Jurnal Inovasi Pertambangan dan Lingkungan Vol. 4, No. 1, Tahun 2024 : 23 – 34 P-ISSN 2830-5354
https://journal.uinjkt.ac.id/index.php/jipl E-ISSN 2797-7358

ANALISIS BALIK LONGSORAN PADA LERENG *HIGHWALL* PT FAJAR SAKTI PRIMA, KALIMANTAN TIMUR

BACK ANALYSIS OF LANDSLIDES ON HIGHWALL SLOPE AT PT FAJAR SAKTI PRIMA, EAST BORNEO

Genta Prasasti[1], Dewi Ayu Kusumaningsih[1], Nurmaya Arofah[1]

1. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, Indonesia

Email: gentaprasasti51@gmail.com

ABSTRAK

Kelongsoran pada lereng *highwall pit* FSP F34 Timur PT FSP menyebabkan akses jalan menjadi terganggu. Keadaan ini mengharuskan perusahaan untuk melakukan analisis balik terhadap longsoran. Tujuan penelitian yaitu untuk mendapatkan nilai parameter batuan pada saat longsor dan mendapatkan rekomendasi lereng yang aman dari hasil parameter analisis balik. Analisis balik dilakukan dengan mengurangi nilai parameter batuan kohesi (c) dan sudut geser dalam (Φ) hingga kondisi lereng labil (FK≤1). Hasil c dan Φ diasumsikan sebagai kondisi lereng saat longsor, kemudian dilakukan analisis kestabilan lereng untuk rekomendasi geometri lereng yang aman. Analisis kestabilan lereng menggunakan metode kesetimbangan batas. Hasil penelitian didapatkan nilai c *soil, claystone, coal, sandstone*, dan *siltstone* berturut-turut; 10,12; 87,45; 194,24; 143,72; dan 110,65kN/m^2. Nilai Φ; 24,96º; 19,68º; 20,11º; 33,97º; dan 28,15º. Rekomendasi geometri lereng dilakukan sebanyak 2 opsi. Opsi pertama didapatkan *single slope* tinggi 10m dan sudut 58º, *overall slope* tinggi 50m dan sudut 37º serta lebar *bench* 5m dengan nilai FK dinamis sebesar 1,16; PF 0,00%. Opsi kedua didapatkan nilai FK statis sebesar 1,42; PF 0,00%, dengan geometri *single slope* tinggi 10m dan sudut 50º, *overall slope* tinggi 50m dan sudut 33º serta lebar *bench* 5m. Keduanya dikategorikan sebagai nilai yang stabil menurut Kepmen 1827 tahun 2018.

Kata kunci: *Analisis Balik, Bishop Simplified, Faktor Keamanan, Geometri Lereng, Highwall*

DOI: 10.15408/jipl.v4i1.41786

ABSTRACT

Landslide on the slope of the highwall pit FSP F34 Timur PT FSP caused road access to be disrupted. This situation requires the company to conduct a back analysis of the landslide. The purpose of the study was to obtain the value of rock parameters at the time of the landslide and to obtain recommendations for safe slopes from the results of the back analysis parameters. Back analysis was carried out by reducing the value of the cohesion rock parameters (c) and the internal friction angle (Φ) to the unstable slope condition (FK≤1). The results of c and Φ were assumed to be the slope conditions during the landslide, then a slope stability analysis was carried out for recommendations for safe slope geometry. The slope stability analysis used the limit equilibrium method. The results of the study obtained the values of c soil, claystone, coal, sandstone, and siltstone respectively; 10.12; 87.45; 194.24; 143.72; and 110.65kN/m2. Φ values; 24.96º; 19.68º; 20.11º; 33.97º; and 28.15º. The slope geometry recommendation is done as many as 2 options. The first option is obtained a single slope height of 10m and an angle of 58º, an overall slope height of 50m and an angle of 37º and a bench width of 5m with a dynamic FK value of 1.16; PF 0.00%. The second option is obtained a static FK value of 1.42; PF 0.00%, with a single slope geometry height of 10m and an angle of 50º, an overall slope height of 50m and an angle of 33º and a bench width of 5m. Both are categorized as stable values according to Kepmen 1827 of 2018.

Keywords: *Back Analysis, Bishop Simplified, Safety Factor, Slope Geometry, Highwall*

© 2024 The Author(s). This is an open article under CC-BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

PENDAHULUAN

Lereng *highwall* merupakan suatu lereng produksi yang terdiri dari material insitu sesuai formasi batuan pada suatu lokasi penambangan. Terganggunya lereng *highwall* disebabkan geometri lereng yang tidak ideal, kekuatan material, juga adanya faktor indikasi gangguan dari luar seperti vibrasi dari alat berat dan lainnya. Hal ini membutuhkan kajian khusus analisis geoteknik untuk mendapatkan geometri lereng yang stabil. Dalam membuat rancangan konstruksi lereng *highwall*, diperlukan analisis geoteknik yang komprehensif sehingga meminimaliris potensi longsor. Pada keadaan tidak terganggu (alamiah), tanah atau batuan umumnya dalam keadaan stabil atau seimbang. Perubahan kestabilan lereng dapat terjadi akibat pengangkatan, penurunan, penggalian, penimbunan, erosi atau aktivitas yang dilakukan sekitar lereng tersebut. Terlebih ada faktor air permukaan serta getaran gempa bumi yang dapat mengganggu kestabilan lereng (Firsta, 2021).
Longsoran lereng *highwall* pada *pit* FSP F34 Timur menyebabkan akses jalan terganggu. Lereng tersebut sebelumnya didesain dengan nilai faktor keamanan yang stabil yaitu ≥ 1,3 menggunakan metode keruntuhan batuan *Mohr Coulomb* (PT Fajar Sakti Prima, 2022). Adanya kejadian longsor pada lereng *highwall* tersebut, membutuhkan pemeriksaan dan kajian analisis balik untuk mendapatkan nilai parameter sifat mekanik material yang baru (KEPMEN 1827, 2018). Pada analisis balik, sifat geomekanik yang dianalisa adalah *modulus young* (E), *rasio poisson* (υ), kohesi (C), sudut geser dalam (Φ), permeabilitas (μ), dan bahkan keadaan awal stress (Sakurai, 2017). Parameter kohesi (C) dan sudut geser dalam (Φ) yang didapatkan kemudian menjadi parameter *input* analisis kestabilan lereng untuk mendapatkan geometri lereng yang aman sebagai rekomendasi. Analisis kestabilan lereng yang dilakukan menggunakan metode kesetimbangan batas, sedangkan analisis gelincir menggunakan metode *Bishop Simplified* yang memperhitungkan komponen gaya-gaya (horizontal dan vertikal) dengan memperhatikan keseimbangan momen dari masing-masing potongan. Hal tersebut akan menjadikan kajian lebih akurat dalam kegiatan analisis evaluasi lereng saat longsor sehingga dapat merekomendasikan geometri lereng yang lebih ideal. Namun, pada dasarnya metode ini tidak memenuhi kesetimbangan gaya (Rajagukguk, 2014).

