

Analisis Balik Kestabilan Lereng *Highwall* di Pit Pandu PT. Putra Muba Coal Kabupaten Musi Banyuasin Provinsi Sumatera Selatan

Andy Yanottama^{1*}, Muhammad Faisal Seprizal², Jarot Wiratama³, Zella Navtalia⁴,
Leta Lestari⁵

¹⁻⁴ Universitas Jambi, Indonesia

⁵ Institut Teknologi Sumatera, Indonesia

Alamat: Jl. Jambi – Muara Bulian No.KM. 15, Mendalo Darat, Kec. Jambi Luar Kota,
Kabupaten Muaro Jambi, Jambi

Korespondensi penulis: andy.yanottama@unja.ac.id*

Abstract. PT. Putra Muba Coal is one of the subsidiaries under the MNC Group, operating in the coal mining sector with an IUP (Mining Business Permit) area covering 2,947 hectares. During its mining operations at the Pandu Pit, PT. Putra Muba Coal experienced a landslide incident on the highwall side. Therefore, a back-analysis using the deterministic method was conducted to determine the material property values that led to the slope failure in the mining area. The slope material consists of claystone and siltstone layers, each with a cohesion value of 192.3 kN/m² and 157.0 kN/m², and internal friction angles of 25.3° and 24.4°, respectively. Based on the back-analysis results, it was found that there was a decrease in material property values, with cohesion reduced by 91% and the internal friction angle reduced by 29%. This reduction in material properties suggests that the decrease in cohesion was the primary factor causing the highwall slope failure, as indicated by the back-analysis of slope stability which resulted in a safety factor of ($SF = 1.008$).

Keywords: Back analysis; Material properties; Slope stability

Abstrak. PT. Putra Muba Coal merupakan salah satu perusahaan yang tergabung dalam anak usaha MNC Group yang bergerak di bidang pertambangan batubara dengan luas area IUP adalah 2.947 Ha. Dalam proses penambangannya, di Pit Pandu PT. Putra Muba Coal telah terjadi peristiwa longsor di sisi *highwall*, sehingga perlu dilakukan analisis balik dengan menggunakan metode deterministik untuk mengetahui nilai properties material yang menyebabkan kondisi lereng tambang mengalami kelongsoran. Material penyusun lereng terdiri dari lapisan *claystone* dan *siltstone* yang masing-masingnya memiliki nilai kohesi 192,3 kN/m² dan 157,0 kN/m², serta nilai sudut gesek dalam 25,3° dan 24,4°. Berdasarkan hasil analisis balik, dapat diketahui bahwa terjadi penurunan nilai properties material pada nilai kohesi sebesar 91% dan nilai sudut geser dalam sebesar 29%. Berdasarkan penurunan nilai properties material, dapat diasumsikan bahwa penurunan nilai kohesi yang menyebabkan lereng sisi *highwall* mengalami longsor yang ditunjukkan dengan hasil analisis balik kestabilan lereng dengan nilai faktor keamanan ($FK = 1,008$).

Kata kunci: Analisis balik; Kestabilan lereng; Properties material

1. LATAR BELAKANG

Kestabilan lereng merupakan hal penting pada operasi penambangan, karena kestabilan lereng tambang harus dijaga agar tidak terjadi kelongsoran yang dapat mengakibatkan terganggunya proses operasi dan produksi yang dapat mengakibatkan kerugian baik material maupun non-material. Lereng penambangan secara umum berbentuk dan teridri dari geometri lereng yang meliputi lebar, tinggi, dan sudut kemiringan lereng (Ando Viery, 2024). Suatu rancangan kestabilan lereng sangat penting untuk dilakukan karena berkaitan dengan keberhasilan suatu proses aktifitas penambangan yang sangat bergantung pada area kerja yang aman. Lereng yang tidak aman akan menimbulkan gangguan terhadap segala aktifitas

penambangan, sehingga penilaian atas kestabilan lereng dilihat dari nilai faktor keamanan sesuai kriteria Kepmen ESDM No.1827 K/30/MEM Tahun 2018. Secara sederhana, faktor keamanan suatu lereng dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara gaya penahan yang membuat lereng tetap stabil, berbanding dengan gaya penggerak yang menyebabkan terjadinya longsor (tidak stabil). Stabilitas suatu lereng ditentukan oleh berbagai parameter, seperti sifat fisik dan mekanik material penyusunnya yaitu kohesi, berat jenis, dan sudut gesekan dalam, termasuk parameter kondisi geologi, kondisi air tanah, geometri dan dimensi lereng tunggal atau secara keseluruhan. Nilai sifat batuan berpengaruh terhadap gaya penahan pada lereng yang berfungsi sebagai tumpuan terhadap gaya pendorong yang memicu longsoran (Heriyadi & Rizaldi, 2019). Berdasarkan kasus longsoran yang terjadi di Pit Pandu PT. Putra Muba Coal, kondisi ini dianggap tidak optimal dalam operasional penambangan karena berpotensi menurunkan efisiensi produksi. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi teknis terhadap nilai faktor keamanan (FK) berdasarkan hasil perhitungan yang merepresentasikan kondisi geoteknik aktual di lapangan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kondisi aktual parameter kekuatan massa batuan, khususnya nilai kohesi dan sudut gesek dalam, yang berkontribusi terhadap ketidakstabilan lereng, serta mengevaluasi kesesuaian karakteristik geoteknik massa batuan berdasarkan hasil analisis balik (*back analysis*). Analisis balik merupakan metode evaluasi kestabilan lereng yang digunakan untuk menentukan parameter kekuatan massa batuan (kohesi dan sudut geser dalam), yang menjadi faktor penyebab terjadinya kegagalan atau runtuhnya lereng (Sehel Selsabeel, dkk, 2021). Sejumlah studi menunjukkan bahwa estimasi nilai kohesi dan sudut geser dalam umumnya lebih rendah dibandingkan hasil yang diperoleh dari pengujian laboratorium (Andhini et al., 2020; Rizaldi & Heriyadi, 2019; Febriadi et al., 2020). Nilai estimasi tersebut digunakan sebagai input parameter dalam perhitungan faktor keamanan (FK) yang menjadi dasar rekomendasi desain rekayasa geoteknik.

