

Artikel Penelitian

Rancangan Ulang Lereng *Low Wall* Berdasarkan Analisis Balik Pada Pit 1 di PT Banjar Bumi Persada, Banjar, Kalimantan Selatan

Redesign Of The Low Wall Slope Based On Back Analysis At Pit 1, PT Banjar Bumi Persada, Banjar, South Kalimantan

Misba Gosin^{1*}, Bagus Wiyono¹, Barlian Dwinagara¹, Shenny Linggasari¹, Indun Titisariwati¹

¹Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta, Jl. SWK 104 (Lingkar Utara), Yogyakarta, 55283, Indonesia

*Penulis korespondensi

e-mail: gosinmisba@gmail.com

ABSTRAK

PT Banjar Bumi Persada (PT BBP) merupakan salah satu perusahaan tambang batubara yang terletak di Kabupaten Banjar, Provinsi Kalimantan Selatan. Metode penambangan yang diterapkan adalah *open pit* sehingga menghasilkan lereng penambangan berupa *low wall*, *high wall*, dan *side wall*. Berdasarkan historikal dan kondisi lapangan, kejadian longsor telah terjadi pada tiga titik di *low wall Pit 1*, sedangkan penelitian ini hanya membahas longsor di *low wall* sisi tengah. Longsor pada *low wall* sisi tengah terjadi pada lapisan *claystone* dan *sandstone* yang telah tersingkap setelah penambangan *coal seam* 40 dan 41. Kejadian longsor tersebut perlu dilakukan analisis balik untuk mengetahui perubahan *material properties* setelah longsor dan sebagai bahan evaluasi usulan pembentukan geometri lereng sesuai desain *final pit*. Metode analisis yang digunakan adalah *Finite Element Method* (FEM) dengan bantuan *software* Rocscience RS2 untuk analisis balik, serta *Limit Equilibrium Method* (LEM) dengan *software* Rocscience Slide2 untuk analisis kestabilan lereng. Pendekatan analisis balik menggunakan *direct approach* dengan kriteria *strain-based approach* serta divalidasi melalui *displacement* pada titik pemantauan lereng. Metode kestabilan lereng menggunakan Bishop Simplified, dan analisis probabilitas longsor dilakukan dengan metode Monte-Carlo menggunakan fungsi distribusi dari analisis MATLAB. Kriteria keruntuhan yang diterapkan adalah Mohr-Coulomb. Evaluasi lereng dilakukan pada kondisi jenuh berdasarkan rembesan pada elevasi 41 mdpl. Hasil analisis balik menunjukkan penurunan nilai kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ), yaitu *claystone* 48,5 kPa dan 6,5°, *sandstone* 30,3 kPa dan 4,8°, serta *coal* 100,86 kPa dan 10,33°. Regangan yang terjadi sebesar 1,65% dengan jenis longsor busur. Parameter material ini digunakan untuk merancang geometri lereng *low wall* dengan sudut kemiringan tunggal 30°, tinggi 8 m, dan lebar jenjang 8 m, sehingga lereng keseluruhan memiliki tinggi 104 m dengan sudut kemiringan 18° diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) 1,306 dan Probabilitas Longsor (PoF) 0%.

Kata Kunci: Analisis balik, geoteknik, *low wall*

ABSTRACT

PT Banjar Bumi Persada (PT BBP) is a coal mining company located in Banjar Regency, South Kalimantan Province. The mining method applied is *open pit*, resulting in mining slopes in the form of *low walls*, *high walls*, and *side walls*. Based on historical and field conditions, landslides have occurred at three points in the *low wall* of Pit 1, while this study only discusses landslides on the middle side of the *low wall*. Landslides on the middle side of the *low wall* occurred in the *claystone* and *sandstone* layers that had been exposed after mining *coal seams* 40 and 41. The landslide incident required back analysis to determine changes in material properties after the landslide and as evaluation material for the proposed formation of slope geometry according to the final pit design. The analysis method used is the *Finite Element Method* (FEM) with the help of Rocscience RS2 software for back analysis, and the *Limit Equilibrium Method* (LEM) with Rocscience Slide2 software for slope stability analysis. The back analysis approach uses a *direct approach* with *strain-based approach* criteria and is validated through *displacement* at the slope monitoring point. The slope stability method uses Bishop Simplified, and landslide probability analysis is carried out using the Monte-Carlo method using the distribution function of MATLAB analysis. The failure criterion applied is Mohr-Coulomb. Slope evaluation is carried out under saturated conditions based on seepage at an elevation of 41 masl. The results of the back analysis show a decrease in

cohesion value (c) and internal friction angle (ϕ), namely claystone 48.5 kPa and 6.5°, sandstone 30.3 kPa and 4.8°, and coal 100.86 kPa and 10.33°. The strain that occurs is 1.65% with the type of bow landslide. These material parameters are used to design the geometry of the low wall slope with a single slope angle of 30°, a height of 8 m, and a step width of 8 m, so that the overall slope has a height of 104 m with a slope angle of 18°, a Safety Factor (FK) value of 1.306 and a Landslide Probability (PoF) of 0%.

Keywords: Back analysis, geotechnical, low wall

I. PENDAHULUAN

Latar Belakang

PT Banjar Bumi Persada (PT BBP) merupakan perusahaan pertambangan batubara yang terletak di Desa Bawahan Selan, Kecamatan Mataraman, Kabupaten Banjar, Provinsi Kalimantan Selatan. PT BBP memiliki luas wilayah izin usaha pertambangan (IUP) seluas 1.132 Ha dengan Nomor 503/11.55 24/DPMPTSP/VIII/2020. PT BBP menerapkan metode sistem tambang terbuka dengan metode *Open Pit*. Penerapan metode tersebut menghasilkan jenis lereng penambangan yaitu *low wall*, *high wall* dan *side wall*.

Rancangan geometri lereng tunggal berdasarkan desain *final pit* memiliki tinggi 8 m, lebar 6 m dengan sudut lereng tunggal 50° untuk lereng *low wall* Pit 1. Rancangan *low wall* dengan kajian sebelumnya menunjukkan dalam kondisi stabil, Namun keadaan aktual di lapangan telah terjadi longsor pada *low wall* tengah dengan material *claystone* dan *sandstone* yang telah tersingkap setelah penambangan *coal seam* 40 dan 41. Oleh sebab itu diperlukan analisis balik dan evaluasi kestabilan lereng sehingga mendapatkan *material properties* baru pada batuan yang mengalami deformasi. Hasil analisis balik digunakan sebagai parameter masukan dalam pembuatan rancangan geometri lereng yang baru.

Dengan adanya analisis balik dan evaluasi kestabilan lereng diharapkan akan diperoleh geometri lereng yang aman berdasarkan nilai faktor keamanan (FK) dan probabilitas longsor (PoF) sesuai dengan Keputusan Menteri ESDM No.1827 K/30/MEM Tahun 2018.

Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Rancangan geometri lereng awal dalam kondisi stabil namun pada kondisi aktual mengalami longsor di *low wall* tengah *Pit 1* pada elevasi 29 mdpl sampai 6 mdpl.
2. Geometri lereng *low wall* pada kondisi aktual setelah terjadi longsor sudah tidak sesuai dengan desain *final pit*.

Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan analisis balik untuk mendapatkan nilai kekuatan batuan berupa kohesi dan sudut gesek dalam pada lereng *low wall* tengah yang mengalami longsor.

2. Melakukan penyesuaian geometri lereng setelah longsor yang dapat digunakan sebagai desain *final pit* dengan mempertimbangkan Faktor Keamanan (FK) statis dan *Probability Of Failure* (PoF).

Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Analisis stabilitas lereng dilakukan dengan kondisi statis karena pemberaian *overburden* tidak menggunakan peledakan sehingga lereng tidak dipengaruhi oleh beban dinamis dan koefisien gempa diabaikan karena daerah lokasi penelitian memiliki nilai koefisien <0,05.
2. Kriteria keruntuhan menggunakan kriteria Mohr-Coloumb karena menggunakan parameter masukan berupa nilai kohesi dan sudut gesek dalam dari hasil uji geser langsung untuk analisis kestabilan lereng.
3. Komputasi untuk mendapatkan probabilitas longsor menggunakan metode sampling Monte-Carlo dengan bantuan *software* Slide2 karena ketidakmampuan spesifikasi laptop jika komputasi dilakukan dengan *software* RS2.
4. Kondisi muka air tanah (MAT) diasumsikan jenuh karena tidak ada pengukuran MAT aktual pada lokasi penelitian serta berdasarkan pengamatan di lapangan terdapat rembesan pada elevasi 41 mdpl.

II. METODE

Kegiatan yang dilakukan pada penelitian ini yaitu:

1. Studi Literatur

Mempelajari tentang teori-teori yang berhubungan terkait dengan topik penelitian yang berupa buku, literatur, laporan penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya. Hal tersebut dapat digunakan sebagai dasar penelitian.

2. Observasi Lapangan

Melakukan pengamatan secara langsung terhadap lereng penambangan untuk melihat keadaan aktual di lapangan dan menganalisis masalah yang akan dibahas.

3. Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan setelah observasi lapangan. Data yang diambil dalam penelitian ini yaitu: Data primer adalah data yang diperoleh berdasarkan pengamatan dan pengambilan langsung di lapangan. Data primer yang didapatkan adalah geometri lereng aktual; Data sekunder adalah data

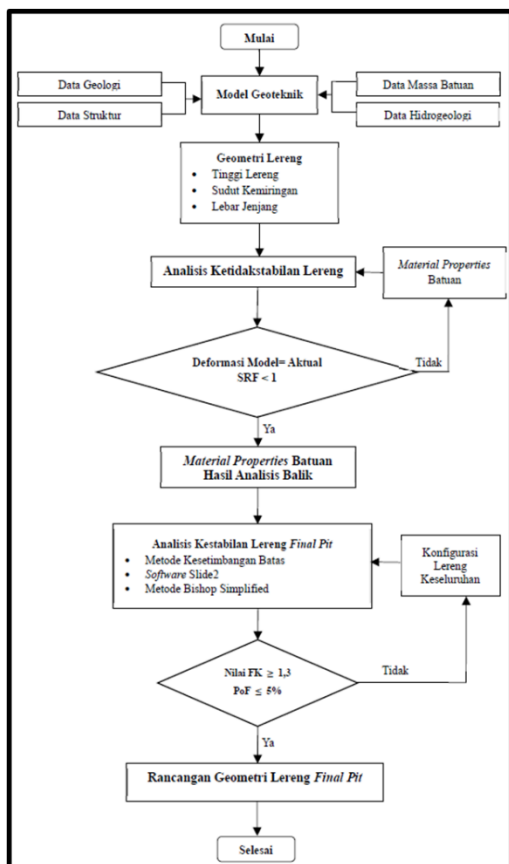
4. Pengolahan dan Analisis Data

Proses pengolahan dan analisis data dilakukan dengan analisis yang terdiri dari:

- Analisis statistik:** Data *material properties* dilakukan analisis statistik menggunakan bantuan *software* MATLAB dengan distribusi normal, lognormal, gamma dan eksponensial untuk mendapatkan nilai *mean*, *standar deviation*, *relative minimum* dan *maksimum*. Jumlah data yang dianalisis pada sampel *coal* sejumlah 11, *siltstone* 16 sampel, *claystone* 23 sampel dan *sandstone* 15 sampel.
- Analisis Balik:** Analisis balik dilakukan menggunakan bantuan *software Finite Element Method* (FEM) RS2 dengan metode *direct approach* dan penentuan *initial stress* menggunakan metode *gravity*.
- Analisis Kestabilan Lereng:** analisis dilakukan menggunakan bantuan *software Limit Equilibrium Method* (LEM) SLIDE2 dengan jenis bidang gelincir *circular* dengan metode Bishop Simplified untuk mendapatkan nilai FK dan PoF.

5. Kesimpulan

Kesimpulan diperoleh setelah dilakukan korelasi antara hasil pengolahan data yang telah dilakukan dengan permasalahan yang diteliti. Kesimpulan ini merupakan suatu hasil akhir dari semua aspek yang telah dibahas. Tahapan penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 1.

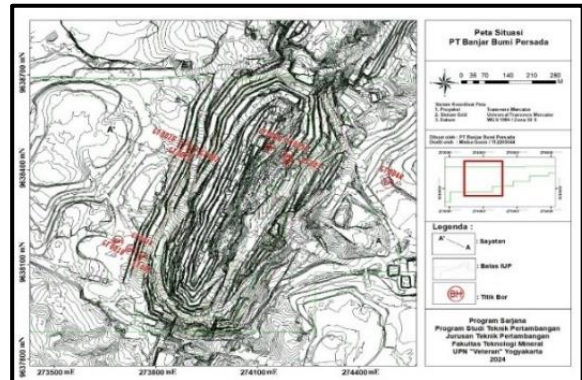


Gambar 1. Tahapan Penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada *Pit 1* (Gambar 2) pada lereng aktual berdasarkan peta situasi Bulan Februari. Secara astronomis terletak pada 273500 mT – 274400 mT dan 9637800 mU – 9638700 mU. Lereng yang akan dilakukan analisis adalah lereng *low wall* sisi tengah yang telah mengalami longsor pada elevasi 29 mdpl sampai dengan elevasi 6 mdpl yang terjadi pada material *claystone* dan *sandstone*.



Gambar 2. Peta lokasi penelitian

Lubang Bor

Pada lokasi penelitian terdapat 10 lubang bor geoteknik yang dilakukan pada kegiatan eksplorasi dan koordinat pembuatan lubang bor geoteknik dapat dilihat pada Tabel 1. Hasil dari lubang bor geoteknik kemudian dibentuk suatu model geologi untuk mengetahui kondisi dibawah permukaan *Pit 1* yang dapat dibuat korelasi dari data *core logs* batuan dan data *reconcile* antar titik bor. Model ini akan dijadikan sebagai dasar untuk analisis lereng. Secara umum, dari hasil 10 pengeboran geoteknik di lokasi penelitian lapisan yang membentuk lereng terdiri dari *coaly shale*, *shaly coal*, *sandstone*, *siltstone*, *claystone*, *carbonaceous claystone*, *carbonaceous siltstone* dan *coal*.