METODE

Penelitian menggunakan metode kuantitatif, dimana penelitian yang dilakukan dengan menganalisis pengolahan data berupa angka-angka untuk memecahkan masalah. Penerapan metode kuantitatif diterapkan untuk mengolah data parameter kuat geser material yaitu kohesi (C) dan sudut geser dalam (Φ), hingga mendapat nilai FK yang labil (FK $\leq$ 1) dalam analisis balik. Metode kestabilan lereng dilakukan dengan menggunakan metode kesetimbangan batas, sedangkan analisis gelincir yang dilakukan menggunakan metode *Bishop Simplified*. Penentuan Probabilitas Longsor (PF) menggunakan Monte Carlo dengan batasan analisis balik FK <1 dan batasan FK > 1 dan PF < 5% untuk rekomendasi geometri rencana.

Analisis Balik

Analisis Balik merupakan metode yang digunakan dalam geoteknik untuk membantu mencari estimasi nilai *properties* dari massa batuan atau tanah, dan juga analisis dengan memodelkan lereng pada kondisi longsor untuk memperoleh nilai parameter baru (Kabuya, et al, 2020). Tujuan dari permodelan analisis balik ini untuk memperoleh dan memastikan parameter input geoteknik yang dapat mewakili lereng bukaan tambang dengan memanfaatkan suatu kelongsoran, dengan memodelkan lereng pada kondisi longsor untuk memperoleh nilai parameter batuan (David, 2011).
Analisis balik dilakukan pada suatu longsoran untuk mengetahui parameter kekuatan batuan penyusun lereng, yaitu c dan Φ, saat lereng dalam keadaan setimbang (FK $\leq$ 1) atau sesaat sebelum longsor (Hoek and Bray, 1981). Analisis balik adalah analisa balik dengan memodelkan lereng pada kondisi longsor untuk memperoleh nilai parameter batuan. Metode analisis dilakukan berdasarkan parameter material yang diperoleh dari data *back analysis*. *Forward analysis* dilakukan guna untuk membuat modifikasi geometri lereng untuk meningkatkan kestabilan lereng dari data hasil analisis balik (Arief I. , 2016).
Pemodelan dan analisis balik ini bertujuan untuk menentukan dan memverifikasi parameter geoteknik input yang mewakili dari suatu lereng bukan tambang dengan cara memanfaatkan suatu kasus

kelongsoran yang terjadi pada lereng. Pada hal ini analisis balik juga bertujuan untuk mengetahui parameter nilai *properties* material dengan nilai FK < 1 (Hasibuan, 2020).

Metode *Bishop Simplified*

Metode *Bishop* sendiri memperhitungkan komponen gaya-gaya (horizontal dan vertikal) dengan memperhatikan keseimbangan momen dari masing-masing potongan, metode ini dapat digunakan untuk menganalisa tegangan efektif. Formula umum metode *Bishop* adalah sebagai berikut (Rajagukguk, 2014).

$$FK = \frac{\sum \left[c\, b_i + (W_i + u_i\, b_i) tan\, tan\, \Phi\right] \frac{1}{M_{i\,(\alpha)}}}{\sum (W\, Sin\, \alpha)_i} \quad (1)$$

Keterangan :

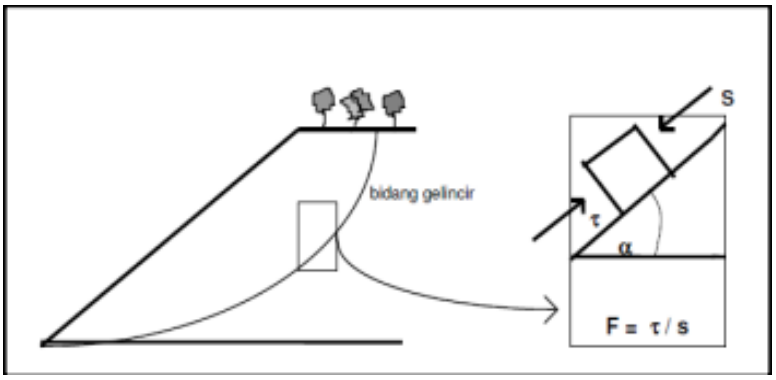
FK : Faktor Keamanan Lereng
c : Kohesi (KN/m^2)
b : Lebar segmen (m)
Φ : Sudut geser dalam (°)
W : Berat segmen (KN/m^3)
u : Tegangan air pori (KN/m^3)
μ : Tekanan pori (γair x h x L)
M : Tinggi muka air tanah (m)
α : Sudut yang terbentuk dari bidang gelincir dengan bidang horizontal (°)

