



## **SIMULASI BERM TERHADAP KESTABILAN LERENG FINAL TAMBANG BATUBARA METODE PSEUDO-STATIK**

### **BERM SIMULATION ON FINAL SLOPE STABILITY OF COAL MINE PSEUDO-STATIC METHOD**

M. T. Toha<sup>1</sup>, H. E. Handayani<sup>2</sup>, R. Juniah<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya  
Jl. Raya Palembang-Prabumulih Km.32 Inderalaya Sumatera Selatan, Indonesia  
e-mail: [ttoha@unsri.ac.id](mailto:ttoha@unsri.ac.id), [harminuke@yahoo.co.id](mailto:harminuke@yahoo.co.id), [restu\\_juniah@yahoo.co.id](mailto:restu_juniah@yahoo.co.id)

#### **ABSTRAK**

Kegiatan pengupasan lapisan tanah penutup (*overburden*) untuk material low strength rock yang tidak mampu digali langsung oleh *excavator* PC 2000 dan tidak efektif menggunakan *ripper* maka harus dilakukan kegiatan peledakan. Salah satu efek peledakan adalah getaran tanah (*ground vibration*) akan berdampak terhadap kestabilan lereng, baik lereng kerja (*working slope*) maupun lereng akhir (*final slope*). Dalam perencanaan kemantapan lereng, pada prinsipnya sudut kemiringan lereng akhir (*overall slope*) dirancang setajal mungkin agar mengurangi *overburden* yang akan dikupas dan kondisi lereng dalam keadaan aman. Penelitian ini akan melakukan analisis simulasi *berm* terhadap kestabilan lereng tambang batubara dengan metode pseudo-statik. Tujuan penelitian untuk mengoptimalkan *overall slope* dengan melakukan simulasi *berm* (*berm*) 10 m, 12 m, dan 15 m dan teknis mereduksi getaran tanah. Kegiatan penelitian meliputi pengamatan getaran tanah PPV (*Peak Particle Velocity*) dan PPA (*Peak Particle Acceleration*); kondisi geologi, geoteknik, dan geohidrologi serta melakukan simulasi *berm*. Hasil simulasi ketiga *berm* pada lima *section* (*cross section*) semua relatif aman dengan nilai faktor keamanan (FK) *section* A1 adalah 1,15; 1,24; 1,37; *section* B1 (FK: 1,46, 1,53, 1,67); B2 (FK: 1,28, 1,38, 1,52); C1 (FK: 1,46, 1,56, 1,71); dan C2 (FK: 1,52, 1,65, 1,77). Disarankan lebar *Berm* optimal yang diterapkan adalah 12 m. Pada saat area peledakan mendekati *Final Slope* maka untuk meminimalisir getaran tanah efek kegiatan peledakan yaitu dengan mengurangi penggunaan bahan peledak, menerapkan sistem *delay* dan metode *controlled blasting* pada jenjang akhir tanpa mempengaruhi kualitas distribusi fragmentasi hasil peledakan.

**Kata-kata kunci:** peledakan, getaran tanah, kestabilan lereng pseudo-statik, PPV, PPA

#### **ABSTRACT**

*Overburden* removal for material with relatively low strength rock that cannot be dug directly by the *excavator* PC 2000 and is not effective using a *ripper* so blasting activities must be carried out. One of the effects of blasting is ground vibration will affect the stability of the slope, both the working slope and the final slope. In the planning of slope stability, in principle the overall slope angle is designed as steeper slope so as to reduce *overburden* to be excavated and the slope condition to be safe. This research will conduct a simulation of the *berm* of the slope stability on the coal mine using the pseudo-static method. The research objective is to optimize the overall slope by simulating a *berm* of 10 m, 12 m, and 15 m and technically reduce ground vibration. Research activities include the observation of PPV (*Peak Particle Velocity*) and PPA (*Peak Particle Acceleration*) ground vibrations; geological; geotechnical; and geohydrological conditions as well as *berm*-scale simulations. The results of the third simulation *berm* in five sections (*cross section*) are all relatively safe with the value of the factor of safety (FS) section A1 are 1.15, 1.24, 1.37; section B1 (FS: 1.46, 1.53, 1.67); B2 (FS: 1.28, 1.38, 1.52); C1 (FS: 1.46, 1.56, 1.71); and C2 (FS: 1.52, 1.65, 1.77). It is recommended that the optimal *Berm* is 12 m. When the blasting area approaches the *Final Slope* then to minimize the ground vibration the effects of blasting activities are to reduce the use of explosives, apply a *delay* system, and a *controlled blasting* method at the final slope, without affecting the quality of the blasting fragmentation distribution.

**Keywords :** blasting, ground vibration, pseudo-static slope stability, PPV, PPA

**PENDAHULUAN**

Kegiatan penambangan batubara pada *Pit Town Site Base Camp* (TSBC) terdiri dari kegiatan pembersihan lahan, pengupasan dan pengangkutan *top soil* serta *overburden*, penggalian dan pengangkutan batubara, dan reklamasi tambang/revegetasi. Pada kegiatan penggalian *overburden* digunakan *excavator backhoe* Komatsu PC2000 dengan *digging force* 626 kN = 0,626 MPa, sedangkan material *overburden* berupalow strength rock dengan nilai kuat tekan berkisar 0,98 – 5,26 MPa[1] sehingga tidak mampu digali langsung oleh *excavator*. Untuk mengoptimalkan produktivitas *excavator* maka untuk penggalian *overburden* harus dilakukan kegiatan peledakan. Kegiatan peledakan akan menimbulkan beberapa dampak negatif, salah satunya adalah getaran tanah (*ground vibration*)[2].

Getaran tanah yang ditimbulkan oleh kegiatan peledakan apabila telah melampaui level tertentu dapat mengakibatkan gangguan terhadap kestabilan lereng dan kerusakan pada lingkungan sekitar tambang [3]. Getaran biasanya dinyatakan dalam *peak particle velocity* (PPV), *peak particle acceleration* (PPA), perpindahan, dan percepatan yang sangat dipengaruhi oleh jumlah bahan peledak maksimal per *delay* dan jarak titik pengukuran kelokasi peledakan. Siring dengan kemajuan penambangan dimana area peledakan semakin mendekati lereng, baik itu lereng kerja maupun lereng final maka perlu dilakukan upaya pengontrolan getaran tanah. Efek Getaran tanah pada kestabilan lereng adalah menambah gaya penggerak akibat percepatan horizontal. Sehingga apabila gaya penahan lebih kecil dari gaya penggerak, maka lereng akan runtuh [1], [4].

Oleh karena itu untuk mengetahui efek dari getaran tanah terhadap kestabilan lereng dilakukan analisis kestabilan lereng pseudo-statik dengan menambahkan variabel getaran tanah (koefisien seismik) [5], [2], [4].