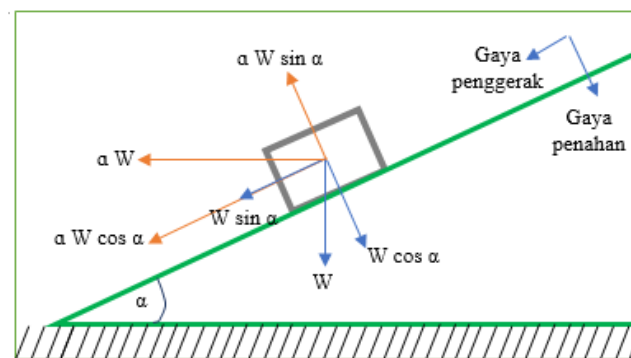
2. KAJIAN TEORITIS

Konsep Kestabilan Lereng

Kestabilan lereng mengacu pada kemampuan lereng untuk tetap berada dalam kondisi setimbang berdasarkan bentuk geometri dan dimensi lereng yang ada. Secara alami, massa batuan berada dalam kondisi setimbang akibat gaya-gaya dalam yang saling menyeimbangkan. Namun, aktivitas seperti penggalian, peledakan, erosi, atau faktor eksternal lainnya dapat mengganggu keseimbangan ini, sehingga sistem massa batuan akan mengalami penyesuaian untuk mencapai kondisi keseimbangan baru. Proses penyesuaian ini dapat memicu

ketidakstabilan lereng apabila tegangan yang terjadi melebihi kekuatan batuan (Fariz Aditya, 2020). Beberapa faktor lain yang dapat mempengaruhi kestabilan suatu lereng dapat berupa faktor kondisi geologi, bentuk keseluruhan lereng (geometri dan dimensi lereng), kondisi air tanah, faktor luar seperti getaran atau kegempaan.

Kestabilan lereng, baik yang terbentuk secara alami maupun hasil rekayasa geoteknik, ditentukan oleh interaksi antara gaya penahan dan gaya penggerak. Secara prinsip, lereng berada dalam kondisi stabil apabila gaya penahan yang bekerja lebih besar daripada gaya penggeraknya. Sebaliknya, jika gaya penggerak melebihi gaya penahan, maka lereng menjadi tidak stabil dan berpotensi mengalami longsoran. Longsoran ini merupakan respons alami dari lereng dalam mencapai kondisi keseimbangan baru (Irwandy Arif, 2016).



Gambar 1. Garis kesetimbangan gaya pada lereng

Dalam kestabilan lereng umumnya dinyatakan dalam sebutan faktor keamanan (*safety factor*), dalam faktor keamanan ini dapat dijadikan acuan untuk mengetahui lereng tersebut termasuk dalam kriteria aman atau tidak, untuk rumus yang digunakan sebagai berikut:

$$\text{Faktor Keamanan} : \frac{\text{Gaya Penahan}}{\text{Gaya Penggerak}}$$

Suatu lereng dikategorikan stabil apabila nilai faktor keamanannya (FK) tinggi, yaitu lebih dari 1,25. Sebaliknya, lereng dianggap tidak stabil apabila nilai FK-nya rendah, yakni kurang dari 1,07 (Bowles, 1989).

Tabel 1. Nilai Faktor Keamanan

Nilai Faktor Keamanan	Keadaan Lereng/Kejadian Longsor
FK < 1,07	Tidak aman/longsor biasa terjadi
FK 1,07 – FK < 1,25	Kritis (longsor pernah terjadi)
FK > 1,25	Longsor jarang terjadi (aman)

Untuk faktor keamanan dalam Kepmen ESDM No.1827 Tahun 2018 terdapat pada tabel di bawah ini:

Tabel 2. Nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Longsor Lereng Tambang

