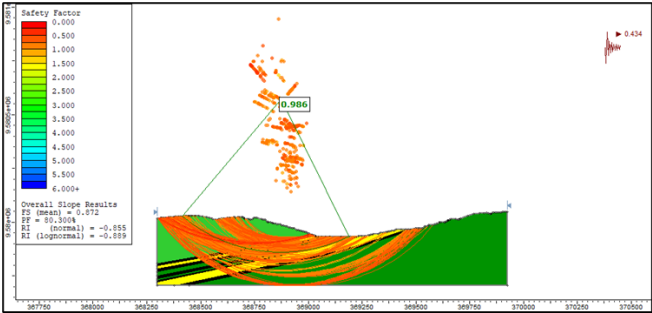
Analisis model ini, harus menunjukkan $FK \geq 1.3$ dan $PK \leq 5\%$ pada kondisi statik, dan $FK \geq 1.1$ dan $PK \leq 5\%$ pada kondisi pseudostatik sesuai Kepmen ESDM 1827 untuk lereng keseluruhan dengan keparahan longsoran tinggi [8].

HASIL DAN DISKUSI

Berdasarkan hasil analisis dapat diketahui nilai FK dan PK pada lereng *highwall* dan *lowwall* Salah satu contoh hasil analisis pada lereng ditunjukkan seperti Gambar-10 hingga Gambar-11.



Gambar-10. Analisis pada Kondisi Statik Lereng *Highwall* Hu 0



Gambar-11. Analisis pada Kondisi Pseudostatik Lereng *Highwall* Hu 0

Berdasarkan Kepmen ESDM No. 1827 Tahun 2018 untuk lereng keseluruhan dengan kategori kelongsoran tinggi, Faktor Keamanan (FK) adalah ≥ 1.3 pada kondisi statik dan ≥ 1.1 pada kondisi pseudostatik dengan PK Maks $\leq 5\%$ (Tabel-4). Berdasarkan hasil analisis dapat diketahui bahwa lereng *highwall* dan *lowwall* stabil. Tetapi pada lereng *highwall* tidak stabil karena memiliki $FK < 1.1$ untuk kondisi pseudostatik.

Untuk rekapitulasi hasil analisis yang telah dilakukan dapat dilihat pada Tabel-5 untuk lereng *highwall* dan Tabel-6 untuk lereng *lowwall*.

Tabel-4. Nilai Faktor Keamanan (FK) dan Probabilitas Kelongsoran (PK) Lereng Tambang^[8]

Jenis Lereng	Keparahan Longsor	Kriteria dapat diterima		
		Faktor Keamanan (FK) Statis (Min)	Faktor Keamanan (FK) Dinamis (Min)	Probabilitas Longsor (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	1.0	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	5 - 10%
	Tinggi	≥ 1.3	1.1	$\leq 5\%$

Tabel-5. Hasil Analisis Lereng *Highwall*

Parameter	<i>Highwall</i>							
	Hu 0		Hu 0.6		Hu 0.8		Hu 1	
	FK	PK	FK	PK	FK	PK	FK	PK
FK Statik	2.74	0.00	1.91	0.10	1.61	0.20	1.32	3.70
FK Pseudostatik	0.99	8.03	0.66	100.00	0.56	100.00	0.45	100.00

Tabel-6. Hasil Analisis Lereng *Lowwall*

Parameter	<i>Lowwall</i>							
	Hu 0		Hu 0.6		Hu 0.8		Hu 1	
	FK	PK	FK	PK	FK	PK	FK	PK
FK Statik	8.00	0.00	6.50	0.00	6.00	0.00	5.50	0.00
FK Pseudostatik	1.82	0.00	1.48	0.10	1.37	1.300	1.263	5.900

Analisis dilakukan pada lereng *highwall* dengan metode Bishop [3] dan lereng *lowwall* menggunakan metode Janbu. Hal ini dikarenakan bentuk longsoran pada lereng *highwall* berbentuk *circular* sedangkan pada lereng *lowwall* berbentuk *non – circular*. Berdasarkan Tabel-5 dan Tabel-6, dapat diketahui bahwa nilai Faktor Keamanan (FK) akan menurun dan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) akan meningkat seiring bertambahnya nilai Hu pada kondisi statik maupun pseudostatik.

Nilai FK pada kondisi statik merupakan nilai FK terbesar lereng. Hal ini dikarenakan lereng belum diberikan pembebanan dinamik berupa getaran peledakan. Sedangkan nilai FK pada kondisi pseudostatik merupakan nilai FK yang paling kecil, nilai FK ini dianggap terlalu konservatif karena beban dinamik yang diberikan selalu bernilai maksimal dan tidak mempertimbangkan waktu selama kegiatan peledakan dilakukan. Sehingga nilai FK yang diperoleh ini merepresentasikan lereng dengan getaran maksimal yang diberikan secara terus-menerus. Pada kenyataannya, lereng hanya bergerak pada saat kegiatan peledakan berlangsung. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis dengan metode lain, salah satunya dengan metode Newmark. Pada metode Newmark ini, dianggap bahwa lereng akan tergelincir/longsor ketika percepatan seismik melebihi percepatan kritis [9]. Perpindahan akhir dari lereng dapat diperoleh dengan integral ganda dari selisih antara percepatan seismik dengan percepatan kritis selama terjadinya getaran, yang disebut sebagai perpindahan permanen. Dengan menggunakan metode ini maka akan diperoleh nilai FK dengan anggapan bahwa lereng hanya digerakkan selama waktu berlangsung kegiatan peledakan.