Selain itu untuk meminimalisir getaran tanah efek dari kegiatan peledakan terhadap kestabilan lereng dapat dilakukan dengan modifikasi, sistem *delay*, jumlah bahan peledak, dan menerapkan metode *controlled blasting*[6],[7].

Didalam perencanaan geometri jenjang pada prinsipnya dirancang sudut kemiringan keseluruhan (*overall slope*) dibuat setajal mungkin dan kondisi lereng aman. Dengan semakin terjalnya *overall slope* maka jumlah *overburden* yang harus dikupas semakin kecil[1].

Tujuan penelitian ini akan membahas analisis pseudo-statik simulasi *berm* 10 m, 12 m, dan 15 m terhadap kestabilan *final slope*. Disamping itu, melakukan analisis getaran tanah (PPV dan PPA) efek kegiatan peledakan *overburden* untuk mengetahui besaran koefisien seismik untuk digunakan dalam analisis kestabilan lereng pseudo-statik. Simulasi *berm* terhadap kestabilan lereng dalam rangka optimalisasi *overall slope pit limit* untuk mengetahui bagaimana kondisi kestabilan lereng (FK) ketiga geometri jenjang tersebut. Prinsip dalam melakukan analisis kestabilan lereng *final* harus

dilakukan analisis terhadap *single slope*, *intermediate slope*, dan *overall slope*, mengingat material pembentuk lereng yang bervariasi dan adanya struktur geologi [1].

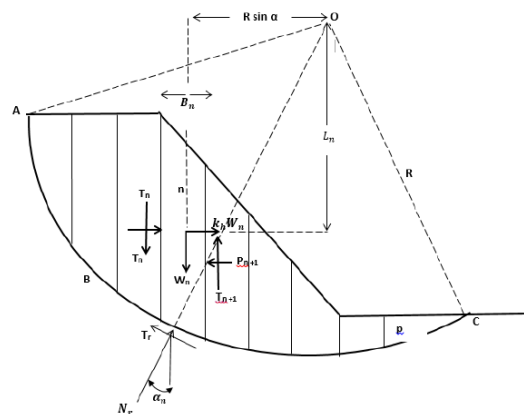
Hasil penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai acuan dalam merancang *overall slope* lereng *final* yang optimal dan teknis untuk meminimalisir getaran tanah efek peledakan *overburden* dalam rangka menunjang optimalisasi *overall slope*, kelancaran dan keselamatan kegiatan penambangan dan lingkungan di industri pertambangan.

**METODE PENELITIAN**

Lokasi penelitian ini adalah perusahaan pertambangan batubara PT Bukit Asam Tbk yang terletak di Tanjung Enim, Kabupaten Muara Enim, Provinsi Sumatera Selatan. Lokasi pengukuran dan pengamatan berada di area penambangan batubara Tambang Town Site Base Camp (TSBC). Penelitian ini dilakukan pada periode Juni - Juli 2019.

Tahapan dalam penelitian dimulai dari tahapan kajian kepustakaan, studi lapangan, pengolahan dan analisis data, sertakesimpulan dan saran.

Tahapan kajian kepustakaan dilakukan untuk memperoleh landasan teoritis. Adapun landasan teori yang digunakan dalam analisis kestabilan lereng pseudo-statik yaitu dengan memperhitungkan variabel getaran tanah akibat peledakan *overburden*[5], [4], [8], [9]. Pada setiap irisan, gaya-gaya yang bekerja dalam bidang longsoran busur seperti diilustrasikan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Model Lereng dengan Bidang Gelincir Longsoran Busur

Untuk menghitung faktor keamanan (FK) kestabilan lereng pseudo-statik diperlukan variabel koefisien seismik atau koefisien gempa horizontal ( $K_h$ ).

$$FK = \frac{\sum_{n=1}^p (c \cdot B_n \cdot \text{Sec } \alpha + W_n \cos \alpha_n \tan \varphi)}{\sum_{n=1}^p [W_n \sin \alpha_n + k_h W_n (\frac{L_n}{R})]}$$

Dimana :FK = Faktor Keamanan, Kh = koefisien gempa horizontal; W = luas tiap irisan; c = kohesi; R = jari-jari longsor; h = tinggi rata-rata irisan; b = lebar irisan; x = jarak horizontal dari pusat massa irisan terhadap pusat momen;  $\alpha$  = sudut kemiringan lereng.

Koefisien seismik diperoleh dari pengukuran getaran tanah menggunakan *blastmate*. Getaran horizontal ini akan mengontrol gaya pseudo-statik yang bekerja pada lereng. Percepatan seismic (Kh) sama dengan 50% dari *peak ground acceleration* (PGA) (yaitu  $Kh = 0,5 \times a_{max}/g$ ) [5], [11], [6]. Nilai koefisien seismik (Kh) diperoleh dengan persamaan berikut:

$$Kh = 0,5 \frac{a_d}{g}$$

Dimana : Kh = koefisien seismik horizontal;  
 $a_d$  = percepatan seismik terkoreksi (gal); g = gal

Hasil korelasi antara nilai perhitungan jarak minimum batuan yang aman dari kerusakan batuan dengan grafik kecepatan rambat gelombang peledakan diketahui bahwa nilai PPV yang menyebabkan terjadinya kerusakan batuan yaitu 17,20 mm/detik (PT. KJA), 18,41 mm/detik (PTBA), 16,70 mm/detik (PT. BBE) dan 16,80 mm/detik (PT. MSJ) [12].

Tahapan kedua studi lapangan yaitu melakukan pengumpulan data primer serta data sekunder sebagai berikut: Data primer meliputi pengukuran langsung getaran tanah (pada kegiatan peledakan dengan jarak tertentu, pendataan pola sistem tunda (*delay*) yang diterapkan, dan jumlah bahan peledak yang digunakan); pengukuran geometri peledakan; mengamati struktur geologi. Data sekunder yang dibutuhkan antara lain peta lokasi penelitian, serta data geologi; geoteknik (karakteristik fisik dan karakteristik mekanik) batuan di lokasi penelitian; data sebelumnya getaran tanah (meliputi PPV, PPA, percepatan seismik, jarak, jumlah lubang, dan jumlah bahan peledak); peta rencana *sequence* blok penambangan.