Metode *bishop* ini merupakan salah satu metode pada perhitungan analisis kestabilan lereng menggunakan metode kesetimbangan batas. Metode kesetimbangan batas merupakan metode yang cukup populer dan praktis dalam analisis kestabilan, dengan kondisi kestabilan dinyatakan dalam indeks Faktor Keamanan (FK). FK menghitung kesetimbangan gaya atau kesetimbangan momen, atau keduanya tergantung dari metode perhitungan yang dipakai. Dalam perhitungan analisis kestabilan lereng dengan metode ini menggunakan kondisi statik yang mengabaikan adanya hubungan tegangan – regangan pada material lereng dan bidang gelincir yang secara kinematik dipandang memungkinkan bertindak sebagai bidang kelongsoran, akan mengikuti suatu bentuk geometri tertentu. Lereng batuan yang lemah umumnya longsoran terjadi karena kekuatan massa batuan tidak mampu untuk menahan gaya geser yang bekerja. Pada kasus ini, biasanya bidang runtuh berupa sebuah busur lingkaran atau berupa bidang lengkungan (Firsta, 2021).

Dalam analisis metode ini, konsep perhitungan lereng diperlukan dengan beberapa pertimbangan (Lalitya, 2017), yaitu:

a. Tekanan tanah pada sisi kemudi dan bagian yang melawan
b. Tekanan air akan mengembang pada dinding lereng
c. Beban eksternal yang diterapkan pada dinding lereng (beban konstruksi, bangunan, beban lalu lintas, dan lainnya)
d. Tekanan *seismic* yang diterapkan pada dinding (kondisi jangka panjang)

Konsep dasar metode ini cukup sederhana, dengan menghitung rasio perbandingan antara gaya dorong (*force equilibrium*) dan gaya tahan (*moment equilibrium*) berdasarkan asumsi bidang longsoran yang potensial dan membaginya menjadi beberapa irisan agar memudahkan perhitungan. *Moment* dan *Force* ini dapat dilihat pada Gambar 1. Rasio perbandingan antara *Moment* dan *Force* ini disebut dengan nilai Faktor Keamanan.



Gambar 1. Sketsa Lereng dan Gaya yang Bekerja (Zakaria, 2009)

Pada konsep dasar tersebut didapatkan persamaan untuk mendapatkan nilai faktor keamanan sebagai berikut (Rai, 2014):

$$FK = \frac{\iota}{s} = \frac{cL+\{(W+V)cos\alpha - \mu\}tantan\,\Phi}{(W+V)sinsin\,\alpha} \quad (2)$$

Keterangan:

FK : Faktor Keamanan Lereng
ι : Gaya Penahan lereng (*Moment*)
s : Gaya Penggerak lereng (*Force*)
c : Kohesi (KN/m^2)
L : Panjang segmen bidang gelincir (m)
W : Bobot massa diatas segmen (ton)
V : Beban luar
μ : Tekanan pori (γair x h x L)
h : Tinggi lereng (m)
α : Sudut yang dibentuk oleh bidang gelincir dengan bidang horizontal (°)
Φ : Sudut geser dalam (°)

Metode Monte Carlo

Analisis probabilistik pada dasarnya dilakukan untuk mengurangi tingkat ketidakpastian (*uncertainity*). Metode probabilistik salah satunya adalah metode Monte Carlo, metode ini merupakan metode termudah namun setara dengan model perhitungan probabilistik lainnya yang lebih rumit (Gibson, 2011). Perhitungan menggunakan metode Monte Carlo memiliki konsep acuan yaitu metode kesetimbangan batas, sehingga parameter uji merupakan variabel terkait dengan perbandingan gaya menahan (r) terhadap gaya mendorong (d) ketika berada pada keadaan potensial, yaitu massa diasumsikan berada dalam kondisi setimbang. Ada beberapa perumusan yang bisa dipakai mengenai kesetimbangan, tergantung dari bentuk longsoran yang terjadi.

Metode kesetimbangan batas menghasilkan nilai Faktor Keamanan (FK) yang berbeda, sehingga dalam 10.000 kali uji (N) akan didapatkan 10.000 nilai FK. Setiap nilai FK dibagi menjadi dua berdasarkan threshold FK>1, yaitu nilai yang tidak memenuhi asumsi tersebut (N-M) dan nilai yang memenuhi nilai tersebut (M). Nilai yang tidak memenuhi threshold tersebut yang menjadi nilai probabilitas longsoran. Secara matematis dapat dilihat pada persamaan 3.

$$PF = \frac{(N-M)}{N} \quad (3)$$

Dimana:

PF : nilai probabilitas longsoran (*probability of failure*)
(N-M) : jumlah nilai yang tidak memenuhi asumsi FK>1
M : jumlah nilai yang memenuhi asumsi FK>1
N : jumlah uji yang dilakukan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan pada area lereng *overall slope highwall* FSP F34 timur (Gambar 2), Lereng *highwall* mengalami kelongsoran (Gambar 3) dan berdampak pada keamanan sekitar daerah tersebut. Lereng tersebut longsor pada bulan Juni 2022.