Tabel 1. Koordinat Lubang Bor Geoteknik

ID	Easting (mE)	Northing (mN)	Elevasi (m)	Depth (m)
GT-001	273757,53	9638123,41	42,305	75,50
GT-001A	273726,54	9638146,55	41,442	75,00
GT-001B	273687,09	9638174,06	40,243	75,00
GT-002	273911,60	9638461,12	37,187	75,00
GT-002A	273882,61	9638480,78	40,458	75,80
GT-002B	273851,61	9638501,20	39,299	76,15
GT-003	274190,91	9638425,43	18,790	80,37
GT-003A	274162,87	9638444,18	22,663	75,80
GT-003B	274136,57	9638469,03	24,585	81,05
GT-004R	274485,36	9638358,45	26,457	40,54

Penampang Geologi

Pada *Pit 1* terdapat 10 lubang bor geoteknik dengan kedalaman bervariasi antara 40,54-81,05 m. Suatu pemodelan geologi dibutuhkan untuk dasar analisa stabilitas lereng yang digunakan untuk mengetahui kondisi di bawah permukaan. Data log bor yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari letak titik bor terdekat dengan *section*. Litologi pada *Pit 1* terbagi menjadi 4 lapisan utama yaitu lapisan batulempung (*claystone*), batupasir (*sandstone*), batulanau (*siltstone*) dan batubara (*coal*). Interpolasi perlapisan dan ketebalan litologi pada *section A-A'* didapatkan dari pengolahan lubang bor geoteknik dengan kode GT 002, GT 002A dan GT 002B dengan data pilot BB 77 dan BB 75 dengan variasi kedalaman coring 75 -76,15 m. Material penyusun lereng *low wall* terdiri dari *coal seam* 39 L, 39 U, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47 L, 47 U, 48, 49 dan *interburden* berupa *claystone*, *sandstone* dan *siltstone* dengan ketebalan bervariasi antara 0,5 –20 m. Berdasarkan data rata-rata kemiringan litologi di *low wall*, dip di *Pit 1* adalah 50°. Detail dari hasil penggambaran stratigrafi pada *section A-A'* dapat dilihat pada Gambar 3. Dominasi material yang terdapat pada lereng *low wall* yaitu *claystone*.

Tabel 3. Data Uji Kuat Tekan Batuan

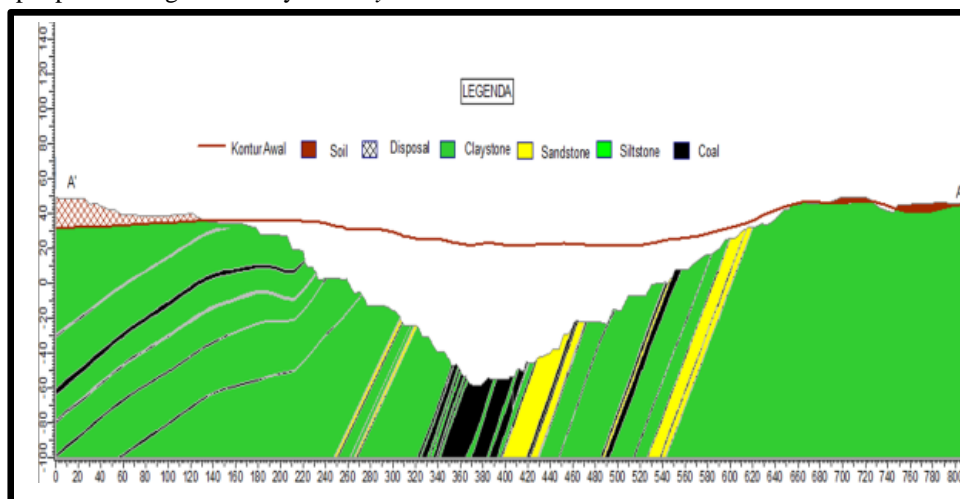
Material	Modulus Young (MPa)	Poisson Ratio	UCS (MPa)	
			Range	Mean
Coal	984,104	0,3	0,352 - 3,380	2,331
Claystone	610,652	0,3	0,066 - 2,013	0,911
Siltstone	1660,957	0,3	0,271 - 1,851	0,942
Sandstone	1203,014	0,3	0,442 - 3,096	1,134

Tabel 4. Data Kohesi dan Sudut Gesek Dalam

Material	Kohesi (kPa)		Sudut Gesek Dalam (°)	
	Range	Mean	Range	Mean
Coal	78,9 - 227	160,86	12,39 - 27,43	20,32
Claystone	137 - 210	165,94	11,62 - 23,50	20,02
Siltstone	70,3 - 175	136,94	12,30 - 22,89	18,79
Sandstone	76,5 - 163	108,53	11,27 - 21,70	13,77

Tabel 5. Material Properties Soil dan Disposal

Material	Kohesi (kPa)	Sudut Gesek Dalam (°)	Bobot Isi Asli (kN/m ³)
Soil	50	37	16
Disposal	73,91	10,83	15



Gambar 3. Model penampang geologi *section A-A'*

Pengujian Sifat Fisik dan Mekanik

Pengujian sifat fisik dan mekanik batuan dilakukan oleh PT Quantus Consultants Indonesia pada tahun 2018. Pengujian tersebut meliputi pengujian sifat fisik dan sifat mekanik berupa pengujian kuat tekan uniaksial (UCS) dan pengujian kuat geser langsung. Pengujian yang dilakukan menghasilkan data berupa nilai bobot isi asli (γ_n), bobot isi jenuh (γ_s), modulus young (E), poisson's ratio (ν), kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ). Hasil pengujian tersebut dapat dilihat pada Tabel 2 hingga Tabel 5.

Tabel 2. Data Bobot Isi Asli dan Jenuh Batuan

Material	γ_n (kN/m ³)		γ_s (kN/m ³)	
	Range	Mean	Range	Mean
Coal	11,9 - 18,6	15,9	12,8 - 20,4	17,3
Claystone	17,6 - 24,0	19,3	18,4 - 25	20,2
Siltstone	16,6 - 24,4	19,6	17,7 - 24,9	20,5
Sandstone	17,9 - 23,9	20,0	19,5 - 26,4	21,2

Hasil pengujian laboratorium pada Tabel 2-4 akan dijadikan sebagai parameter untuk uji statistik yang hasilnya dijadikan sebagai parameter statistik untuk data masukan *material properties* batuan pada model.