Tahapan ketiga yaitu pengolahan dan analisis data. Analisis yang digunakan untuk mengetahui pengaruh getaran tanah akibat peledakan tanah penutup terhadap kestabilan lereng adalah menggunakan metode analisis pseudo-statik dengan bantuan *software* Slide versi 6 dan *Geostudio* 2012. Dengan menginput data kondisi geologi, geoteknik, geohidrologi/ hidrologi, dan percepatan getaran tanah dapat diketahui faktor keamanan untuk lereng tambang (*single slope*, *intermediate slope*, dan *overall slope*) [1]. Hasil analisis kestabilan lereng pseudo-statik dengan melakukan simulasi *berm* terhadap lereng *final* untuk mengetahui kondisi kestabilan lereng *final* dari ketiga simulasi tersebut. Analisis kestabilan lereng dibahas untuk *limasection* yang mana kondisi lereng yang kritis dan

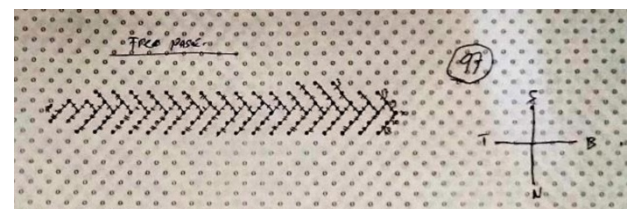
yang aman. Juga dibahas bagaimana teknis meminimalisir getaran tanah efek peledakan *overburden*. Tahapan kesimpulan dan saran adalah mengetahui hasil simulasi *berm* terhadap kestabilan lereng *final* sebagai acuan perusahaan dalam optimalisasi *overall slope* lereng *final*. Disamping itu, rekomendasi teknis peledakan untuk mengurangi getaran tanah (sistem *delay*, penggunaan bahan peledak, dan penerapan metode *controlled blasting*) dalam rangka meningkatkan kestabilan lereng.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Aktivitas Peledakan**

Sistem peledakan *overburden* di *pit* TSBC menggunakan *non-electric* detonator (nonel) yang dikombinasikan dengan sistem inisiasi menggunakan dayadet *electric* detonator yang dihubungkan ke *blasting machine* menggunakan *lead wire*. Geometri peledakan Diameter 6,75 inch, Burden 8 meter, Spasi 9 meter, Kedalaman 7,5 meter. Bahan peledak yang digunakan ANFO, yang terdiri dari 4.350 kg AN dan 316 liter FO. Jumlah lubang ledak 97 lubang. Jumlah bahan peledak yang digunakan sebesar 4.666 kg, dan volume bongkaran sebesar 52.380 bcm serta Powder Factor 0,08 kg/ bcm.

Sistem *delay* peledakan dibagi menjadi 5 grup, dimana 4 grup terdiri dari 20 lubang, dan 1 grup terdiri dari 17 lubang dengan sistem *delay* masing-masing grup menggunakan *delay* detonator 0 ms, 42 ms, 67 ms, 109 ms, 3000 ms, dan *inhole detonator* 500 ms (Gambar 2). Jika jenis peledakan *double deck* maka menggunakan *inhole detonator* 500 ms, dan *inhole detonator* 6000 ms untuk meminimalisir dampak peledakan berupa getaran yang dihasilkan pada peledakan tersebut.



**Gambar 2.** Sistem Delay

Hasil pengukuran getaran tanah berdasarkan jumlah bahan peledak dan sistem *delay* yang diterapkan fungsi jarak didapat PPV, PVS, dan Percepatan Seismik yang terbesar periode April – Juli 2019 seperti tertera pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Data Getaran Tanah

No	Bulan	PPV (mm/s)	PVS (mm/s)	Percepatan (g)	Jarak (m)	Jumlah Lubang (buah)	Handak (kg)
1	April	7,990	7,990	0,058	200	117	31,75
2	Mei	0,434	0,629	0,040	1700	43	25,40
3	Juni	4,190	6,110	0,106	300	120	25,40
4	3 Juli	2,410	2,680	0,106	480	140	31,75
5	17 Juli	2,160	3,340	0,106	400	122	31,75

Koefisien seismik (Kh) yang digunakan untuk perhitungan faktor keamanan berdasarkan analisis

kestabilan lereng pseudo-statik digunakan asumsi data bulan Juni dimana percepatan seismik 0,106 g dan PVS 6.110 mm/s pada jarak 300 m, maka :

$$K_h = 0,50 \times \text{percepatan (g)}$$

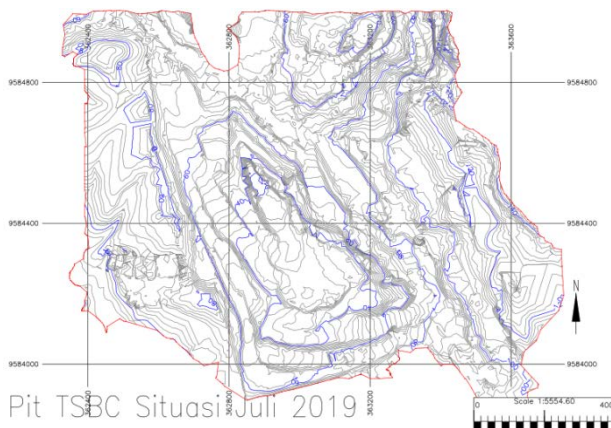
$$K_h = 0,50 \times 0,11 \text{ g} = 0,055 \text{ g}$$

Pada saat area peledakan mendekati *final slope* agar dilakukan pengurangan jumlah bahan peledak (jumlah lubang ledak) per grup *delay* dan disarankan menerapkan kontrol peledakan sistem *line drilling*[10], [7].

**Kondisi Geologi, Geoteknik, dan Geohidrologi**

Area TSBC disituasikan dengan bentuk morfologi perbukitan. Elevasi tertinggi bukit pada ev +135 mdpl dan elevasi terendah lembah pada ev +55 mdpl. Kondisi struktur geologi area sekitar dipengaruhi oleh intrusi batuan beku andesit pada bagian timur *pit existing*. Kontur struktur perlapisan area TSBC cenderung mengikuti zona intrusi membentuk *dome* dengan zona intrusi sebagai titik pusat. Sehingga arah endapan menerus kearah selatan kemudian menyerong ketimur mengikuti zona intrusi. Struktur patahan cenderung ditemukan pada area yang berbatasan dengan zona intrusi andesit.

*Pit existing* TSBC (Gambar 3) memiliki luasan area 120 Ha, meluas dengan mengikuti arah *strike* batubara utara ke selatan dengan arah *dip* ke barat. Bagian utara dibatasi oleh batas *cropline* batubara, bagian timur dibatasi pemukiman, bagian barat dibatasi zona intrusi andesit, bagian selatan sebagai arah kemenerusan *pit*.



**Gambar 3.**Peta Topografi Tambang TSBC

Stratigrafi area *pit* TSBC didapatkan dari korelasi data bor PT Bukit Asam Tbk area TSBC. Stratigrafi daerah TSBC (Gambar 4) adalah sebagai berikut:

1. Lapisan *overburden*  
Lapisan *overburden* A1 dominan jenis material *silty claystone*. Memiliki ketebalan vertikal 36 – 190 m pada area *Low Wall* dan *highwall*.