Jika dilihat berdasarkan Tabel-5, dapat diketahui bahwa lereng dinyatakan tidak stabil pada kondisi pseudostatik. Dimana hasil analisis menunjukkan $FK < 1.1$ dengan $PK > 5\%$. Hal ini tidak sesuai dengan kondisi riil di lapangan, dimana faktanya tidak terjadi longsor pada lereng. Sehingga, untuk kondisi pseudostatik ini dianggap belum merepresentasikan kondisi di lapangan. Kemudian untuk data yang dapat mewakili lereng *highwall* yaitu pada Hu 0.6, hal ini dibuktikan jika kembali pada Gambar-2, dimana titik untuk data IC.22 berada pada lereng *highwall* dengan kedalaman yang paling dalam ± 5.250 m dari permukaan. Oleh karena itu, pada Hu 0.6 untuk lereng *highwall* dengan FK 0.664 dianggap telah merepresentasikan kondisi air dengan kedalaman ± 5.250 m tersebut.

Sedangkan titik yang berada pada lereng *lowwall* yang dapat mewakili yaitu data IC.21 dengan kondisi *full* air atau Hu 1. Dibuktikan dengan hasil analisis lereng *lowwall* pada Tabel-5 dapat dilihat bahwa FK memiliki nilai > 1.3 untuk kondisi statik dan > 1.1 untuk kondisi pseudostatik pada Hu 0, 0.6, 0.8, dan 1 sehingga lereng dinyatakan stabil. Hal ini dapat disebabkan bidang gelincir yang terbentuk pada lereng *lowwall* relatif lebih kecil jika dibandingkan dengan bidang

Berdasarkan hasil analisis ini, kemudian diberikan rekomendasi untuk mencegah apabila terjadi

ketidakstabilan pada lereng yaitu dengan mengurangi jumlah bahan peledak yang digunakan pada saat kegiatan peledakan sehingga nilai getaran yang diperoleh jauh lebih minimum dari getaran yang telah diperoleh sebelumnya, ataupun dilakukan perubahan geometri meliputi burden, spasi antar lubang maupun diameter lubang ledak sehingga pada saat analisis akan menghasilkan FK yang stabil. Pada perusahaan tempat penelitian, peledakan lubang ledak dilakukan dengan *delay* atau waktu tunda yang berbeda-beda. Sehingga dapat dipastikan tidak ada lubang yang meledak secara bersamaan, oleh karena itu, pengurangan jumlah lubang ledak dinilai kurang efektif jika dilakukan untuk mencegah lereng agar tetap stabil.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, dapat diketahui bahwa semakin kecil nilai kekuatan massa batuan dan semakin jenuh kondisi lereng maka nilai Faktor Keamanannya (FK) semakin kecil sedangkan nilai Probabilitas Kelongsorannya (PK) akan semakin besar. Nilai FK statik bernilai lebih besar dibandingkan FK pseudostatik, hal ini dikarenakan parameter masukan yang digunakan dalam analisis merupakan nilai getaran maksimum tanpa memperhatikan waktu berlangsungnya getaran.

SARAN

Adapun saran yang dapat diberikan untuk memperbaiki penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sebaiknya dilakukan pengukuran Muka Air Tanah (MAT) pada beberapa titik yang dapat mewakili lokasi penelitian. Agar hasil analisis yang diperoleh lebih akurat dan mendekati kondisi riil di lapangan.
2. Perlu dilakukannya analisis dengan menggunakan metode Newmark untuk merepresentasikan kegiatan peledakan di lapangan, agar hasil yang diperoleh sesuai dengan kondisi riil di lapangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih PT. Bukit Asam, Tbk yang telah memberikan kesempatan kepada penulis sehingga bisa melaksanakan penelitian di perusahaan tersebut.

DAFTAR ACUAN

1. Ahmad, Masagus A., dkk., 2011. Aplikasi Probabilistik Untuk Analisis Kestabilan Lereng Tunggal (Studi Kasus di PT Tambang Batubara Bukit Asam Tbk. Tanjung Enim, Sumatera Selatan). Prosiding TPT XX PERHAPI : Mataram.
2. Arif, Irwandy, 2016. Geoteknik Tambang: Mewujudkan Produksi Tambang yang Berkelanjutan dengan Menjaga Kestabilan Lereng. Jakarta : PT. Gramedia Pustaka Utama.

3. Bishop, A. W., 1955. The Use of Slip Surface in The Stability of Analysis Slopes. Geotechnique : London, Vol. 5.
4. Dowding, C.H., 1985. Blast Vibration Monitoring and Control. Northwestern University, United States of America.
5. Hoek, E., Bray, J. W., 1981. Rock Slope Engineering. Institution of Mining and Metallurgy : London.
6. Hoek, E., Bray, J. W., 1987. Factor of Safety and Probability of Failure, Chapter 8 – Rock Engineering King, H. 1982, A Guide to the Understanding of Ore Reserve Estimation. Australian Institute of Mining and Metallurgy : Australia.
7. Huang, Y.H., 2014. Slope Stability Analysis by the Limit equilibrium method, ASCE Press, Virginia, p. 106-112.
8. Kementerian ESDM RI. 2018. Keputusan Menteri ESDM Republik Indonesia Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik. Indonesia.
9. Newmark NM., 1985. Effect of Earthquakes on Dams and Embankment, Rankine Lecture, Geotechnique. 15(2), 139-160.
10. Steffen, O.K.H., 2008. Contreras, L.F., Terbrugge, P.J., Venter, J. A Risk Evaluation Approach for Pit Slope Design). The 42th US Rock Mechanics Symposium and 2nd US-Canada Rock Mechanics Symposium : San Fransisco.