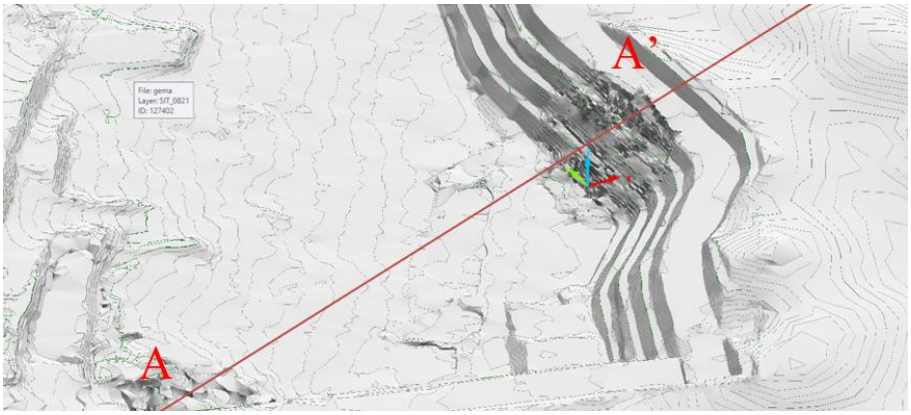


Gambar 2. Kondisi lereng sebelum longsor

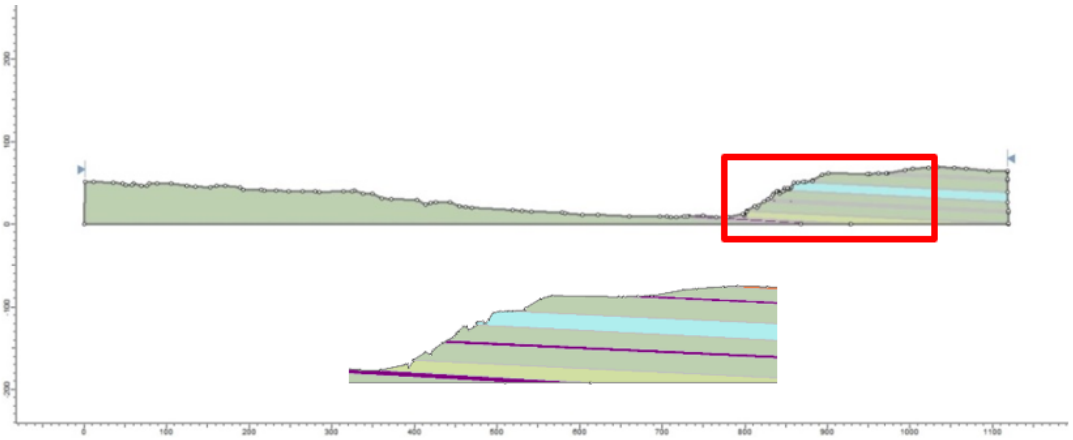


Gambar 3. Kondisi lereng setelah longsor

Material penyusun daerah penelitian terdiri dari *soil*, *claystone*, *coal*, *siltstone*, dan *sandstone*. Berdasarkan pengamatan di lapangan telah terjadi longsoran di salah satu *section* A – A’ (Gambar 4) serta penampangnya dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 4. *Section* A - A'



Gambar 5. Penampang Lereng *Section* A – A'

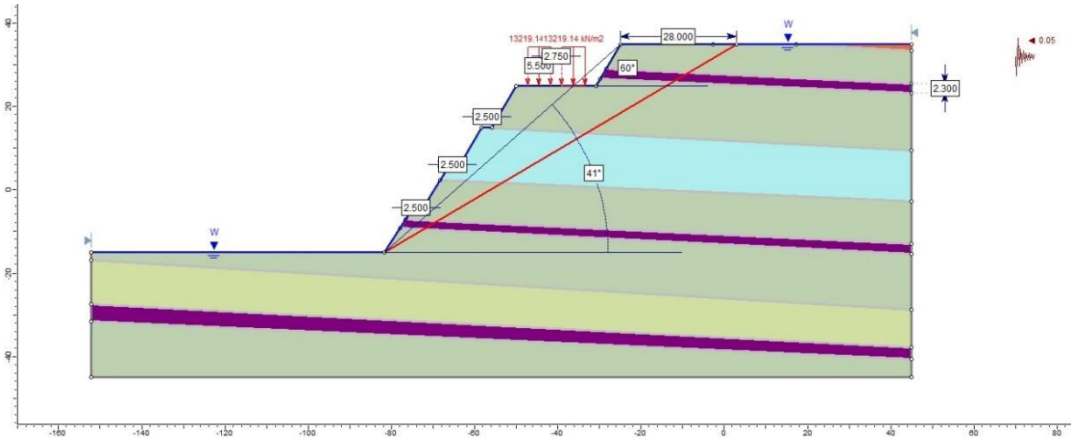
Gambar 5 merepresentasikan penampang dari arah vertikal topografi. Lereng tersebut dalam kondisi sudah mengalami keruntuhan. Penampang (*cross section*) ini dibuat untuk mengetahui geometri dan lapisan material penyusun lereng pada area tersebut secara aktual. Pada penampang tergambarkan material berupa *soil* berwarna coklat, *claystone* berwarna hijau tua, *coal* berwarna hitam, *sandstone* berwarna biru dan *silstone* berwarna hijau muda. Perwarnaan disesuaikan dengan *United States Geological Survey* (USGS, 2005). Material *properties* sebelum analisis balik dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Material *properties* sebelum analisis balik

No	Material	Kohesi (kN/m^2)	Sudut Geser Dalam (°)	Bobot isi Asli (kN/m^3)	Bobot isi Jenuh (kN/m^3)
1	*Soil*	22,12	36,96	20,18	25,38
2	*Claystone*	99,45	31,68	20,01	25,99
3	*Coal*	206,24	32,11	12,77	17,77
4	*Sandstone*	155,72	45,97	21,56	25,54
5	*Silstone*	122,65	40,15	20,91	26,62

Sumber: (PT Fajar Sakti Prima, 2022)

Geometri aktual PT FSP pada lereng *higwall* sebelum longsor yaitu lereng tunggal memiliki dimensi tinggi 10 m dan sudut 60º, sedangkan lereng keseluruhan memiliki dimensi tinggi 50 m, sudut 41º, lebar *bench* 2,5 m, dan *ramp* 19,25 m. Dimensi awal geometri lereng dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Dimensi awal geometri