2. Lapisan batubara *seam* A1  
*Seam* A1 memiliki lapisan pengotor pada *roof* dan *floor seam* dengan jenis material *silicified coal* dan lensa batu lanau. Ketebalan vertikal *seam* A1 antara 3 – 8 m.
3. Lapisan *Interburden* A1 – A2  
Lapisan *interburden* terdiri dari jenis material *sandy silty claystone*, dan batu pasir tufaan dengan ketebalan vertikal antara 4 – 12 m.
4. Lapisan batubara *seam* A2  
*Seam* A2 memiliki lapisan pengotor *silicified coal* pada *roof seam*. Ketebalan vertikal *seam* A2 antara 4 – 9 m.
5. Lapisan *interburden* A2 – B  
Lapisan *interburden* terdiri dari jenis material *sandy silty claystone* dengan ketebalan vertikal antara 12 – 20 m.
6. Lapisan batubara *seam* B  
*Seam* B memiliki lapisan pengotor tipis material lempung. Ketebalan vertikal *seam* B antara 7 – 14 m.
7. Lapisan *interburden* B – C  
Lapisan *interburden* terdiri dari jenis material *silty claystone* dengan ketebalan vertikal antara 35 – 44 m.
8. Lapisan batubara *seam* C  
*Seam* C memiliki ketebalan vertikal lapisan antara 4 – 8 m.

Ketebalan vertikal		Jenis Material
Mean	Rentang	
72 m	36 - 86 m	Silty Claystone
6 m	3 - 8 m	Seam A1
7 m	4 - 12 m	Sandy Silty Claystone
7 m	4 - 9 m	Seam A2
17 m	12 - 20 m	Sandy Silty Claystone
12 m	7 - 14 m	Seam B
38 m	35 - 44 m	Silty Claystone
6 m	4 - 8 m	Seam C
		Sandy Siltstone

**Gambar 4.** Stratigrafi Area *Pit*TSBC

Lapisan material pada area *pit* TSBC dibagi berdasarkan lapisan *overburden*, *seam* batubara, dan *interburden* antar *seam*. Lapisan *overburden* dominan dengan jenis material *silty claystone*. Lapisan batubara terdiri dari *seam* A1, A2, B, dan C. Lapisan *interburden* terdiri dari jenis material *sandy silty claystone*, *silty claystone*, dan *sandy siltstone*.

Parameter geoteknik yang digunakan pada penelitian berupa data densitas, kohesi, dan sudut geser dalam

material kondisi jenuh air (Tabel 2.). Data parameter geoteknik didapatkan berdasarkan uji sifat fisik dan mekanik batuan yang dilakukan oleh PT Bukit Asam Tbk.

Air tanah sekitar area *pit* TSBC diasumsikan berasal dari air resapan permukaan. Sumber mata air tanah tidak ditemukan pada lubang bukaan *pit*. Penyaliran air tanah area *pit* TSBC diasumsikan hanya mengikuti bidang perlapisan dari lapisan *top soil*. Jenis material *top soil* cenderung bersifat *loose* material dengan ketebalan 1 – 3 m. Lapisan selanjutnya memiliki jenis material *silty claystone* yang bersifat lebih *impermeable*. Maka efek permukaan air tidak dipertimbangkan pada analisis.

**Tabel 2.** Parameter Geoteknik Pit TSBC

Lapisan	Jenis material	Parameter kestabilan lereng		
		$\gamma_w$	c	$\phi$
		kN/m <sup>2</sup>	kPa	deg
OB A1	Silty claystone	20.87	36	29.41
Seam A1	Coal	12.34	139.5	29.65
Interburden A1 - A2	Sandy silty claystone	19.7	133.5	29.65
Seam A2	Coal	12.34	161	29.66
Interburden A2 - B	Sandy silty claystone	21.84	116.18	21.12
Seam B	Coal	12.34	161	29.66
Interburden B - C	Silty claystone	21.87	127.92	23.68
Seam C	Coal	12.34	149	24.38
Lower C	Sandy silt-stone	21.8	120	20.75
Andesit	Andesit	25.61	724	24.68
Andesit lapuk	Andesit	25.43	218.17	24.68

Air tanah sekitar area *pit* TSBC diasumsikan berasal dari air resapan permukaan. Sumber mata air tanah tidak ditemukan pada lubang bukaan *pit*. Penyaliran air tanah area *pit* TSBC diasumsikan hanya mengikuti bidang perlapisan dari lapisan *top soil*. Jenis material *top soil* cenderung bersifat *loose* material dengan ketebalan 1 – 3 m. Lapisan selanjutnya memiliki jenis material *silty claystone* yang bersifat lebih *impermeable*. Maka efek permukaan air tidak dipertimbangkan pada analisis.

#### Analisis Kestabilan Lereng Pseudo-statik

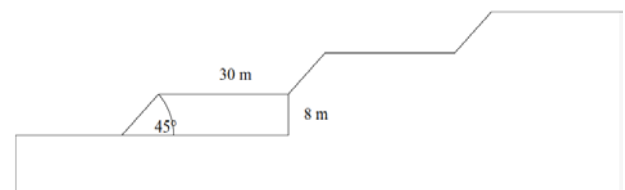
Kestabilan lereng statik ditentukan dengan analisis batas kesetimbangan atau analisis deformasi tekanan. Pada analisis batas kesetimbangan gaya dan atau momen kesetimbangan massa tanah diatas bidang longsor potensial dipertimbangkan dan massa tanah diatas

bidang tersebut diasumsikan dalam kondisi kaku (*rigid*). Gaya geser diasumsikan bergeser mengikuti permukaan longsor yang menghasilkan faktor keamanan sepanjang permukaan tersebut.

Pengaruh getaran kegiatan peledakan tambang menyebar melalui lereng sekitar menyebabkan gaya geser dinamis yang berpotensi mengakibatkan longsor lereng. Respon dinamis kegiatan peledakan perlu diketahui untuk menentukan percepatan seismik yang mempengaruhi gaya geser dinamis tersebut. Nilai percepatan seismik ditentukan dengan memilih nilai terbesar percepatan puncak (*peak acceleration*) kegiatan peledakan sekitar *pit* periode Januari – Juli 2019. Analisis kestabilan lereng seismik dapat ditentukan dengan pendekatan metode pseudo-statik.

Faktor potensial penyebab longsor lereng tambang meliputi struktur geologi lemah, sifat fisik material lereng (geoteknik), air tanah (hidrogeologi), geometri lereng, dan getaran akibat kegiatan peledakan tambang. Maka faktor tersebut perlu diketahui dalam menganalisis kestabilan lereng *final*.

Lereng *existing pit* TSBC (Gambar 5) masih dalam proses perluasan *pit*. Lereng penambangan masih berupa lereng kerja aktif dengan lebar 30 m, tinggi 8 m, dan sudut kemiringan lereng 45°. Khusus pada area *Low Wall* utara, geometri yang digunakan *single slope* mengikuti *floor* batubara *seam* terbawah. Analisis dilakukan dengan membuat simulasi geometri jenjang *final* pada *pit existing* dengan diasumsikan pendalaman *pit* dilakukan hingga *floor seam* lapisan terbawah (*floor seam C*).