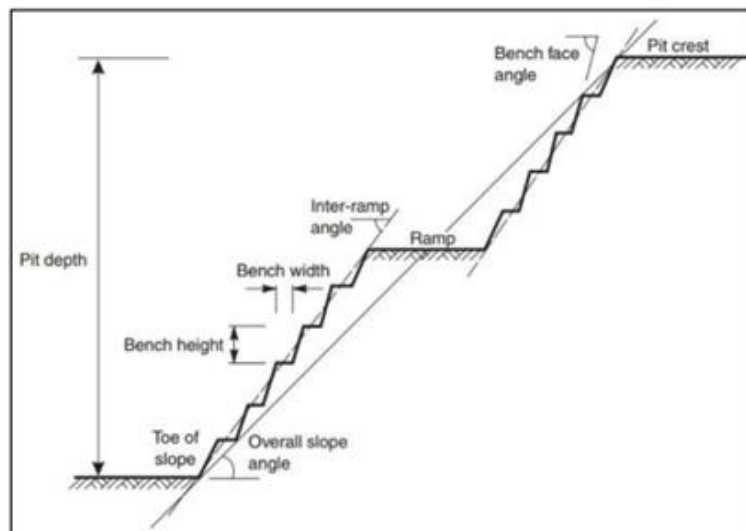
Jenis Lereng	Keparahan Longsor (<i>Consequences of Failure / CoF</i>)	Kriteria dapat diterima (<i>Acceptance Criteria</i>)		
		Faktor Keamanan (FK) Statis (Min)	Faktor Keamanan (FK) Dinamis (Min)	Probabilitas Longsor (<i>Probability of Failure</i>) (maks PoF ($FK \leq 1$))
Lereng tunggal	Rendah s.d. Tinggi	1,1	Tidak ada	25-50%
Inter-ramp	Rendah	1,15-1,2	1,0	25%
	Menengah	1,2-1,3	1,0	20%
	Tinggi	1,2-1,3	1,1	10%
Lereng Keseluruhan	Rendah	1,2-1,3	1,0	15-20%
	Menengah	1,3	1,05	10%
	Tinggi	1,3-1,5	1,1	5%

Sumber: Kepmen ESDM No.1827 (2018)

Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kestabilan Lereng

a) Geometri Lereng

Desain geometri (dimensi lereng) meliputi tinggi lereng, lebar jenjang, dan kemiringan lereng seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Terminologi Desain Geometri Lereng

Geometri lereng merupakan salah satu aspek penting yang memengaruhi stabilitas lereng. Elemen-elemen geometri tersebut mencakup dimensi seperti tinggi lereng, sudut kemiringan, dan lebar *berm*, baik pada lereng tunggal maupun lereng keseluruhan. Lereng tunggal terbentuk dari satu jenjang (*bench*), sedangkan lereng keseluruhan terdiri atas beberapa jenjang yang tersusun vertikal dan horizontal. Lereng dengan ketinggian

yang berlebihan cenderung memiliki risiko longsor yang lebih besar dibandingkan dengan lereng yang lebih rendah, terutama jika kondisi litologi atau jenis batuan penyusunnya seragam (homogen) (Sehel Selsabeel, dkk, 2021). Sudut kemiringan lereng memiliki pengaruh signifikan terhadap kestabilan; semakin curam sudut lereng, maka potensi ketidakstabilan lereng akan meningkat. Sebaliknya, bertambahnya lebar *berm* berkontribusi terhadap peningkatan kestabilan lereng, karena *berm* berfungsi sebagai penahan dan pengaman terhadap material runtuh.

b) Struktur Geologi

Struktur geologi ini meliputi keterdapatan bidang lemah pada masa batuan seperti join atau kekar yang terbentuk secara alamiah dan dapat menimbulkan ketidakstabilan pada lereng. Dalam analisis kestabilan lereng tambang, salah satu aspek geologi yang perlu diperhatikan adalah keberadaan bidang-bidang lemah (*discontinuity*), seperti bidang perlapisan, kekar, dan sesar, yang dapat menjadi jalur potensial bagi mekanisme longsor.

c) Iklim

Iklim merupakan faktor eksternal yang memengaruhi kestabilan lereng, salah satunya melalui perubahan temperatur. Perubahan suhu yang terjadi secara drastis dalam waktu singkat dapat mempercepat proses pelapukan fisik dan kimiawi pada batuan. Di wilayah beriklim tropis, proses pelapukan berlangsung lebih intensif dibandingkan daerah beriklim dingin, sehingga singkapan batuan pada lereng di daerah tropis cenderung lebih cepat mengalami pelapukan. Kondisi ini memperbesar potensi erosi permukaan dan meningkatkan risiko terjadinya longsor..

d) Kuat Geser Tanah atau Batuan

Kekuatan dari tanah atau batuan itu sendiri merupakan faktor penting pada analisis kestabilan lereng, dikarenakan setiap jenis tanah atau batuan memiliki nilai kekuatan, memiliki sifat fisik dan mekanik yang berbeda-beda. Salah satu komponen utama dalam analisis kestabilan lereng adalah karakteristik fisik dan mekanik dari material batuan. Sifat fisik yang umum digunakan adalah bobot isi, sementara sifat mekanik ditentukan oleh kekuatan geser batuan, yang dinyatakan melalui parameter kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Kekuatan geser ini berperan sebagai gaya penahan internal yang sangat penting untuk menjaga lereng tetap dalam kondisi stabil terhadap gaya-gaya penggerak.