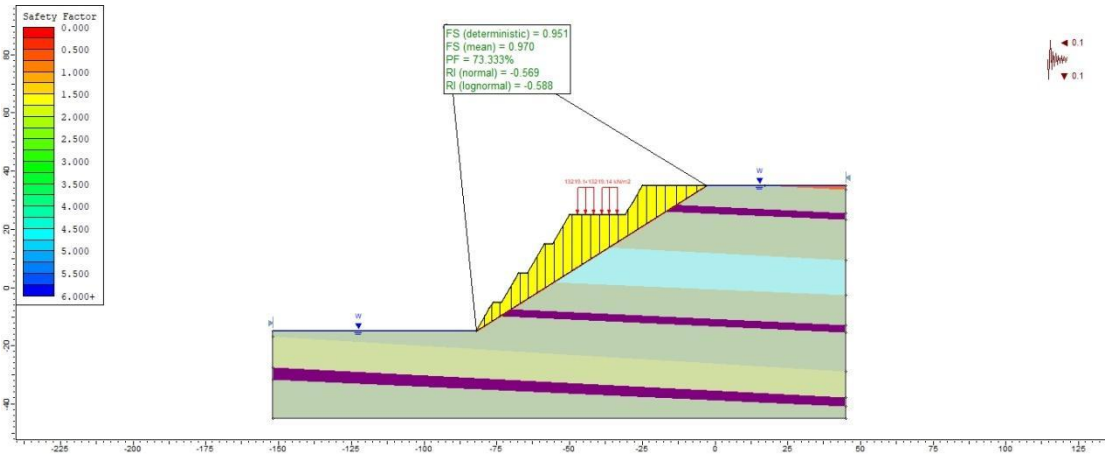
Pada pemodelan ini (Gambar 6) kemiringan lapisan sebesar 3 derajat. Dengan geometri tersebut didapatkan hasil FK sebesar 1,50 dan nilai PF 0,00%. Kasus ini tergolong dalam lereng yang stabil menurut Kepmen 1827 tahun 2018 karena FK ≥ 1,1 dan nilai PF ≤ 5%.

Analisis Balik Lereng

Pada analisis balik lereng, nilai material *properties* lapisan pada tabel 11 diturunkan dan dilakukan pengurangan nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (Φ) secara *trial and error* untuk mencapai faktor keamanan yang labil (FK<1). Dengan acuan tersebut dilakukan beberapa percobaan penurunan nilai parameter kohesi (c) dan sudut geser dalam (Φ) dan didapatkan penurunan sebesar – 12 atau persentase penurunan material sebesar 54,2% sebagai lereng yang labil (FK<1), seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil analisis balik *properties* batuan

Simulasi	Material Penyusun	Properties Massa Batuan		Persentase penurunan material (%)
		Nilai Kohesi (kN/m^2)	Sudut Geser Dalam (°)	
1	*Soil*	10,12	24,96	54,2%
2	*Claystone*	87,45	19,68	54,2%
3	*Coal*	194,24	20,11	54,2%
4	*Sandstone*	143,72	33,97	54,2%
5	*Silstone*	110,65	28,15	54,2%



Gambar 7. Interpretasi kohesi dan sudut geser dalam hasil analisis balik

Berdasarkan hasil analisis balik diatas, didapat nilai FK < 1 yaitu pada percobaan ke-5. Dengan pengurangan nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (Φ) sebesar 54,2% serta penambahan nilai beban gempa 0,1 g dimana FK yang didapat sebesar 0,97 dan nilai PF sebesar 73,33% (Gambar 7). Hasil ini dikategorikan sebagai lereng labil dengan potensi kelongsoran yang tinggi menurut KEPMEN 1827 tahun 2018, dikarenakan nilai FK < 1,1 dan nilai PF > 5%. Oleh karenanya parameter kohesi dan sudut geser pada kasus ini yang akan dipakai untuk kemudian dilakukan *reslope* dengan geometri yang baru sehingga mendapat nilai FK yang aman.

Rekomendasi Geometri Lereng

Analisis lereng tunggal (*single slope*) dilakukan untuk mencari geometri lereng yang aman dari analisis lereng sebelumnya yang mengalami kelongsoran. Geometri lereng tunggal hasil analisis lereng akan direkomendasikan sebagai bahan pertimbangan desain *overall slope*. Rekomendasi geometri lereng tunggal yang dilakukan dengan asumsi sebagai berikut:

1. Nilai material yang dimasukkan sesuai dengan parameter hasil analisis balik
2. Material diasumsikan homogen
3. Beban gempa yang dipakai sebesar 0,1 g
4. Berdasarkan desain lereng setiap jenjang pada material highwall untuk mendapatkan nilai FK yang aman pada zona tersebut dan dilakukan analisis dengan sudut 50º, 55º dan 58º dengan tinggi masing-masing 10 m.

5. Nilai FK yang digunakan berdasarkan Kepmen 1827, lereng tunggal dengan FK kriteria yang dapat diterima yaitu FK ≥ 1,1.

Analisis lereng tunggal (*single slope*) setiap material (homogen), dapat dilihat pada Tabel 3, Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 3. Hasil analisis *single slope* homogen 50º

No	Material	FK Deterministik	FK *mean*	PF (%)
1	*Claystone*	3,35	3,37	0,00
2	*Coal*	10,39	9,76	0,00
3	*Sandstone*	5,63	5,57	0,00
4	*Silstone*	4,19	4,22	0,00

Tabel 4. Hasil analisis *single slope* homogen 55º

No	Material	FK Deterministik	FK *mean*	PF (%)
1	*Claystone*	2,92	2,94	0,00
2	*Coal*	9,09	8,53	0,00
3	*Sandstone*	4,91	4,86	0,00
4	*Silstone*	3,65	3,68	0,00

Tabel 5. Hasil analisis *single slope* homogen 58º

No	Material	FK Deterministik	FK *mean*	PF (%)
1	*Claystone*	2,70	2,72	0,00
2	*Coal*	8,42	7,90	0,00
3	*Sandstone*	4,54	4,49	0,00
4	*Silstone*	3,38	3,40	0,00