Pengolahan Statistik

Banyaknya variasi data yang ada maka perlu dilakukan pengolahan untuk mengetahui jenis distribusi penyebaran data yang terbaik untuk dijadikan sebagai input parameter dalam pengujian faktor keamanan dan probabilitas longsor. Pengolahan statistika dilakukan untuk mengetahui nilai rata-rata dari data material properties batuan, nilai standar deviasi untuk menentukan tingkat penyebaran data dan nilai maksimum serta minimum data yang merupakan jarak dari nilai rata-rata ke nilai maksimum dan minimum. Jenis distribusi yang digunakan pada pengolahan data yaitu distribusi normal, lognormal, gamma dan

exponensial. Jumlah data yang dianalisis pada sampel *coal* sejumlah 11, *siltstone* 16 sampel, *claystone* 23 sampel dan *sandstone* 15 sampel. *Goodnes of Fit Test*

dilakukan dengan bantuan *software* MATLAB. Hasil pengolahan data statistik dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 6. Hasil Pengolahan Statistik

Material	Parameter	Distribusi	Mean	Standar Deviasi	Rel. Min	Rel. Max
<i>Coal</i>	Kohesi (c)	Gamma	160,86	56,01	81,96	66,14
	Sudut Gesek Dalam (ϕ)	Gamma	20,33	5,98	7,94	7,1
	Bobot Isi Asli (γ_n)	Normal	15,9	2,05	4	2,7
	Bobot Isi Jenuh (γ_s)	Normal	17,32	2,07	4,52	3,07
<i>Claystone</i>	Kohesi (c)	Lognormal	166,06	22,93	29,06	43,94
	Sudut Gesek Dalam (ϕ)	Normal	20,03	4,27	8,41	3,47
	Bobot Isi Asli (γ_n)	Lognormal	19,32	1,24	1,72	4,86
	Bobot Isi Jenuh (γ_s)	Lognormal	20,23	1,19	1,83	4,76
<i>Sandstone</i>	Kohesi (c)	Normal	109,2	32,73	32,7	53,8
	Sudut Gesek Dalam (ϕ)	Lognormal	13,8	3,48	2,53	7,9
	Bobot Isi Asli (γ_n)	Lognormal	20,02	1,41	2,12	3,88
	Bobot Isi Jenuh (γ_s)	Lognormal	21,16	1,52	1,66	5,23
<i>Siltstone</i>	Kohesi (c)	Normal	136,94	42,15	66,64	38,06
	Sudut Gesek Dalam (ϕ)	Normal	18,79	4,88	6,49	4,1
	Bobot Isi Asli (γ_n)	Lognormal	19,56	1,92	2,96	4,84
	Bobot Isi Jenuh (γ_s)	Lognormal	20,47	1,80	2,77	4,42

Lereng Aktual

Analisis kestabilan lereng aktual memerlukan data geometri serta material batuan penyusunnya. Geometri serta material penyusun lereng aktual didapatkan dari sayatan A-A' peta situasi *Pit 1* sebelum longsor. Tinggi lereng keseluruhan 100 m dengan *overall slope* 20°. Kondisi perlapisan batuan didapatkan sesuai data deskripsi pengeboran. Geometri lereng sebelum longsor dapat dilihat pada Tabel 6.

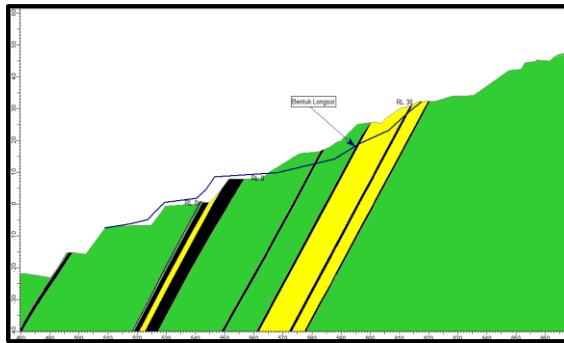
Tabel 7. Geometri Lereng

Jenang	Elevasi (mdpl)	Tinggi (m)	Lebar (m)	Sudut (°)
1	43 - 34	9	7	33
2	34 - 32	2	6	16
3	32 - 25	7	8	28
4	25 - 20	5	1,5	43
5	20 - 16	4	6	26
6	16 - 8	8	11	31
7	8 - 0	8	15	48
8	0 - -7	6	15	51
9	-7 - -15	9	6,5	51
10	-15 - -23	8	25	54
12	-22 - -29	8	4,5	51
13	-29 - -37	8	5,5	62
14	-37 - -41	4	6	57
15	-41 - -42	1	3,5	42
16	-42 - -45	3	7	36
17	-45 - -50	5,5	6	66
18	-50 - -53	4	5	59
19	-53 - -55	1,5	16	71
20	-54 - -58	4	10,5	36
Tinggi Lereng Keseluruhan 100 m		Overall Slope 20°		

Lereng yang longsor akan mengalami deformasi material dan terjadi perubahan terhadap geometri lereng awal sebelum longsor. Material yang mengalami longsor pada *low wall* tengah *Pit 1* merupakan material batulempung dan batupasir. Longsor terjadi pada elevasi 29 mdpl sampai elevasi 6 mdpl dengan ketinggian longsor 23 m. Kondisi lereng yang mengalami longsor dapat dilihat pada Gambar 4 dan penampang lereng setelah longsor dapat dilihat pada Gambar 5.



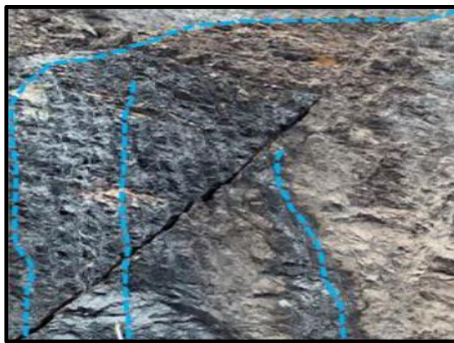
Gambar 4. Kondisi Lereng Longsor



Gambar 5. Penampang Lereng Longsor

Kondisi Muka Air Tanah

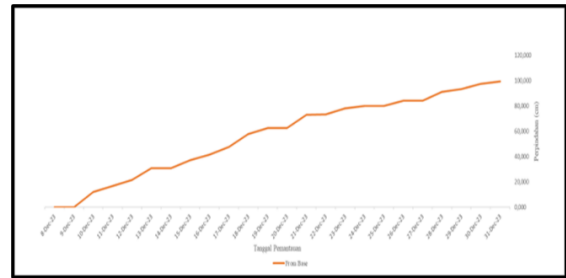
Pada lokasi penelitian tidak terdapat titik pengukuran muka air tanah (MAT) sehingga kondisi MAT pada lereng tidak dapat diketahui secara aktual. Namun pada perhitungan Faktor Keamanan digunakan asumsi kondisi MAT Jenuh dengan asumsi berdasarkan data curah hujan pada bulan Desember 2023, curah hujan yang terjadi yaitu sebesar 343,86 mm/bulan dengan kategori hujan tinggi. Selain itu juga didasarkan pada pengamatan di lapangan ditemukan rembesan pada elevasi 41 mdpl Gambar 6 menunjukkan rembesan dengan kondisi mengalir.