e) Tinggi Muka Air Tanah

Ketepatan muka air tanah sangat berpengaruh pada kestabilan lereng, muka air tanah yang tinggi dapat membuat suatu lereng tanah atau batuan menjadi jenuh. Air akan

memasuki pori-pori tanah atau batuan sehingga tanah atau batuan mengalami kejenuhan dikarenakan memiliki kandungan air yang tinggi. Kandungan air yang tinggi pada suatu tanah atau batuan, akan mengurangi nilai kuat geser seperti kohesi dan sudut geser dalam. Selain itu, lereng yang dalam kondisi jenuh air, akan menerima beban tambahan dari berat material penyusunnya yang mengandung air.

f) Gaya dari Luar

Gaya eksternal yang memengaruhi kestabilan lereng tambang antara lain berasal dari aktivitas operasional penambangan, seperti beban dinamis dan statis akibat pergerakan alat berat di atas lereng, serta getaran seismik yang dihasilkan oleh kegiatan peledakan. Gaya-gaya ini dapat mempercepat terjadinya perubahan kondisi tegangan dalam massa batuan dan berpotensi memicu ketidakstabilan lereng (Anita S.S, & Bambang H, 2023).

Metode Kesetimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method*)

Metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium method/LEM*) merupakan pendekatan yang paling umum digunakan dalam analisis kestabilan lereng, khususnya untuk tipe longsor translasi maupun rotasi. Metode ini dikenal karena kesederhanaannya, kemudahan dalam penerapan, dan keandalannya yang telah teruji dalam berbagai aplikasi rekayasa geoteknik. Analisis dengan LEM hanya mempertimbangkan kondisi kesetimbangan statik tanpa memperhitungkan hubungan tegangan-regangan dalam massa lereng. Salah satu asumsi dasar dari metode ini adalah bahwa bentuk dan geometri bidang longsor telah diketahui atau diasumsikan terlebih dahulu sebelum perhitungan dilakukan

Dalam metode kesetimbangan batas, kondisi kestabilan lereng dinyatakan melalui indeks berupa Faktor Keamanan (*Factor of Safety/FK*). Nilai FK dihitung berdasarkan pendekatan kesetimbangan gaya, kesetimbangan momen, atau kombinasi keduanya, tergantung pada metode analisis yang digunakan. Secara teoritis, lereng dianggap dalam kondisi aman apabila nilai FK lebih besar dari satu. Jika nilai FK sama dengan satu, maka lereng berada dalam kondisi kritis, yaitu tepat dalam keadaan seimbang antara gaya penahan dan gaya penggerak (Fadhilla Akbar, 2022).

Metode Analisis Balik (*Back Analysis*)

Metode analisis balik (*back anlysis*) suatu kestabilan lereng adalah proses untuk menentukan parameter tanah seperti kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ) yang menyebabkan lereng mengalami kegagalan atau longsor (*failure*). Hal ini dilakukan dengan mengasumsikan faktor keamanan (FK) saat terjadi longsor adalah $FK=1$. Analisis balik (*back anlysis*)

merupakan metode yang umum digunakan dalam geoteknik untuk membantu mencari estimasi nilai properti dari massa batuan atau tanah. Analisis balik (*back analysis*) dilakukan lebih baik pada satu area formasi geologi yang sama, untuk mendapatkan karakter kelongsoran yang diakibatkan oleh massa batuan atau tanah.

Analisis balik (*back analysis*) merupakan metode evaluasi yang digunakan untuk menentukan parameter geoteknik lereng tepat sebelum terjadi kegagalan. Parameter utama yang dianalisis meliputi kohesi dan sudut geser dalam, yang merepresentasikan kekuatan geser material penyusun lereng. Analisis ini difokuskan pada zona terlemah dalam massa lereng, yang diasumsikan sebagai bidang gelincir utama. Penentuan bidang gelincir didasarkan pada observasi kondisi lapangan dan interpretasi geologi setempat (Rizaldi, 2020).

3. METODE PENELITIAN

Tahapan pelaksanaan penelitian dalam analisis balik kestabilan lereng ini dilakukan secara sistematis melalui beberapa langkah utama, yaitu:

a) Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mencari studi pustaka yang menunjang dalam penelitian ini yang merujuk pada beberapa penelitian yang sama seperti jurnal, tesis, dan buku.

b) Observasi Lapangan

Observasi lapangan ini dilakukan untuk mengamati kondisi di lapangan sebagai langkah awal identifikasi lapangan dalam menganalisa kestabilan lereng. Kegiatan observasi ini dilakukan untuk pengambilan data di lapangan antara lain salah seperti pengambilan dokumentasi berupa foto lereng setelah terjadi longsor yang disertai dengan pengamatan aktual lereng di lapangan.

c) Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan melalui dua jenis sumber, yaitu data primer dan data sekunder. Data-data yang diperlukan dalam analisis kestabilan lereng mencakup informasi sebagai berikut:

1) Data Primer

Data primer adalah data yang diperoleh dari melakukan pengamatan langsung ke lapangan, antara lain yaitu pengamatan dan pengambilan dokumentasi foto kejadian lereng longsor dilapangan.