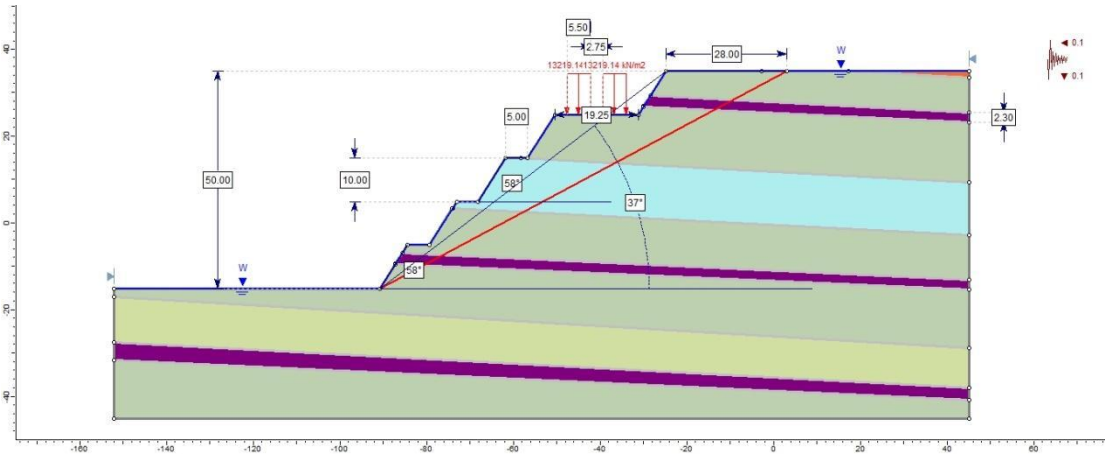
Berdasarkan hasil analisis lereng tunggal tersebut pada material *highwall* F34 timur FSP, didapat rekomendasi desain geometri lereng tunggal dengan ketinggian 10meter dan sudut kemiringan berturut-turut sebesar 50º, 55º, dan 58º. Setelah dilakukan analisis pada lereng tunggal dan mendapatkan nilai *single slope* yang aman maka selanjutnya dilakukan desain geometri lereng secara keseluruhan (*Overall Slope*) dengan memberikan tambahan *Intermediet ramp*. Rekomendasi geometri lereng keseluruhan yang dilakukan dengan asumsi sebagai berikut:

1. Geometri setiap jenjang yang dipakai mengikuti rekomendasi geometri *single slope* yang sudah dianalisis
2. *Overall slope* dimodelkan dengan 2 rekomendasi, yaitu dinamis dan statis
3. *Overall slope* dinamis dimodelkan dengan beban alat dan beban gempa sebagai faktor pengganggu dari luar, beban alat menggunakan alat terbesar yaitu HD Komatsu 785-7. Berdasarkan perhitungan *ground pressure* yang didapat sebesar 13219,14 kPa.
4. *Overall slope* statis dimodelkan dengan hanya beban gempa sebagai faktor pengganggu dari luar
5. *Inter-ramp* dimodelkan dengan geometri 2 jalur
6. Beban gempa yang dipakai sebesar 0,1 g
7. Nilai FK yang digunakan berdasarkan Kepmen 1827 tahun 2018. Lereng stabil bila nilai FK FK ≥ 1,1 dan nilai PF ≤ 5% untuk lereng dinamis, serta FK ≥ 1,3 dan nilai PF ≤ 5% untuk lereng statis.

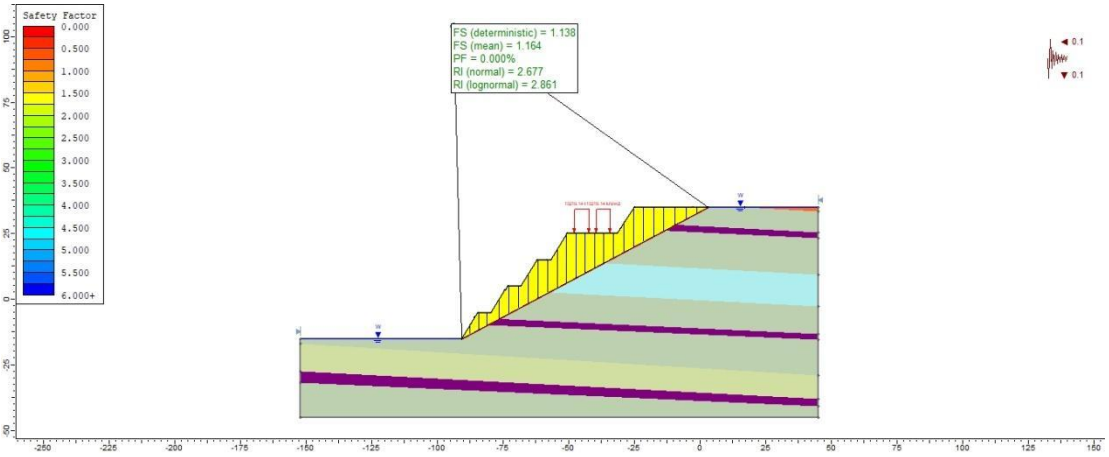
Hasil analisis rekomendasi lereng keseluruhan (*overall slope*) baik dinamis dan statis dapat dilihat pada **Tabel 6**, **Tabel 7, Gambar 8** sampai dengan **Gambar 11**.