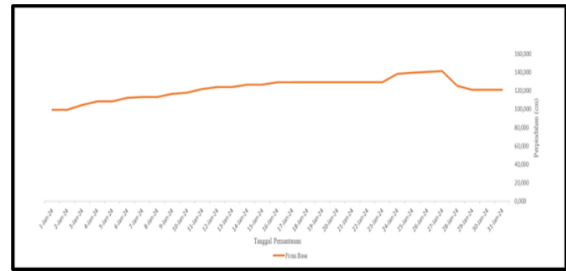
Gambar 6. Rembesan pada RL 41

Monitoring Lereng

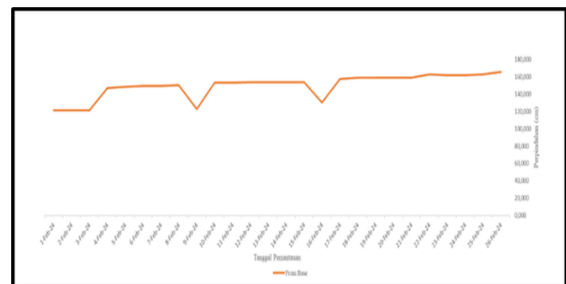
Pemantauan lereng dilakukan dengan menggunakan data pergerakan lereng yang diperoleh dari data pemantauan patok monitoring M2 yang terletak pada elevasi 29 mdpl yang telah terpasang di muka lereng lokasi yang mengalami longsor. Pemilihan kondisi perpindahan didasarkan pada saat lereng mengalami longsor yaitu pada bulan Desember 2023 sampai dilakukan penelitian pada bulan Februari 2024. Pada bulan Desember 2023 terjadi perpindahan sebesar 99,39 cm dengan rata-rata perpindahan per hari yaitu 4,14 cm, Pada bulan Januari 2024 terjadi perpindahan sebesar 21,67 cm dengan rata-rata perpindahan per hari yaitu 0,69 cm. Pada bulan Februari 2024 terjadi perpindahan sebesar 44,6 cm dengan rata-rata perpindahan per hari yaitu 1,61 cm. Perpindahan total yang didapatkan dari pemantauan lereng dari bulan Desember 2023 – Februari 2024 yaitu sebesar 165,6 cm. Grafik pemantauan lereng dapat dilihat pada Gambar 7-9.



Gambar 7. Grafik monitoring bulan Desember



Gambar 8. Grafik monitoring bulan Januari



Gambar 9. Grafik monitoring bulan Februari

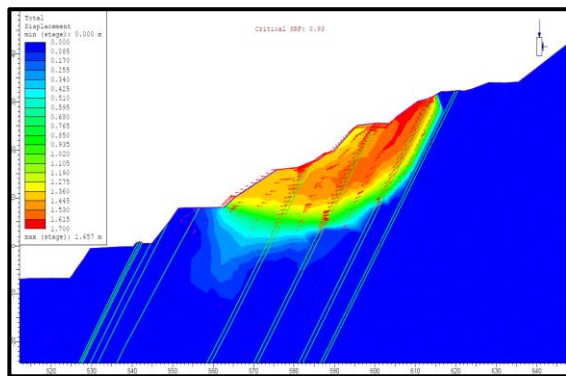
Analisis Balik

Kejadian longsor pada *low wall* sisi tengah *Pit 1* terjadi pada material *claystone* dan *sandstone* yang terletak pada *floor coal seam* 39 dan 40. Penurunan *material properties* pada analisis balik ini dilakukan dengan melakukan simulasi pada nilai awal kohesi (c_1), sudut gesek dalam (ϕ_1) dan modulus young (E_1) sehingga dihasilkan nilai *material properties* pada kejadian longsor berupa kohesi (c_2), sudut gesek dalam (ϕ_2) dan modulus young (E_2) dan hasil penurunan material divalidasi berdasarkan data monitoring lereng patok M2 dengan *total displacement* yang terjadi pada simulasi model. Litologi yang dilakukan simulasi adalah litologi yang mengalami deformasi serta berpotensi terjadi pelapukan akibat dari faktor eksternal sehingga menimbulkan kejadian longsor yaitu litologi *claystone*, *sandstone* dan *coal* (Tabel 7). Rasio tegangan yang digunakan dalam analisis FEM menggunakan material *claystone* dan berdasarkan hasil perhitungan rasio tegangan (K) di *low wall* tengah dengan tinggi lereng yang mengalami longsor 23 m menghasilkan nilai K sebesar 0,335. Analisis balik dilakukan pada kondisi MAT jenuh berdasarkan kondisi saat mengalami longsor dan menggunakan beban statis karena pada lokasi penelitian tidak terlalu terpengaruh oleh beban gempa ($<0,05$) dan tidak ada aktivitas peledakan sehingga beban dinamis diabaikan.

Pada analisis balik simulasi dilakukan hingga model mengalami *displacement* mendekati dengan *displacement* pada data monitoring yaitu sebesar 165,6 cm. Hasil simulasi analisis balik dengan beban statis didapatkan nilai SRF 0,93 (Gambar 10) dengan *displacement* horizontal, vertikal dan total secara beruntun adalah 13 cm; 22 cm; dan 165,7 cm. Regangan yang terjadi saat simulasi statis sebesar 1,65%.

Tabel 8. Hasil Komputasi dan Simulasi Longsor

Litologi	E_1 (MPa)	c_1 (kPa)	ϕ_1 (°)	E_2 (kPa)	c_2 (kPa)	ϕ_2 (°)
Claystone	610,652	166,0	20,03	9.790	48,50	6,5
Sandstone	1.203,01	109,2	13,80	11.49	30,30	4,8
Coal	984,104	160,8	20,32	12.00	100,8	10,6
Beban Statis	Total Perpindahan (cm)				165,7	
	SRF				0,93	



Gambar 10. Simulasi analisis balik

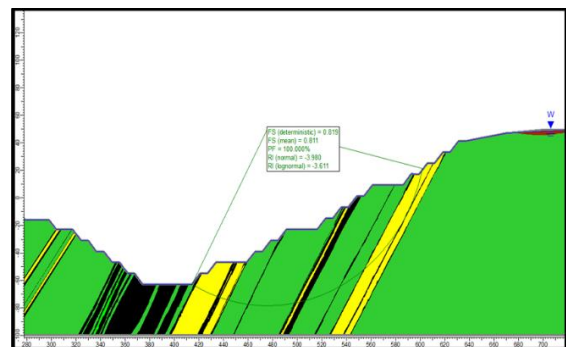
Setelah dilakukan analisis balik (Gambar 10) diperoleh *material properties* hasil analisis balik pada *low wall* tengah dengan parameter baru nilai kohesi (c), sudut gesek dalam (ϕ) dan modulus young (E) pada material *claystone* dan *sandstone* dan *coal* yang mengalami longsor (Tabel 7) dan didapatkan nilai SRF 0,93. Hasil nilai penurunan material pada analisis balik akan diterapkan sebagai *input material properties* baru pada batuan yang mengalami deformasi dan dilakukan analisis kestabilan lereng.

Komputasi Geometri Lereng Awal dan Redesign

Kejadian longsor yang terjadi pada lereng *low wall* mengakibatkan berubahnya geometri lereng. Oleh sebab itu perlu dilakukan analisis kestabilan pada lereng *low wall* setelah mengalami longsor agar dapat diketahui tingkat kestabilan lereng tersebut masuk kedalam kategori stabil atau tidak stabil. Data masukan *material properties* yang digunakan adalah hasil dari analisis balik (Tabel 7). Kriteria dapat diterima berdasarkan Lampiran II, Kepmen ESDM 1827 dengan tingkat risiko tinggi yaitu nilai $FK \geq 1,3$ dan $PoF \leq 5\%$. Pada komputasi geometri desain awal menunjukkan bahwa lereng keseluruhan *low wall* dinyatakan tidak

memenuhi kriteria dapat diterima karena didapatkan nilai FK 0,819 dan PoF 100% (Gambar 11), Oleh sebab itu perlu dilakukan rancangan ulang desain pada *low wall* untuk mendapatkan desain yang aman.