2) Data Sekunder

Data sekunder merupakan data yang diperoleh secara tidak langsung, adapun data yang diperoleh adalah sebagai berikut, nilai properties batuan (sifat fisik dan

mekanik), model geologi perlapisan batuan penyusun lereng, dan model penampang lereng dua dimensi.

d) Pengolahan Data

Data yang telah terkumpul selanjutnya dikategorikan berdasarkan karakteristiknya, baik data geometri, geoteknik, maupun geologi. Setelah klasifikasi dilakukan, data dianalisis dan diolah melalui metode perhitungan yang relevan, sesuai dengan tujuan dan kebutuhan studi kestabilan lereng. Analisis balik kestabilan lereng pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan bantuan *Software Rocscience Slide 6.0* untuk menganalisa kestabilan lereng dan mendapatkan faktor keamanan saat terjadi kelongsoran. Kriteria nilai faktor keamanan (FK) disesuaikan dengan Kepmen 1827 tahun 2018.

Analisis balik kestabilan lereng ini menggunakan metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium methode*) yaitu berupa metode irisan *Bishop* dan menggunakan kriteria kekuatan *Mohr-Coulomb* berupa data kohesi dan sudut geser dalam.

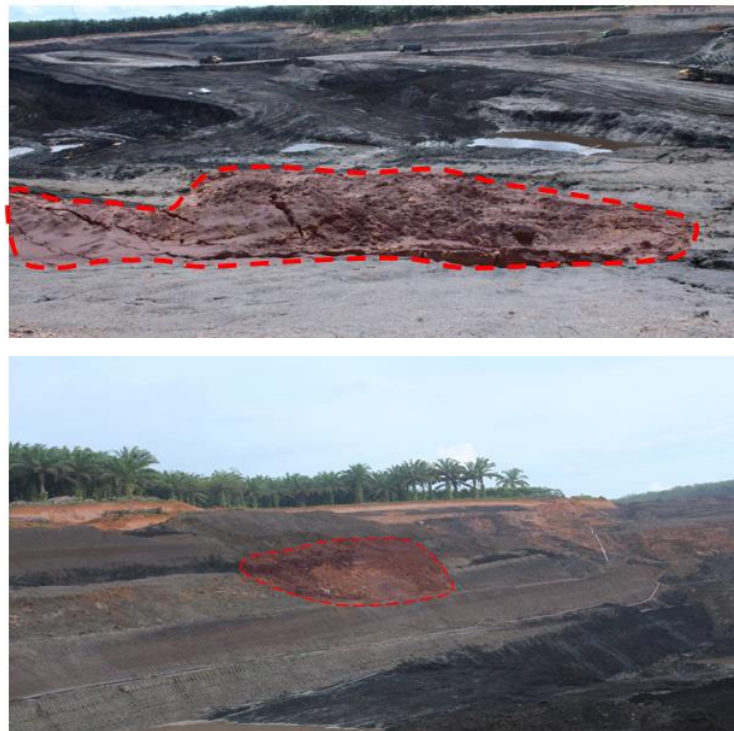
Adapun tahap dalam menganalisis balik kestabilan lereng ini adalah sebagai berikut:

- a. Melakukan analisis kestabilan lereng sebelum terjadi longsor
- b. Melakukan analisis balik terhadap kestabilan lereng sesaat atau setelah terjadi longsor untuk mendapatkan parameter geoteknik.

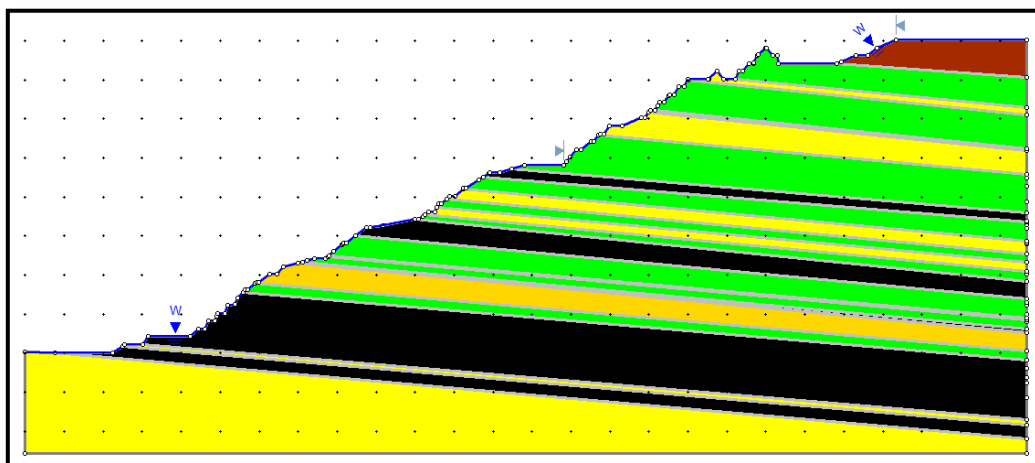
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan Lereng Highwall