**Gambar 5.** Geometri Lereng *Existing Pit* TSBC

Parameter geometri jenjang *final* mengikuti parameter *pit existing* dengan tinggi 8 m, dan sudut kemiringan lereng tunggal 45° dan *berm* 15 m. Optimalisasi *overall slope pit limit* akan dilakukan simulasi *berm* 10 m, 12 m, dan 15 m (Tabel 3).

**Tabel 3.** Parameter Geometri Jenjang *Final*

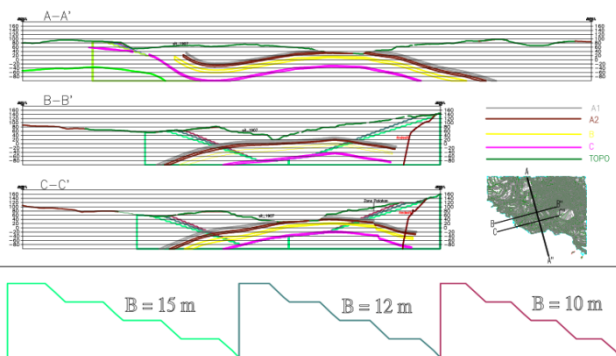
Geometri Jenjang		
Lebar (m)	Tinggi (m)	Sudut Kemiringan (°)
10	8	45
12	8	45
15	8	45

Lokasi *section* untuk analisis simulasi *bermd* dipilih pada area yang telah ditentukan batas penambangan (*pit limit*) oleh perusahaan yaitu pada area *sidewall* dan *low wall pit*. Sedangkan area *highwall* belum ditentukan batas penambangannya. Batas penambangan (*pit limit*) bagian utara dibatasi oleh batas *cropline* batubara, bagian timur dibatasi zona intrusi andesit, bagian barat dibatasi area pemukiman, bagian selatan arah sekuen *pit*.

*Section* dibuat dengan bantuan *software minescape 5.7*. Area *Low Wall* dibuat satu *section* A dan area *sidewall* dibuat dua *section* B dan C. Berdasarkan *section* yang dibuat, sisi lereng disimulasikan dengan geometri lereng yang telah ditentukan. Sehingga dihasilkan lima simulasi lereng *final*, yaitu lereng *section* A pada area *Low Wall* utara, *section* B1 dan C1 area *sidewall* barat, serta *section* B2 dan C2 area *sidewall* timur (Gambar 6).

Lereng *section* A disimulasikan dengan sebagian lereng berjenjang, dan sebagian *single slope* mengikuti *floor seam* C. Lereng *section* B1 dan C1 *sidewall* barat ditemukan memotong *seam* A1, A2, B, dan C dengan *dip* ke arah barat. Lereng *section* B2 dan C2 *sidewall* timur memotong *seam* A1, A2, B, dan C dengan *dip* ke arah timur berbatasan langsung zona intrusi andesit. Pada lereng *section* C2 ditemukan adanya struktur serta turun. Berdasarkan simulasi masing-masing variabel yang digunakan geometri jenjang, data stratigrafi dan geoteknik material serta geohidrologi dilakukan analisis kestabilan lereng metode statik.

Kegiatan pemberaian material *overburden* pada PT Bukit Asam Tbk melibatkan kegiatan peledakan pada jenjang dan *floor pit*. Sebaran getaran peledakan yang merambat pada dinding lereng penambangan menyebabkan percepatan seismik pada bidang perlapasan. Faktor tersebut berpotensi menyebabkan ketidakstabilan lereng penambangan. Nilai kestabilan lereng akibat kegiatan peledakan dapat diketahui dengan pendekatan metode pseudo-statik. Analisis kestabilan lereng metode pseudo-statik dilakukan dengan simulasi *berm* yang telah ditentukan.



**Gambar 6.** *Section* model Geometri Jenjang *Pit* TSBC

Nilai percepatan seismik kegiatan peledakan pada *pit* TSBC ditentukan dengan memilih percepatan puncak (g) yang paling berpengaruh berdasarkan data historis bulan Januari – Juli 2019. Data percepatan seismik

*pit* TSBC terdiri dari percepatan transversal, vertikal, dan longitudinal. Dalam analisis, percepatan transversal dan vertikal diasumsikan tidak berpengaruh besar pada ketidakstabilan lereng. Nilai percepatan longitudinal terbesar dengan nilai PVS tertinggi ditentukan sebagai percepatan seismik simulasi lereng. Nilai percepatan seismik yang digunakan dalam analisis adalah getaran tanah tertinggi yaitu pada peledakan bulan Juni dengan percepatan longitudinal 0,106 g dan PVS 6,110 mm/s dengan jarak 300 m (Tabel 1), sehingga nilai  $K_h$  yang digunakan dalam perhitungan faktor keamanan kestabilan lereng pseudo-statik adalah  $K_h = 0,50 \times 0,11 = 0,55$  g.

Kestabilan lereng dalam kondisi statik dipengaruhi oleh faktor geometri lereng, parameter geoteknik material dan air tanah. Adanya kegiatan peledakan tambang pada *pit* TSBC menambah pengaruh percepatan seismik pada kestabilan lereng. Analisis kestabilan lereng dilakukan untuk mengetahui pengaruh faktor tersebut pada faktor keamanan lereng. Pendekatan dilakukan dengan metode batas kesetimbangan busur statik dan pseudo statik.

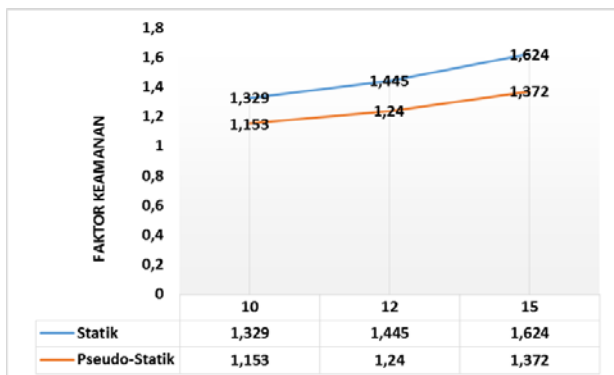
Tahapan analisis dilakukan dengan melakukan uji faktor keamanan (FK) lereng pada simulasi lereng kondisi statik dan pseudo-statik. Permodelan lereng dibuat dengan variabel *berm* 10 m, 12 m, dan 15 m. Parameter geoteknik material penyusun lereng diasumsikan dalam kondisi jenuh air karena parameter hidrologi berpengaruh besar didalam analisis kestabilan lereng. Nilai percepatan seismik yang digunakan dalam analisis kestabilan lereng pseudo-statik adalah percepatan longitudinal historis terbesar yaitu 0,058 g.