Pada rancangan ulang dilakukan dengan cara melakukan *trial and error* dengan menggunakan variasi sudut kemiringan lereng tunggal sebesar 30°, 35°, 40° dan 45° dengan tinggi lereng 8 m dan lebar 8 m serta terdapat ramp dengan lebar 25 m. *Trial and error* geometri lereng didapatkan juga sudut lereng keseluruhan yang bervariasi yaitu sebesar 18°, 20°, 21° dan 22°. Dalam melakukan analisis rancangan ulang lereng digunakan asumsi menggunakan jenis longsor busur berdasarkan kondisi lereng yang telah terjadi longsor bidang gelincir membentuk menyerupai busur. Metode analisis yang digunakan menggunakan metode Bishop Simplified. Analisis lereng dilakukan dengan kondisi MAT jenuh. Hasil komputasi rancangan ulang lereng di *low wall* tengah dapat dilihat pada Tabel 8.



Gambar 11. Analisis desain lereng awal

Tabel 9. Hasil Komputasi Rancangan Ulang Lereng

Sudut Tunggal (°)	Lebar Ramp (m)	Tinggi Lereng Keseluruhan (m)	Sudut Keseluruhan (m)	Faktor Keamanan		
				FK Det	FK Mean	PoF (%)
30	25	104	18	1,30	1,27	0
35		112	20	1,15	1,12	4,2
40		112	21	1,07	1,05	17,5
45		112	22	1,02	1,00	45,5

Analisis Balik Lereng Low Wall Tengah

Longsor pada lereng *low wall* terjadi pada sisi tengah *Pit 1*. Hasil kajian awal lereng *low wall* dalam kondisi stabil, namun pada kondisi aktual terjadi longsor, Oleh sebab itu perlu dilakukan evaluasi dengan analisis balik untuk mendapatkan *material properties* baru. Pada penelitian ini dilakukan analisis balik menggunakan FEM dengan pendekatan *direct approach* dan dilakukan validasi dengan data monitoring perpindahan lereng sehingga *displacement* yang didapatkan pada model mendekati kondisi aktual. Analisis lereng untuk rancangan ulang dilakukan dengan metode LEM dengan kriteria keruntuhan Mohr-Coloumb dan metode sampling menggunakan

metode Monte-Carlo untuk mendapatkan probabilitas longsor.

Kejadian Longsor di Bulan Desember

Kejadian longsor yang terjadi di *low wall* tengah pada bulan Desember 2023 terjadi pada material *claystone* dan *sandstone*. *Claystone* dan *sandstone* tersebut tersingkap setelah penambangan *coal seam* 40 dan 41. Hal tersebut menjadi fokus penelitian dalam melakukan pengkajian ulang terkait parameter baru berupa nilai kohesi (c), sudut gesek dalam (ϕ) dan modulus young (E). Berdasarkan material dan penyebab kejadian longsor pada *low wall* tengah, maka perlu dilakukan perbaikan lereng agar longsor serupa dapat dihindari. Analisis balik difokuskan pada material *claystone* dan *sandstone* yang mengalami deformasi. Pada penelitian ini diasumsikan bahwa lereng diuji dalam kondisi MAT jenuh karena berdasarkan data curah hujan pada bulan Desember curah hujan dalam kategori tinggi yaitu sebesar 343,86 mm. Mekanisme longsor yang terjadi pada *low wall* tengah akan dibahas menjadi dua poin yaitu struktur massa batuan dan pengaruh faktor eksternal terkait kejadian longsor di *low wall* tengah. Berikut merupakan penjabaran dari mekanisme longsor yang terjadi:

1. Struktur massa batuan

Bidang discontinue yang membentuk struktur massa batuan di lokasi penelitian berupa kekar, lipatan, dan bidang perlapisan. Pada lokasi penelitian endapan batubara dan *overburden* berupa struktur sedimen dengan perlapisan yang tebal. Struktur tersebut juga dapat berpotensi adanya bidang perlapisan batuan yang menyebabkan rentan terjadinya longsor, namun juga perlu ditinjau dari kekuatan massa batuan. Pada kondisi aktual lereng terdapat crack (Gambar 12) dengan kondisi terisi air dengan lebar bukaan 25 cm yang dapat berpotensi menyebabkan penurunan dari kekuatan massa batuan.



Gambar 12. Crack pada *face* lereng

2. Pengaruh faktor eksternal aliran air dan cuaca

Pada umumnya batuan lunak yang memiliki nilai UCS dibawah 25 MPa seperti *claystone* dan *sandstone* jika terjadi perubahan dari kandungan air maka nilai kohesi dan sudut gesek dalamnya akan dapat berubah secara drastis karena terjadi peningkatan tekanan pori pada batuan. Hal tersebut karena sifat mineral penyusunnya yang reaktif atau mudah dalam mengikat air.

Terikatnya air oleh mineral batuan lunak akan menyebabkan terganggunya keseimbangan butiran penyusun batuan tersebut (Rai, dkk 2014). Berdasarkan dari hasil observasi di lapangan menunjukkan adanya seepage pada elevasi 41 mdpl dengan kondisi mengalir pada *face* lereng. Hal tersebut dapat diasumsikan bahwa material dalam kondisi jenuh sehingga berpotensi mengalami penurunan kekuatan akibat dari pengaruh air. Selain hal itu material juga dapat berpotensi mengalami pelapukan akibat faktor cuaca, yaitu paparan sinar matahari saat material tersebut tersingkap dan dilewati oleh air hujan (*run off*) dan infiltrasi. Akibat dari air yang mengalir melewati muka lereng dan paparan sinar matahari mengakibatkan *claystone* dan *sandstone* mengalami pelapukan sehingga terjadi perubahan pada permukaan dan terbentuknya bidang lemah.

Berdasarkan dari mekanisme penjabaran tersebut, kejadian longsor pada *low wall* tengah terjadi pada material yang dapat dikategorikan ke dalam *weak rock* yaitu material yang memiliki kekuatan yang rendah, mudah menyerap air dan rentan terhadap pelapukan. Selain itu waktu kejadian longsor yang berada pada musim hujan dengan curah hujan yang tinggi berpengaruh terhadap aliran air permukaan yang melewati *face* lereng sehingga menyebabkan kerusakan pada struktur batuan dan berpengaruh terhadap kejadian longsor. Kejadian longsor yang terjadi di *low wall* tengah dapat diasumsikan ke dalam jenis longsor busur.