Kondisi aktual dilapangan pada lereng tambang di sisi *highwall* di dominasi oleh lapisan *claystone* dan *siltstone*, dimana pada hasil analisa awal menggunakan *Software Rocscience Slide 6.0* menunjukkan bahwa lereng *highwall* ini dalam kondisi stabil. Namun pada kondisi aktualnya terjadi longsor pada lereng sisi *highwall*. Berdasarkan hasil obseravasi dan pengamatan langsung dilapangan, jenis longsor yang terjadi pada lereng *highwall* adalah berupa longsor busur. Longsor berbentuk busur (rotasional) merupakan tipe longsor yang paling umum dijumpai di alam, khususnya pada batuan yang bersifat lunak dan telah mengalami pelapukan intensif, sehingga sifat fisiknya menyerupai tanah. Tanda awal terjadinya longsor jenis ini biasanya ditandai dengan munculnya rekahan tarik pada bagian atas lereng atau muka lereng. Dalam beberapa kasus, rekahan ini diikuti oleh penurunan lokal pada permukaan atas lereng di sekitar rekahan, yang umumnya terjadi akibat akumulasi air. Penurunan ini mengindikasikan adanya pergerakan massa lereng yang dapat berkembang menjadi longsor jika tidak segera diidentifikasi dan dianalisis. Adapun gambar kondisi aktual longsor dan pemodelan lereng *highwall* dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 3. Dokumentasi Longsor pada Lereng *Highwall*



Gambar 4. Pemodelan Lereng *Highwall*

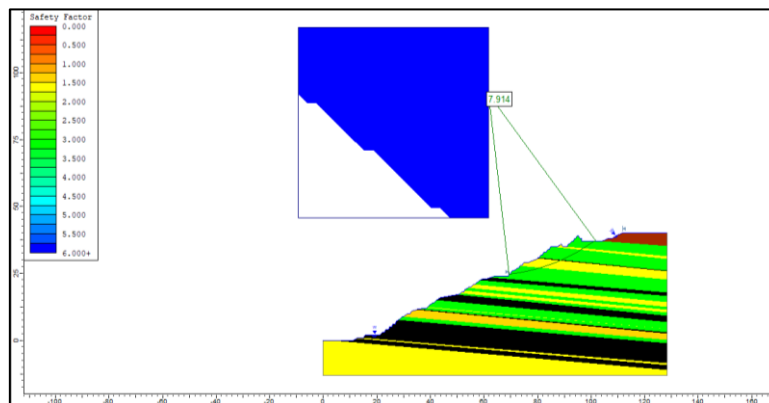
Analisis Kestabilan Lereng *Highwall* Sebelum terjadi Longsor

Analisis kestabilan lereng *highwall* ini dilakukan dengan menggunakan bantuan *Software Rocscience Slide 6.0* dengan kekuatan *Mohr-Coulomb*. Dalam melakukan analisis kestabilan lereng memerlukan parameter geoteknik berupa *material properties* yaitu nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) yang didapatkan dari hasil uji laboratorium geomekanika pada uji kuat geser. Adapun *material properties* yang digunakan pada analisis kestabilan lereng ini dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 3. Nilai *Material Properties* Lereng Highwall

Material	Unit Weight (γ)	Kohesi (c)	Sudut Geser Dalam (ϕ)
Claystone	18,6	192,3	25,3
Siltstone	19,1	157,0	24,4
Coal	11,9	283,8	33,7

Berdasarkan *material properties* diatas, lereng tambang sisi *highwall* yang tersusun dari material atau lapisan batuan *claystone*, *siltstone* dan batubara (*coal*) selanjutnya dilakukan analisis kestabilan lereng *highwall* dengan memasukan nilai unit weight, kohesi, dan sudut geser dalam sebagai parameter input ke dalam *Software Rocscience Slide 6.0*. Dari hasil analisis kestabilan lereng *highwall* sebelum terjadinya longsor, menunjukkan lereng *highwall* dalam kondisi stabil yang ditunjukkan oleh nilai faktor keamanan lereng adalah $FK = 7,914$ seperti pada gambar hasil analisis dibawah ini.



Gambar 5. Nilai Faktor Keamanan Lereng Highwall Sebelum Longsor

Analisis Balik (*Back Analysis*) Kestabilan Lereng Highwall Setelah Longsor

Berdasarkan analisis kestabilan lereng *highwall* sebelum terjadi longsor menunjukkan lereng tersebut dalam kondisi stabil yang dinyatakan dalam nilai faktor kemanan $FK = 7,914$. Namun pada kondisi aktualnya, lereng tersebut tidak stabil dan mengalami longsor. Untuk mengetahui penyebab terjadinya longsor tersebut, maka dilakukan analisis balik (*back analysis*) dengan mengkombinasikan dua metode pada analisis balik yaitu metode kualitatif dan metode deterministik.

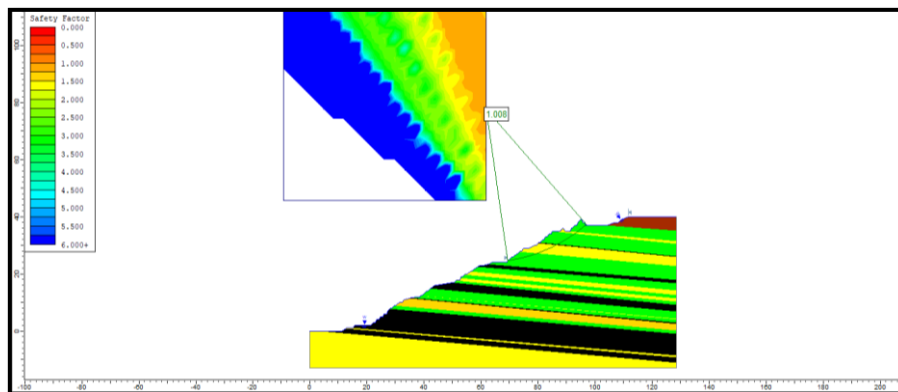
Metode kualitatif ini dilakukan untuk menilai sebab akibat kelongsoran yang dilakukan langsung secara pengamatan dilapangan berdasarkan kondisi-kondisi fisik seperti geometri, struktur geologi, dominasi pengaruh air tanah, material dominan dalam lereng dan lain-lain. Metode deterministik dilakukan dengan cara berasumsi bahwa penyebab kelongsoran adalah perubahan nilai properti massa batuan atau tanah, yaitu kohesi (c) dan atau sudut geser dalam (ϕ).