Tabel 6. Hasil analisis rekomendasi *overall slope* dinamis

No	Tinggi *single slope* (m)	Sudut *single slope* (°)	Tinggi *overall slope* (m)	Sudut *overall slope* (°)	Lebar *bench* (m)	FK Deterministik	FK *Mean*	PF (%)
1	10	50	50	33	5	1,16	1,17	0,00
2	10	55	50	36	5	1,15	1,17	0,00
3	10	58	50	37	5	1,13	1,16	0,00



Gambar 8. Geometri rekomendasi *overall slope* dinamis

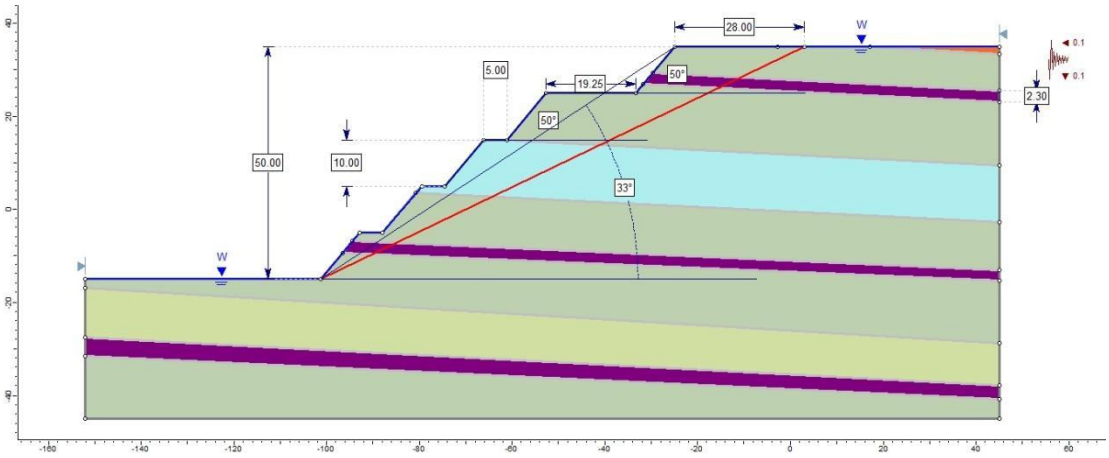


Gambar 9. Interpretasi rekomendasi *overall slope* dinamis

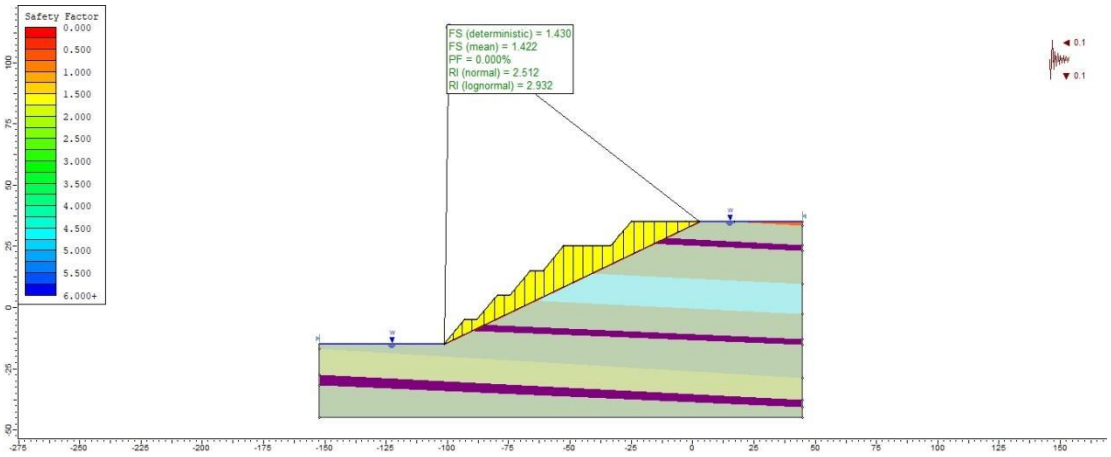
Berdasarkan hasil analisis *overall slope* tersebut pada material *highwall* F34 timur FSP, didapat rekomendasi desain geometri *overall slope* yang aman dengan ketinggian 50 meter dan sudut kemiringan keseluruhan sebesar 37 derajat dengan keadaan jenuh serta dibebankan alat sebesar 13219,14 kPa dan gempa 0,1 g. Dalam kasus ini dilakukan pelebaran area *bench* menjadi 5 meter dari yang semula 2,5 meter. Kemudian didapat nilai FK dinamis sebesar 1,16 dan nilai PF sebesar 0,00% (Gambar 10), hasil ini dikategorikan sebagai lereng yang stabil mengacu pada Kepmen 1827 tahun 2018, karena nilai FK ≥ 1,1 dan nilai PF ≤ 5%.

Tabel 7. Hasil analisis rekomendasi *overall slope* statis

No	Tinggi *Single Slope* (m)	Sudut *Single Slope* (°)	Tinggi *Overall Slope* (m)	Sudut *Overall Slope* (°)	Lebar *Bench* (m)	FK Deterministik	FK *Mean*	PF (%)
1	10	50	50	33	5	1,43	1,42	0,00
2	10	55	50	36	5	1,29	1,29	3,33
3	10	58	50	37	5	1,23	1,22	3,33



Gambar 10. Geometri rekomendasi *overall slope* statis



Gambar 11. Interpretasi rekomendasi *overall slope* statis

Berdasarkan hasil analisis *overall slope* tersebut pada material *highwall* F34 timur FSP, didapat rekomendasi desain geometri *overall slope* yang optimal dengan ketinggian 50 meter dan sudut kemiringan keseluruhan sebesar 36 derajat dengan keadaan jenuh serta dibebankan faktor gempa 0,1 g dan dilakukan pelebaran area *bench* menjadi 5 meter dari yang semula 2,5 meter. Kemudian didapat nilai FK statis sebesar 1,42 dan nilai PF sebesar 0,00% (Gambar 12), hasil ini dikategorikan sebagai lereng yang stabil mengacu pada Kepmen 1827 tahun 2018, karena nilai FK ≥ 1,3 dan nilai PF ≤ 5%.