Area yang dianalisis yaitu, area *Low Wall section* 1, *sidewall* barat *section* B1 dan C1, *sidewall* timur *section* B2 dan C2. Pengujian faktor keamanan (FK) dilakukan pada lereng keseluruhan (*overall slope*), lereng menengah (*intermediate slope*), dan lereng tunggal (*single slope*). Analisis kestabilan lereng menggunakan *software rocscience slide v6.0* dengan metode batas kesetimbangan busur bishop. Simulasi kestabilan lereng dilakukan pada permodelan dengan variabel *berm* 10 m, 12 m, 15 m. Hasil analisis kestabilan lereng dalam kondisi statik dan pseudo-statik (Tabel 4, Gambar 7, 8, 9, 10, 11). Analisis melingkupi dari *crest* (puncak lereng) hingga (*toe*) terbawah lereng *final*.

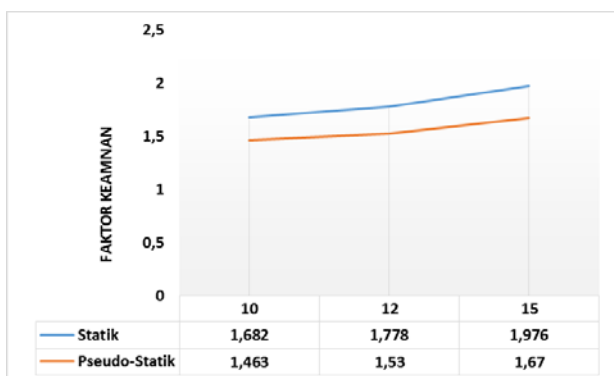
Hasil simulasi analisis kestabilan lereng untuk berbagai *berm* (Tabel 4) didapat faktor keamanan untuk *section* A1 untuk *berm* 15 m, FK statik dengan nilai 1,62 lebih besar dibandingkan dengan FK pseudo-statik dengan nilai FK 1,37 lebih kecil 15% yang disebabkan adanya penambahan daya pendorong akibat adanya koefisien seismik dikali massa lereng. Demikian juga, semakin kecil *berm*, maka nilai FK semakin menurun yang diakibatkan *overall slope* semakin terjal dimana yang lereng yang terdapat pada bidang longsor semakin besar dengan kata lain, daya pendorong semakin besar.

**Tabel 4.** Faktor Keamanan *Overall Slope*

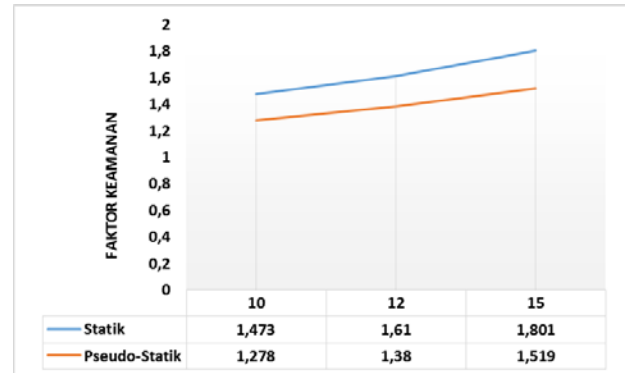
Lokasi Lereng	Lereng Tunggal	Geometri Jenjang Keseluruhan			Faktor Keamanan	
	Lebar (m)	Lebar (m)	Tinggi (m)	Overall Slope	Statik	Pseudo-Statik
Lowwall Utara Section A	10	404,5	184	24	1,33	1,15
	12	448	184	22	1,45	1,24
	15	530	184	20	1,62	1,37
Sidewall Barat Section B	10	313	142	25	1,68	1,46
	12	358,2	145	23	1,78	1,53
	15	402,7	141	20	1,98	1,67
Sidewall Timur Section B	10	435,5	194	24	1,47	1,28
	12	472,6	191	22	1,61	1,38
	15	536	202	20	1,80	1,52
Sidewall Barat Section C	10	306	136	25	1,78	1,46
	12	336,6	135	22	1,82	1,56
	15	378,8	135	20	2,01	1,71
Sidewall Timur Section C	10	332,2	145	24	1,76	1,52
	12	360,8	142	22	1,94	1,65
	15	421,3	144	20	2,09	1,77



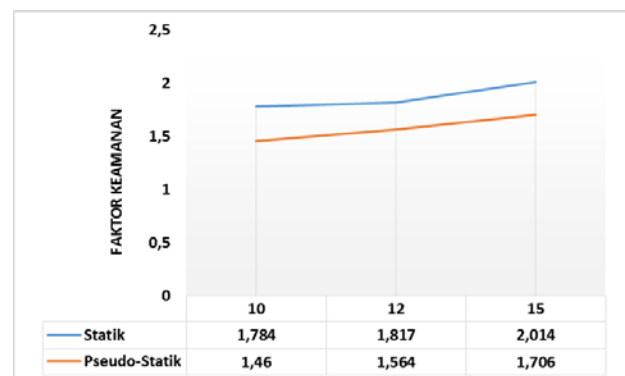
**Gambar 7.** Hubungan Berm VSFK *Overall Slope Lowwall Utara Section A*



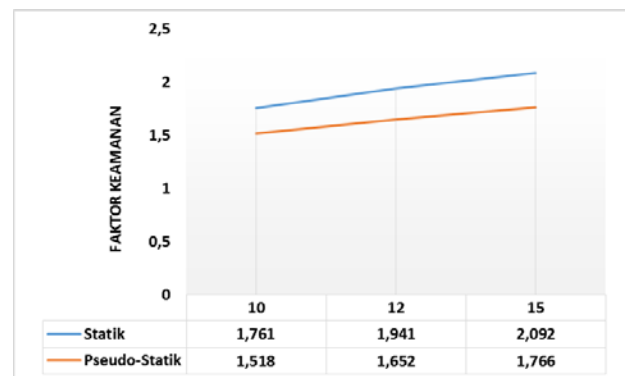
**Gambar 8.** Hubungan Berm VSFK *Overall Slope Sidewall Barat Section B*



**Gambar 9.** Hubungan Berm VSFK *Overall Slope Sidewall Timur Section B*



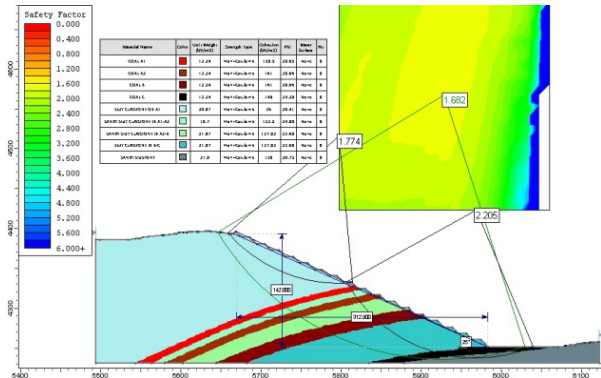
**Gambar 10.** Hubungan Berm VSFK *Overall Slope Sidewall Barat Section C*