Untuk mengetahui parameter nilai material properties mana yang berubah dan menyebabkan lereng tersebut longsor, maka dilakukan *trial and error* untuk mendapatkan estimasi dari kedua parameter tersebut antara kohesi dan sudut geser dalam. Berdasarkan *trial and error* yang dilakukan dalam analisis balik ini, maka didapatkan parameter geoteknik berupa nilai material properties kohesi dan sudut geser dalam yang mengalami penurunan seperti ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

Tabel 4. Estimasi Nilai Material Properties Hasil Back Analysis

Material	Faktor Keamanan (FK)	Unit Weight (γ)	Kohesi (c)	Sudut Geser Dalam (ϕ)
<i>Claystone</i>	1,008	18,6	13,7	15,05
<i>Siltstone</i>		19,1	17	20
<i>Coal</i>		11.9	190	10

Dari hasil *trial and error* dalam mengestimasi nilai material properties diatas, maka selanjutnya dilakukan analisis balik (*back analysis*) dengan memasukan nilai unit weight, kohesi, dan sudut geser dalam pada tabel diatas sebagai parameter input ke dalam *Software Rocscience Slide 6.0*. Dari hasil analisis balik kestabilan lereng *highwall* setelah terjadi longsor, menunjukkan bahwa lereng *highwall* tersebut dalam kondisi tidak stabil yang ditunjukkan oleh nilai faktor keamanan lereng adalah $FK = 1,008$ seperti pada gambar hasil analisis dibawah.



Gambar 6. Nilai Faktor Keamanan Lereng Highwall Sesaat Terjadi Longsor

Penurunan nilai parameter kekuatan ini terjadi akibat dari lereng tersebut dalam kondisi jenuh oleh air yang diperlihatkan adanya rekahan tarik di belakang *crest* lereng dan terisi oleh air. Hal ini menyebabkan lereng *highwall* tersebut tidak stabil dan mengalami longsor. Berdasarkan Kepmen ESDM No.1827 Tahun 2018 mengenai kriteria nilai faktor keamanan lereng tambang, dimana lereng *highwall* ini termasuk lereng keseluruhan dan harus mencapai kriteria nilai faktor keamanan minimal yaitu $FK = 1,2 - 1,3$.

Berdasarkan hasil analisis balik ini dapat diketahui bahwa lereng tambang sisi *highwall* mengalami longsor dikarenakan terjadinya penurunan nilai parameter kekuatan batuan yang

masing-masingnya adalah pada nilai kohesi mengalami penurunan sebesar 91% dan pada nilai sudut geser dalam mengalami penurunan sebesar 29%. Berdasarkan penurunan nilai properties material, maka dapat diasumsikan bahwa penurunan nilai kohesi yang menyebabkan menjadi penyebab utama lereng sisi *highwall* mengalami longsor (tidak stabil) yang ditunjukkan dengan hasil analisis balik kestabilan lereng dengan nilai faktor keamanan ($FK = 1,008$).

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan sebelumnya, maka dapat disimpulkan bahwa analisis balik kestabilan lereng pada kejadian longsor pada lereng tambang sisi *highwall* disebabkan adanya penurunan nilai kohesi material pengusun lereng sebesar 91% dan nilai sudut geser dalam sebesar 29%. Penurunan nilai material properties tersebut tidak terlepas dari adanya pengaruh faktor keterdapatan bidang lemah berupa rekahan tarik dibelakang *crest* dan rekahan tersebut terisi penuh oleh air. Hal ini menyebabkan lereng *highwall* dalam kondisi jenuh dan berpengaruh terhadap terjadinya penurunan nilai kohesi dan sudut geser dalam pada material penyusun lereng.

Adapun saran yang dapat diberikan untuk kesempurnaan dalam penelitian ini adalah, sebaiknya dilakukan pengukuran muka air tanah (MAT) dan dilakukan pengambilan serta pengujian sampel tanah atau batuan untuk mendapatkan nilai parameter kekuatan secara akurat sehingga model analisis yang dihasilkan akan lebih mendekati kondisi aktual.