Simulasi Longsor dan Penurunan Material Properties

1. Simulasi Longsor

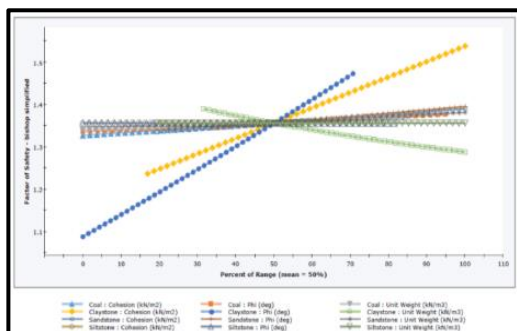
Pada pengamatan di lapangan material yang mengalami longsor adalah *claystone* dan *sandstone*. Namun, lapisan batuan pada area longsor juga berpotensi mengalami pelapukan karena tersingkap dan dipengaruhi air permukaan yang melewati muka lereng bekas longsor tersebut. Batuan yang dilakukan simulasi pada analisis balik di *low wall* tengah adalah *claystone*, *sandstone* dan *coal*. Penurunan *material properties* hanya dilakukan pada batuan yang mengalami deformasi dan termasuk kedalam zona pelapukan di sekitar litologi yang mengalami longsor.

Lereng yang mengalami longsor akan dilakukan simulasi dengan *trial and error* nilai *material properties* batuan yang mengalami deformasi berupa nilai kohesi (c), sudut gesek dalam (ϕ) dan modulus young (E) pada lapisan *claystone*, *sandstone* dan *coal* hingga didapatkan titik bidang gelincir yang paling mendekati dengan kondisi longsor dan *displacement* yang terjadi mendekati dengan data monitoring lereng patok monitoring M2 yang mengalami total *displacement* sebesar 1,656 m.

Pengaturan pada simulasi dilakukan dengan memperkecil ukuran *mesh* pada litologi yang kritis

dengan pembebanan statis dan simulasi dilakukan dengan MAT jenuh asumsi ini juga didukung dengan informasi bahwa sebelum terjadinya longsor terjadi hujan deras dengan intensitas tinggi pada bulan Desember dan terdapat *seepage* pada RL 41. Simulasi menunjukkan bahwa penurunan *material properties* dengan nilai c_2 , ϕ_2 dan E2 pada Tabel 7 dihasilkan total *displacement* model yang terjadi yaitu sebesar 1,657 m mendekati dari hasil data monitoring yaitu sebesar 1,656 m oleh karena itu hasil interpretasi model menunjukkan nilai selisih yang kecil dan dalam keadaan optimis sehingga simulasi yang dilakukan dapat diterima.

Analisis sensitivitas juga dilakukan untuk mengetahui parameter nilai *material properties* dari batuan penyusun lereng yang paling berpengaruh menentukan nilai FK. Berdasarkan dari hasil analisis sensitivitas dapat dilihat dari grafik sensitivitas Gambar 13 bahwa parameter batuan penyusun lereng yang paling berpengaruh adalah nilai dari kohesi dan sudut gesek dalam lapisan *claystone*. Hal ini dapat dilihat pada garis yang menunjukkan kohesi dan sudut gesek dalam *claystone* terlihat lebih miring daripada garis yang lainnya, artinya perubahan dari nilai kohesi dan sudut gesek dalam akan berpengaruh secara signifikan terhadap nilai dari faktor keamanan. Selain itu, material *claystone* merupakan batuan yang paling mendominasi sebagai material penyusun lereng *low wall*. Oleh karena itu dalam analisis balik ini ditekankan pada nilai kohesi dan sudut gesek dalam *claystone*. Material *sandstone* yang mengalami longsor juga dilakukan simulasi, *sandstone* yang mengalami longsor merupakan *loose sandstone* (batupasir lepas) sehingga diasumsikan untuk nilai kekuatan batuannya menurun secara signifikan karena berupa material lepas.



Gambar 13. Analisis sensitivitas material terhadap nilai FK

Lereng *low wall* sebelum mengalami longsor memiliki ketinggian 100 m dengan sudut lereng keseluruhan 20°. Sudut lereng tunggal dan ketinggian lereng tunggal pada *low wall* beragam pada tiap jenjang. Berdasarkan analisis balik yang dilakukan pada lereng *low wall* didapatkan nilai perubahan *material properties claystone*, *sandstone* dan *coal* dapat dilihat pada (Tabel 7) dengan hasil analisis didapatkan nilai SRF 0.93.

2. Penurunan nilai *material properties* hasil Analisis Balik

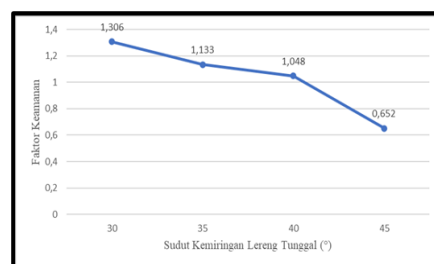
Hasil analisis balik pada lereng *low wall* yang mengalami longsor didapatkan parameter baru untuk batuan yang mengalami deformasi dengan nilai kohesi dan sudut gesek dalam pada lapisan *claystone* 48,5 kPa, 6,5°, pada lapisan *sandstone* 30,30 kPa, 4,8° dan pada lapisan *coal* yaitu 100,86 kPa, 10,33°. Persentase penurunan *material properties* *claystone*, *sandstone* dan *coal* secara beruntun yaitu kohesi 70,79%; 72,25% dan 37,299%; sudut gesek dalam 67,54%; 65,21% dan 49,16%. Regangan yang terjadi saat simulasi adalah 1,65% pada pembebanan statis. Kedua parameter ini yang akan digunakan sebagai *input material properties* baru dalam upaya perbaikan lereng untuk mendapatkan rancangan lereng yang aman.

Hasil dari analisis balik seperti pada Tabel 7 menunjukkan nilai parameter kohesi dan sudut gesek dalam material *claystone*, *sandstone* dan *coal* pada saat longsor mengalami penurunan. Hal ini membuktikan bahwa semakin kecil nilai kohesi dan sudut gesek dalam maka kuat gesernya akan semakin kecil sehingga kestabilan lereng menjadi berkurang.

Analisis Kestabilan Lereng pada Geometri Desain Awal dan Redesign

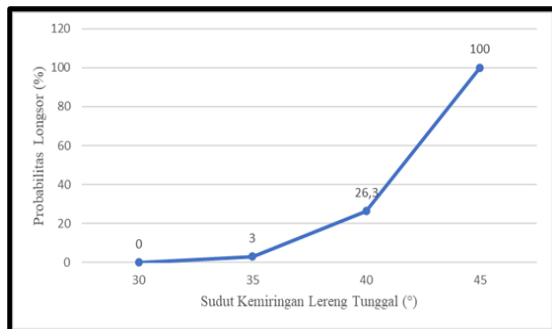
Material properties yang digunakan untuk analisis adalah *material properties* hasil analisis balik. Hal tersebut karena batuan yang longsor telah mengalami kerusakan sehingga kekuatan massa batuan perlu dievaluasi dengan analisis balik. Rancangan ulang lereng dilakukan dengan lebar jenjang 8 m, tinggi lereng tunggal 8 m, ramp 25 m dan variasi sudut kemiringan lereng tunggal yang digunakan yaitu 30°, 35°, 40°, dan 45° dengan menggunakan metode Bishop Simplified. Kondisi muka air tanah (MAT) yang digunakan yaitu dalam kondisi jenuh.