PENUTUP

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan di PT Fajar Sakti Prima pada area *highwall* pit FSP F34 timur dapat diperoleh simpulan yaitu diketahui bahwa material penyusun lereng berturut-turut yaitu; *soil, clastone, coal, sandstone* dan *siltstone* dengan kemiringan perlapisan 3^{o} setiap materialnya. Parameter material yang didapat dari analisis balik yaitu nilai kohesi (c) material *soil, claystone, coal, sandstone,*dan *siltstone* berturut-turut ; 10,12; 87,45; 194,24; 143,72; dan 110,65 kN/m^2. Serta didapat nilai sudut geser dalam (Φ) material berturut-turut ; 24,96^{o}; 19,68^{o}; 20,11^{o}; 33,97^{o}; dan 28,15^{o}. Setelah dilakukan analisis pemodelan rekomendasi lereng, baik *single slope* maupun *overall slope* didapat rekomendasi *final* yang optimal untuk *overall slope* dinamis dan statis. Rekomendasi geometri lereng, yaitu ; tinggi *single slope* 10 m, sudut *single slope* 58^{o}, tinggi *overall slope* 50 m, dan sudut *overall slope* 37^{o} serta lebar *bench* 5 m. Dengan nilai FK dinamis sebesar 1,16; PF 0,00% untuk lereng dinamis. Sedangkan nilai FK statis sebesar 1,42 ; PF 0,00%, dengan geometri tinggi *single slope* 10 m, sudut *single slope* 50^{o}, tinggi *overall slope* 50 m, dan sudut *overall slope* 33^{o} serta lebar *bench* 5 m . Keduanya

dikategorikan sebagai nilai yang stabil menurut Kepmen 1827 tahun 2018, dikarenakan nilai FK dinamis ≥ 1,1 dan FK statis ≥ 1,3 serta nilai PF keduanya ≤ 5%.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT Fajar Sakti Prima atas segala kesempatan dan bantuannya sehingga penulis dapat meyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Arief, I. (2016). *Geoteknik tambang: Mewujudkan produksi tambang yang berkelanjutan dengan menjaga kestabilan lereng.* Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.

Arief, S. (2007). *Dasar-dasar analisis kestabilan lereng.* Sorowako: PT INCO.

Arif, I. I. (2000). *Buku ajar tambang terbuka.* Bandung: Institut Teknologi Bandung.

Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, *5*(1), 7–17.

Coulomb, C. (1776). Sur une application des règles maximis et minimis à quelques problème de statique, relatives à l'architecture. *Académie des Sciences de Paris, Mémoires de Mathématique et de Physique, 7*, 343–382.

David, F. (2011). *Manajemen strategis.* Jakarta: Salemba Empat.

Firmanda, G. (2018). *Back analysis: Overview berbagai macam metode back analysis.* Bandung. Firsta, R. J. (2021). *Kajian kestabilan lereng highwall dengan metode Bishop pada Pit Muara Tiga Besar Utara tambang batubara PT Bukit Asam Tbk. Sumatera Selatan* (Skripsi, Universitas Jambi).

Gibson, W. (2011). Probabilistic methods for slope analysis and design. *Australian Geomechanics*, *46*(3).

Hasibuan, S., & Siregar, T. (2020). Analisis balik kestabilan lereng bekas disposal area dengan menggunakan metode Bishop di tambang PT Nusa Alam Lestari di Desa Salak, Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto, Provinsi Sumatera Barat. *Jurnal Bina Tambang*, *5*(4), 46–56.

Herdiansyah, A. P. (2015). *Kajian teknik stabilitas lereng pada tambang batugamping.* Yogyakarta: CV Kusuma Arga Mukti.

Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock slope engineering* (3rd ed.). London: The Institution of Mining and Metallurgy.

Jaeger, J. C., & Cook, N. G. W. (1979). *Fundamentals of rock mechanics* (3rd ed.). London: Chapman and Hall.

Kabuya, J. M., Simon, R., Carvalho, J., & Haviland, D. (2020). Numerical back-analysis of highwall instability in an open pit: A case study. In *Slope Stability 2020*, Australian Centre for Geomechanics, 1–9. https://doi.org/10.36688/slope2020.001

Kementerian ESDM. (2018). *Pedoman pelaksanaan kaidah teknik pertambangan yang baik (KEPMEN 1827 K/30/MEM/2018).* Jakarta: Menteri ESDM.

Komatsu Ltd. (2016). *Handbook HD Komatsu 785-7.* Japan: Komatsu Ltd.

Labuz, J. F., & Zang, A. (2012). Mohr-Coulomb failure criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *45*(6), 975–979. https://doi.org/10.1007/s00603-012-0281-7

Lalitya, T. J. (2017). *Analisis kestabilan lereng tambang terbuka batubara dengan metode probabilitas pada highwall dan lowwall Pit Tania Panel 2, PT Kaltim Prima Coal, Kalimantan Timur* (Skripsi, Universitas Gadjah Mada).

PT Fajar Sakti Prima. (2022). *Dokumen studi kelayakan.* Kutai Kartanegara: Bayan Resources. Rai, M. A. (2014). *Mekanika batuan.* Bandung: Institut Teknologi Bandung.

Rajagukguk, O. T. (2014). Analisis kestabilan lereng metode Bishop. *Jurnal Sipil Statik Fakultas Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi*, *2*(3).

Sakurai, S. (2017). *Back analysis in rock engineering.* ISRM Book Series.

Shobari, A. I. (2019). Hubungan nilai koefisien gempa horizontal (Kh) dengan nilai safety factor (Fs) daerah Cilengkrang. *Geoscience Journal*, *3*(4), 243–253.

Standar Nasional Indonesia (SNI) 1726:2012. (2012). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung.* Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Terzaghi, K. (1987). Principle of soil mechanics: IV - Settlement and consolidation of clay. *Engineering News Record.*

Zakaria, Y. (2009). Analisis kestabilan lereng tanah. *Jurnal Kuliah Geologi Teknik.*