DAFTAR REFERENSI

- Aditya, F. (2020). Analisis Kestabilan Lereng pada Batuan Berkekar Akibat Peledakan Terowongan 4 Proyek Kereta Cepat Jakarta – Bandung. Institut Teknologi Bandung. Retrieved from <https://digilib.itb.ac.id/>
- Akbar, F. (2022). Analisis 3 Dimensi Kestabilan Lereng Akibat Aktivitas Peledakan pada Terowongan 11 Proyek Kereta Cepat Jakarta – Bandung. Institut Teknologi Bandung. Retrieved from <https://digilib.itb.ac.id/>
- Analiser, H., & Nurhakiki. (2019). Analisis Kestabilan Lereng Mine Hihwall dengan Metode Bishop dan Software Rocscience Slide pada Area Penambangan Batubara di Pit 2A Barat PT. Fontana Resources Indonesia Kabupaten Barito Utara Kalimantan Tengah. Jurnal Sains dan Teknologi ISTEP, 11(01).
- Andhini, D., Ramdhanti, F., & Koesnaryo, S. (2020). Analisis Balik Kestabilan Lereng Studi Kasus Tambang Batubara PT.X Menggunakan Analisis Probabilistik Monte Carlo. Prosiding Seminar Kebumihan dan Kelautan 1, 125-132.
- Anita, S. S., & Bambang, H. (2023). Analisis Balik Kestabilan Lereng Disposal di Pit Satelit dengan Metode Bishop PT. Barasentosa Lestari di Desa Belani, Kabupaten Musi Rawas Utara Provinsi Sumatera Selatan. Jurnal Bina Tambang, 8(2).

- Arif, I. (2016). *Geoteknik Tambang Edisi Kedua: Mewujudkan Produksi Tambang Yang Berkelanjutan dengan Menjaga Kestabilan Lereng*. PT Gramedia Pustaka Utama.
- Azizi, M. A., dkk. (2012). Analisis Risiko Kestabilan Lereng Tambang Terbuka Studi Kasus Tambang Mineral X. *Prosiding Simposium dan Seminar Geomekanika*.
- Bowles, J. E., & Harinim, J. K. (1989). *Sifat-sifat Fisik dan Geotekniks Tanah* (2nd ed.). Erlangga.
- Febriadi, A., Dearga, A., Rampan, R. A., Oktavianto, H., & Nugroho, P. (2020). Analisis Balik Menggunakan Acuan Deformasi Aktual Permukaan Lereng Tambang Dalam Menentukan Kekuatan Batuan di Pit Wr PT. Adaro Indonesia. *Prosiding TPT XXIX PERHAPI*, 133-144.
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock Slope Engineering*, Revised 3rd Edition. IMM.
- KEPMEN. ESDM No. 1827. (2018). *Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Ma'rief, A. A. H., Hediando, dkk. (2022). Analisis Kestabilan Lereng Tambang Batubara dengan Menggunakan Metode Limit Equilibrium pada PT. Kalimantan Prima Nusantara. *Jurnal Geocelesbes*, 6(2), 117-125.
- Mahardika, S., Devy, S. D., & Umar, H. (2017). Analisis Kestabilan Lereng Highwall Berdasarkan Nilai Faktor Keamanan dengan Metode Bishop Simplified pada Pit S12GN PT. Kitadin Embalut Site Kecamatan Tenggarong Seberang Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur. *Jurnal Teknnologi Mineral FT Unmul*, 5(2), 51-57.
- Mubarok, M. C. V. (2022). Penentuan Seismic Load yang Tepat untuk Mendapatkan Faktor Keamanan Dinamik Lereng Akibat Peledakan dan Gempa Bumi. Institut Teknologi Bandung. Retrieved from <https://digilib.itb.ac.id/>
- Rizaldi, & Heriyadi, B. (2019). Analisis Balik Kestabilan Lereng Dengan Menggunakan Metode Bishop yang Disederhanakan Pada Area Blok Bukit Tambun PT. Cahaya Bumi Perdana, Kota Sawahlunto. *Jurnal Bina Tambang*, 5(4), 57–67.
- Romana, M. R. (1993). A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating. In J. A. Hudson (Ed.), *Comprehensive Rock Engineering* (Vol. 3, pp. 575–600). Pergamon Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042066-0.50029-X>
- Selsabeel, S., Widiarso, D. A., & Trisnawati, D. (2021). Analisis Balik Stabilitas Lereng Tambang dan Rekomendasi Rekayasa Keteknikannya, Studi Kasus: Area Low Wall Pit Y Blok 4900-5500 Strip 3500-4300.
- Syam, M. A., Heriyanto, dkk. (2021). Analisis Kestabilan Lereng Highwall Menggunakan Metode Bishop Simplified pada Pit 13 PT. Belayan Internasional Coal Kecamatan Marangkayu Kabupaten Kutai Kartanegara. *Jurnal Geocelesbes*, 5(1), 46-54.
- Tanjung, H. B. (2024). Analisis Kestabilan Lereng Highwall Tambang Batubara Pit A PT. XYZ di Samarinda Kalimantan Timur. Institut Teknologi Bandung. Retrieved from <https://digilib.itb.ac.id/>

- Tria, P. N., & Heriyadi, B. (2020). Analisis Kestabilan Lereng Pada Penambangan Batu Andesit PT. Ansar Terang Crashindo 1, Kecamatan Pangkalan Kota Baru, Sumatera Barat.
- Vieri, M. A. (2024). Analisis Balik Kestabilan Lereng Sidewall Pit Pandu PT. Putra Muba Coal Kabupaten Musi Banyuasin.
<https://repo.itera.ac.id/depan/submission/SB2409190149>