Berdasarkan hasil komputasi lereng redesign didapatkan nilai FK pada Tabel 8, perubahan sudut kemiringan lereng tunggal menjadi 30° dalam kondisi MAT jenuh mengalami peningkatan faktor keamanan menjadi 1,306. Gambar 14 menunjukkan bahwa semakin besar sudut lereng tunggal maka semakin menurun nilai FK dan didapatkan FK yang sesuai dengan kriteria dapat diterima berada pada sudut kemiringan lereng tunggal 30°.



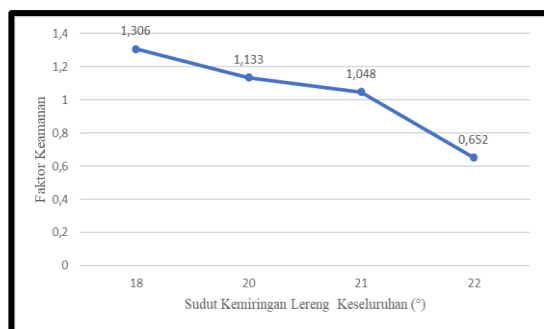
Gambar 14. Grafik hubungan sudut kemiringan lereng tunggal dengan nilai FK

Pada hasil analisis menunjukan nilai probabilitas longsor apabila semakin besar nilai probabilitas longsor maka lereng tersebut semakin tidak stabil dikarenakan kemungkinan terjadinya longsor pada lereng sangat besar. Pada lereng low wall dengan sudut lereng tunggal antara 30° - 45° dalam kondisi MAT jenuh dihasilkan nilai PoF Gambar 15 diperoleh untuk nilai PoF yang sesuai dengan kriteria ($PoF < 5\%$) berada pada sudut 30° yaitu 0 %.



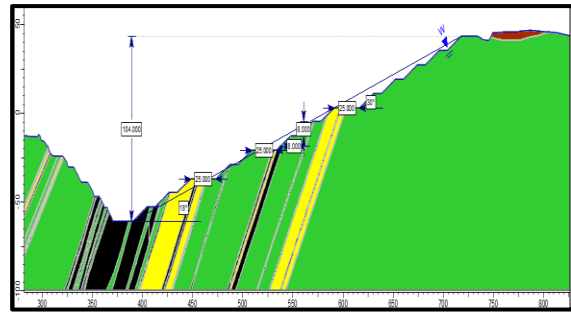
Gambar 15. Grafik hubungan sudut kemiringan lereng tunggal dengan probabilitas longsor

Apabila semakin besar nilai sudut kemiringan lereng keseluruhan maka lereng tersebut akan semakin tidak stabil dikarenakan kemungkinan terjadinya longsor pada lereng sangat besar. Pada lereng low wall dengan sudut lereng keseluruhan antara 18° - 21° dalam kondisi MAT jenuh seperti pada Gambar 16 diperoleh untuk nilai FK yang sesuai dengan kriteria ($FK \geq 1,3$) berada pada sudut lereng keseluruhan 18° yaitu FK 1,306.



Gambar 16. Grafik hubungan sudut lereng keseluruhan dengan nilai FK

Berdasarkan Gambar 14-16 diperoleh geometri lereng dengan sudut lereng tunggal sebesar 30° , sudut lereng keseluruhan 18° dengan tinggi lereng keseluruhan 104 m dan kondisi muka air tanah jenuh diperoleh FK 1,306 dan nilai PoF sebesar 0%. Hal tersebut sesuai dengan kriteria penerimaan lereng yang dinyatakan aman dengan tingkat risiko tinggi apabila nilai $FK \geq 1,3$ dan $PoF \leq 5\%$. Usulan geometri desain lereng low wall dapat dilihat pada Gambar 17.



Gambar 17. Usulan redesign lereng

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan pada penelitian ini adalah:

1. Berdasarkan hasil analisis balik pada kejadian longsor didapatkan nilai *material properties* berupa kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ) pada lapisan *claystone* yaitu 48,5 kPa; $6,5^{\circ}$, pada lapisan *sandstone* 30,3 kPa; $4,8^{\circ}$ dan pada lapisan *coal* 100,86 kPa; $10,33^{\circ}$. Serta regangan yang terjadi sebesar 1,65% dengan jenis longsor busur.

2. Berdasarkan kekuatan massa batuan di *low wall* tengah geometri desain awal tidak memenuhi kriteria dapat diterima sehingga perlu dilakukan rancangan ulang. Hasil analisis rancangan ulang geometri lereng *low wall* menghasilkan usulan dengan tinggi lereng tunggal 8 m, lebar jenjang 8 m dan *single slope* 30° , *overall slope* 18° dan lebar ramp 25 m didapatkan nilai FK 1,306 dan PoF 0%.

Saran

Saran yang dapat diberikan dari hasil penelitian ini adalah:

1. Melakukan pembaruan data sifat fisik dan mekanik dengan melakukan pengujian sampel di laboratorium.
2. Melakukan pemantauan MAT agar kondisi aktual MAT dapat diketahui sehingga analisis kestabilan lereng dapat menunjukkan kondisi aktual.

DAFTAR PUSTAKA

- Arif, I. (2016). Geoteknik Tambang Mewujudkan Produksi Tambang yang Berkelanjutan dengan Menjaga Kestabilan Lereng. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Azizi, A. (2014). Pengembangan Metode Penentuan Reliabilitas Kestabilan Lereng Tambang Terbuka Batubara di Indonesia. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Duncan, M. J, Wright, G. S., & Brandon, L. T. (2014). Soil Strength and Slope Stability. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1977). Rock Slope Engineering (2nd ed.). London: The Institution of Mining and Metallurgy.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.

- (2018). Keputusan Menteri ESDM No. 1827/K/30/MEM/2012 Tahun 2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Pertambangan yang Baik.
- Kliche, C. A. (2018). Slope Stability Analysis. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Martin, D., & Stacey, P. (2018). Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks (1st ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Pariseau, G. M. (2011). Design Analysis in Rock Mechanics (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- PT Banjar Bumi Persada. (2018). Dokumen Laporan Eksplorasi.
- PT Banjar Bumi Persada. (2023). Dokumen Kajian Geoteknik Pit 1.
- Rai, M. A., Kramadibrata, S., & Wattimena, R. K. (2014). Mekanika Batuan. Bandung: ITB Press.
- Read, J., & Stacey, P. (2009). Guidelines for Open Pit Slope Design. Clayton South, Australia: CSIRO Publishing.
- Sakurai, S. (2017). Back Analysis in Rock Engineering. ISRM Book Series.
- Sakurai, S., & Nakayama, T. (1999). A back analysis in assessing the stability of slope by means of surface measurement. In Proceeding International Symposium on Slope Stability Engineering-IS-Shikoku 1999 (Vol. 1, pp 339-343). Matsuyama/Shisoku, Japan.
- Wyllie, D. C., & Mah, W. (2004). Rock Slope Engineering Civil and Mining. In: E. Hoek & J.W. Bray (Eds.), Rock slope Engineering. CRC Press.
- Wyllie D. C. (2018). Rock Slope Engineering Civil and Mining (5th ed.). New York: Taylor & Francis.