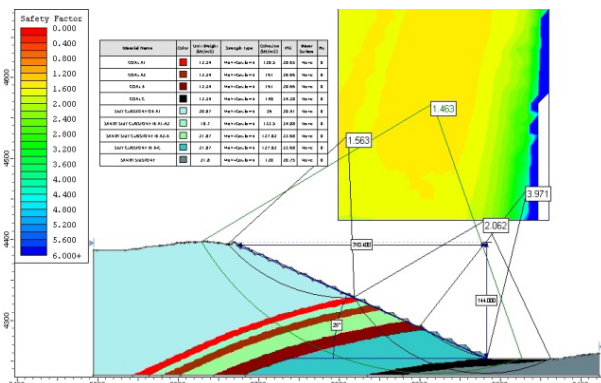
**Gambar 11.** Hubungan Berm VSFK *Overall Slope Sidewall Timur Section C*

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada (Tabel 4) nilai faktor keamanan meningkat berbanding lurus dengan meningkatnya *berm*, baik dalam kondisi statik atau pseudo-statik. Selain itu, dapat diamati pada *section* dengan *berm* yang sama terjadi penurunan faktor keamanan (FK) antara lereng kondisi statik dengan pseudo-statik. Seperti pada *section B1* dengan *berm* 10 m, hasil FK kondisi statik=1,68 (Gambar 12), sedangkan hasil FK kondisi pseudo-statik=1,46 (Gambar 13) dengan penurunan sekitar 13%. Penurunan FK kondisi

pseudo-statik dipengaruhi oleh nilai percepatan seismik longitudinal 0,055 g akibat kegiatan peledakan.



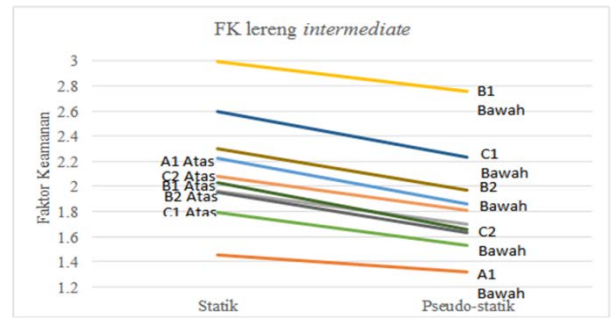
Gambar 12. FK Lereng section B1 Kondisi Statik



Gambar 13. FK Lereng section B1 Kondisi Pseudo Statik

Ketidakstabilan lereng juga berpotensi pada lereng *intermediate* (pertengahan). Hal ini dipengaruhi oleh faktor kondisi geoteknik susunan material (stratigrafi). Penentuan nilai kestabilan lereng dilakukan dengan cara yang sama seperti sebelumnya. Analisis kestabilan lereng pada *intermediate slope* masing-masing *cross* terdiri dari dua bagian, yaitu *intermediate* bagian atas (Bagian A) dan *intermediate* bagian bawah (Bagian B) (Gambar 12 dan Gambar 13).

Penentuan analisis untuk dua bagian *intermediate slope* berdasarkan perbedaan jenis material (stratigrafi) pembentuk lereng. Lereng *intermediate section A* bagian atas dan bawah terdiri dari jenis material *sandy siltstone*. Lereng *intermediate section B1, B2, C1, dan C2* bagian atas terdiri dari jenis material *silty claystone*. Lereng *intermediate B1, B2, C1, dan C2* bagian bawah terdiri dari jenis material *Sandy silty claystone, coal, dan under coal seam C (sandy siltstone)*.



Gambar 14. FK Lereng Intermediate

Dari Gambar 14, nilai FK lereng *intermediate section A* antara bagian atas dan bawah terdiri atas jenis material dan struktur geologi yang sama. FK tertinggi pada *section A1* bagian atas dengan FK = 2,223 (statik), FK terendah pada *section A1* bagian bawah dengan FK = 1,453 (statik). Hasil tersebut menunjukkan, area terlemah pada *section A1* area *Low Wall* utara terdapat pada lereng *intermediate slope*.

Nilai FK lereng *intermediate section B1, B2, C1 dan C2* bagian atas terdiri dari stratigrafi material yang sama. Pada lereng *section C2* terdapat struktur patahan. FK tertinggi pada *section C2* atas dengan FK = 2,080 (statik), FK terendah pada *section C1* atas dengan FK = 1,791 (statik).

Nilai FK lereng *intermediate section B1, B2, C1 dan C2* bagian bawah terdiri dari jenis material yang sama. Lereng memiliki perbedaan atas geometri lereng keseluruhan dan struktur geologi yang berbeda. FK tertinggi pada *section B1* bawah dengan FK = 2,995 (statik), FK terendah pada *section C2* bawah dengan FK = 2,029 (statik).

Hasil pengukuran FK lereng *intermediate* menunjukkan adanya pengaruh faktor susunan geometri lereng, susunan jenis material (stratigrafi), dan struktur geologi pada kestabilan lereng. Lereng dengan susunan material *sandy siltstone* memiliki nilai FK < dari lereng dengan susunan material *sandy silty claystone, coal, dan sandy siltstone*. Lereng dengan struktur patahan memiliki nilai FK < dari lereng tanpa adanya struktur patahan. Pengaruh seismik pada lereng *intermediate* mengurangi tingkat kestabilan lereng dengan persentase perubahan FK yang bervariasi.

Analisis lereng tunggal (*single slope*) dilakukan untuk mengetahui faktor kestabilan lereng yang dipengaruhi oleh perbedaan parameter geoteknik material pembentuk lereng. Simulasi dilakukan dengan geometri lereng tunggal dengan lebar yang sama. Struktur geologi diasumsikan tidak ada. Pengujian FK dilakukan dengan variabel parameter geoteknik material. Berdasarkan hasil nilai FK *single slope* (Tabel 5) dapat diketahui jenis material penyusun lereng yang paling berpotensi mempengaruhi ketidastabilan lereng *final*.



**Tabel 5.** Faktor Keamanan *Single Slope*

Lapisan	Jenis material	Densitas	Test lab		Statik	Pseudo Statik
		$\gamma_w$ kN/m <sup>2</sup>	C kPa	$\phi$ Deg		
OB A1	<i>Silty claystone</i>	20.87	36	29.41	2.378	2.185
<i>Int</i> A1 - A2	<i>Sandy siltyclaystone</i>	19.7	133.5	29.65	6.074	5.583
<i>Int</i> A2 - B	<i>Sandy siltyclaystone</i>	21.84	116.18	21.12	4.812	4.424
<i>Int</i> B - C	<i>Silty claystone</i>	21.87	127.92	23.68	5.319	4.890
<i>Seam</i> C	<i>Coal</i>	12.34	149	24.38	10.025	9.125
<i>Lower</i> C	<i>Sandy siltstone</i>	21.8	120	20.75	4.935	4.536

Antara parameter geoteknik material dan hasil FK, nilai densitas ( $\gamma_w$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ) material memiliki perbandingan yang bervariasi. Sedangkan parameter kohesi (c) material berbanding lurus dengan besar nilai FK. Nilai FK terbesar pada jenis material *coal seam* C dengan FK statik = 10,025 dengan kohesi 149 kPa. Nilai FK terkecil jenis material *silty claystone* OB A1 dengan FK statik = 2,378 dengan kohesi 36 kPa. Hasil pengujian faktor keamanan *single slope* menunjukkan besarnya faktor keamanan dengan parameter geoteknik material berbeda paling dipengaruhi oleh besar kohesi material.

Hasil simulasi ketiga *berm* pada lima *section* (*cross section*) semua relatif aman dengan nilai faktor keamanan (FK) *section* A1 adalah 1,15, 1,24, 1,37; *section* B1 (FK: 1,46, 1,53, 1,67); B2 (FK: 1,28, 1,38, 1,52); C1 (FK: 1,46, 1,56, 1,71); dan C2 (FK: 1,52, 1,65, 1,77). Atas dasar pertimbangan FK pseudo-statik yang akan diterapkan FK  $\geq 1,25$  [1] maka disarankan lebar *Berm* optimal yang diterapkan adalah 12 m karena untuk semua *section* relatif stabil. Strategi untuk meningkatkan kestabilan lereng *final slope* dengan segera melakukan *backfilling*. Rencana perusahaan akan menerapkan *berm* sebesar 15 m, dengan mengoptimalkan *overall slope pit limit* dengan menerapkan *berm* 12 m, maka akan mengurangi jumlah *overburden* yang akan digali (meningkatkan *stripping ratio*).

**KESIMPULAN**

Hasil simulasi ketiga *berm* pada lima *section* (*cross section*) semua dalam kondisi relatif aman dengan nilai faktor keamanan (FK) *section* A1 adalah 1,15, 1,24, 1,37; *section* B1 (FK: 1,46, 1,53, 1,67); B2 (FK: 1,28, 1,38, 1,52); C1 (FK: 1,46, 1,56, 1,71); dan C2 (FK: 1,52, 1,65, 1,77). Untuk optimalisasi *overall slope* disarankan menerapkan *berm* 12 m. Nilai faktor keamanan *overall slope* kondisi statik meningkat berbanding lurus dengan meningkatnya *berm*, sedangkan faktor keamanan kondisi pseudo-statik akan turun berkisar 15%, dipengaruhi oleh percepatan seismik. Faktor keamanan lereng *intermediate* menunjukkan adanya pengaruh FK terhadap geometri lereng dikarenakan susunan jenis material pembentuk lereng (stratigrafi), kondisi geoteknik dan struktur

geologi. Pengaruh percepatan seismik terhadap lereng *intermediate* akan mengurangi tingkat kestabilan lereng dengan persentase perubahan FK bervariasi. Faktor keamanan *single slope* menunjukkan besarnya faktor keamanan dengan parameter geoteknik material berbeda dipengaruhi oleh besar kohesi material. Untuk meminimalisir getaran tanah akibat peledakan *overburden* dapat dilakukan dengan mengatur sistem *delay* dan mengurangi penggunaan bahan peledak serta menerapkan metode *controlled blasting* pada *final slope*.

**DAFTAR PUSTAKA**

[1] Toha, M. T. (2019). *Analisis Kestabilan Lereng Pengaruh Struktur Geologi dan Getaran Tanah*. Palembang: Unsri Press.

[2] Ghadafi, M.A., Toha, M. T., Setiabudidaya, Dedi. (2017). Effect of Ground Vibration to Slope Stability, Case Study Landslide on The Mouth of Railway Tunnel, Gunung Gajah Village, Lahat District. *Sriwijaya Journal of Environemnt Vol. 2 No. 3, November 2017*.

[3] SNI 7571. (2010). *Baku Tingkat Getaran Peledakan Pada Kegiatan Tambang Terbuka Terhadap Bangunan*. Bandung: Badan Standarisasi Nasional.

[4] Shobari, A. F., dkk. (2019). Hubungan Nilai Koefisien Gempa Horizontal (Kh) Dengan Nilai Safety Factor (Fs) Daerah Cilengkrang, Jawa Barat, *Padjadjaran Geoscience Journal*, 3(4), 243,253.

[5] Rekzyanti, R., Balamba S., dan Manaroinsong L. (2016). Analisa Kestabilan Lereng Akibat Gempa (Studi Kasus : IAIN Manado), *TEKNO*, 14(66).

[6] Zhao, L., H., Cheng, X., Zhang, Y., Li, Liang., Li, D. (2016). Stability analysis of seismic slopes with cracks, *Computers and Geotechnics*, 77, 77-90.

[7] Noviansyah, M. R., Toha, M.T., Bochori. (2017). Rancangan Sistem Waktu Tunda Peledakan Nonel untuk Mengurangi Efek Getaran Tanah Terhadap Fasilitas Tambang. *Jurnal Pertambangan*, Vol. 1 No. 4.

[8] Bray, Jonathan. D. and Travarasrou, Thaleia. (2009). Pseudostatic Coefficient for Use in Simplified Seismic Slope Stability Evaluation. *Journal Of Geotechnical And GeoEnvironmental Eng*, 135, 1336-1340

[9] Guo, Deping., Chuan He., Xu, Chong, dan Hamada, Masanori. (2015). *Analysis of The Relations between Slope Failure Distribution and Seismic Ground Motion during The 2008 Wenchuan Earthquake*. Elsevier: Netherland.

[10] Putro, G. S., Wisaksono, B., Koesnaryo, S. (2017). The Wave Effect Analysis Caused By Blasting Toward Highwall Slope Stability At Coal Mining, Pit 3000 Block 05 Sb 1, PT Trubaindo Coal Mining, Kutai Western District, East



Kalimantan Province, *Promine Journal*, 5 (1), 35 – 40.

- [11] Sazzad, M., Mazumder, S., Moni, M. (2015). Seismic Stability Analysis of Homogeneous and Layered Soil Slopes by LEM, *International Journal of Computer Applications*, 117(22).
- [12] Zulfahmi., dkk. (2012). *Kajian Pengaruh Kerusakan Batuan Akibat Peledakan Terhadap Kelongsoran Lereng Pada Aktivitas Penambangan Batubara Di Indonesia*. Laporan Penelitian, Puslitbang Tekmira. Bandung: Kementrian ESDM Badan Litbang Energi Dan Sumberdaya Mineral.