

## ANALISIS KESTABILAN LERENG DAN GEOMETRI YANG AMAN UNTUK LERENG TAMBANG DENGAN DOMINAN MATERIAL MUDSTONE

Alio Jasipto<sup>1</sup>, Simon Heru Prasetyo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Industri-Institut Teknologi Sumatera

<sup>2</sup>Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan-Institut Teknologi Bandung  
e-mail : alio.jasipto@itera.ac.id

**Abstrak.** Material lapisan penutup yang lemah merupakan tantangan utama dalam perancangan lereng tambang terbuka karena memiliki kuat geser yang relatif rendah dan kerentanan yang tinggi terhadap ketidakstabilan. Tambang emas yang menjadi lokasi penelitian, lapisan penutup didominasi oleh batuan *mudstone* sehingga analisis kestabilan lereng menjadi aspek yang sangat penting dalam perancangan tambang. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan geometri lereng pit dan lereng timbunan yang memenuhi kriteria pada Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1827K/30/MEM/2018. Parameter geoteknik yang representatif diperoleh melalui pengujian laboratorium, meliputi nilai kuat tekan uniaksial hingga diperoleh kekuatan massa batuan, hal ini untuk menggambarkan perilaku mekanik batuan lemah secara akurat. Analisis kestabilan lereng dilakukan menggunakan pemodelan perangkat lunak dengan kriteria keruntuhan Mohr–Coulomb pada kondisi pembebanan statis maupun pseudo-statis akibat gempa. Selain itu, analisis juga mempertimbangkan kondisi hidrogeologi yang paling kritis, yaitu muka air tanah tertinggi dan kondisi lereng jenuh air, sehingga menghasilkan evaluasi kestabilan yang bersifat konservatif. Hasil analisis menunjukkan bahwa geometri lereng pit yang optimum memiliki tinggi lereng keseluruhan sebesar 62–68 m dengan sudut lereng keseluruhan sebesar 31–32°, sedangkan geometri lereng timbunan yang direkomendasikan memiliki tinggi maksimum 15 m dengan sudut lereng keseluruhan sebesar 30°. Kedua konfigurasi lereng tersebut memenuhi nilai faktor keamanan minimum dan probabilitas longsor yang dipersyaratkan dalam peraturan untuk kondisi pembebanan statis maupun dinamis. Hasil penelitian ini memberikan rekomendasi praktis untuk desain lereng tambang pada formasi *mudstone* yang lemah serta menunjukkan pentingnya mempertimbangkan pengaruh muka air tanah dan beban gempa dalam evaluasi kestabilan lereng guna menjamin keselamatan operasi penambangan.

**Kata Kunci:** desain lereng; faktor keamanan; material lemah; mohr-coulomb; *mudstone*

**Abstract.** Weak overburden materials present significant challenges for slope design in open-pit mining due to their relatively low shear strength and high susceptibility to instability. At the studied gold mine, the overburden is predominantly composed of mudstone, making slope stability assessment a critical aspect of mine design. This study aims to determine appropriate pit and waste dump slope geometries that satisfy the stability requirements specified in the Indonesian Ministry of Energy and Mineral Resources Regulation (KEPMEN ESDM No. 1827K/2018). Representative geotechnical parameters were obtained from laboratory testing, including uniaxial compressive strength (UCS) and rock mass strength, to accurately characterize the mechanical behavior of the weak rock mass. Slope stability was evaluated through numerical modeling using the Mohr–Coulomb failure criterion under both static and pseudo-static seismic loading conditions. In addition, the analyses considered the most critical hydrogeological scenarios, including the highest groundwater level and fully saturated slope conditions, to ensure conservative stability assessments. The results indicate that the optimum pit slope geometry consists of an overall slope height ranging from 62 to 68 m with an overall slope angle of 31–32°, while the recommended waste dump geometry has a maximum height of 15 m with an overall slope angle of 30°. Both configurations satisfy the minimum factor of safety and probability of failure required by KEPMEN ESDM No. 1827K/2018 under static and seismic loading conditions. These findings provide practical design recommendations for mine slopes developed in weak mudstone formations and demonstrate the importance of incorporating groundwater and seismic effects into slope stability evaluations to ensure long-term operational safety.

**Keywords:** slope design; safety factor; weak material; mohr-coulomb; *mudstone*

## PENDAHULUAN

Stabilitas lereng merupakan salah satu aspek fundamental dalam perencanaan dan operasional tambang terbuka karena ketidakstabilan lereng dapat menyebabkan longsor, kehilangan material, kerusakan infrastruktur, gangguan operasional, serta peningkatan risiko terhadap keselamatan pekerja. Permasalahan stabilitas menjadi semakin kompleks pada lereng yang tersusun oleh *weak rock*, karena material tersebut memiliki kekuatan dan ketahanan yang relatif rendah serta dapat menunjukkan perubahan perilaku mekanik akibat pelapukan, rekahan, perubahan kadar air, dan kondisi hidrogeologi. Pada kondisi tertentu, karakteristik

*weak rock* dapat berada pada transisi antara perilaku batuan dan tanah sehingga pendekatan analisis yang digunakan untuk batuan kompeten tidak selalu memberikan representasi yang memadai terhadap kondisi aktual lereng (Cripps and Taylor, 1981; Fournier et al., 2013; Sharma, 2025).

Mudstone merupakan salah satu jenis *weak rock* yang memiliki permasalahan geoteknik cukup kompleks. Sifat *engineering mudstone* sangat dipengaruhi oleh komposisi mineralogi, tekstur, struktur, tingkat sementasi, rekahan, serta tingkat pelapukan. Cripps and Taylor (1981) menunjukkan bahwa sifat *engineering mudrock* sangat bervariasi dan perlu dipahami berdasarkan karakteristik material serta kondisi geologinya. Selain itu, *durability mudrock* juga dikontrol oleh karakteristik litologi, sehingga jenis dan komposisi batuan dapat memengaruhi tingkat degradasi material selama terpapar kondisi lingkungan (Dick et al., 1994). Studi Lee et al. (2007) juga menunjukkan bahwa karakteristik dasar *mudstone* memiliki hubungan erat dengan perilaku dan stabilitas lereng. Pada kondisi yang lebih terlapukkan dan terrekahkan, penurunan kekuatan geser *mudstone* dapat menjadi faktor penting dalam pembentukan bidang longsor (Gibo et al., 2003).

Permasalahan stabilitas lereng pada mudstone menjadi lebih kritis ketika material berinteraksi dengan air. Air dapat menyebabkan pelunakan, pengembangan, degradasi struktur, serta penurunan parameter kuat geser. Fu et al. (2022) menunjukkan bahwa peningkatan durasi pembasahan dan derajat kejenuhan dapat menyebabkan penurunan kohesi dan sudut geser dalam *carbonaceous mudstone*. Penelitian tersebut selanjutnya mengembangkan pendekatan numerik yang mengintegrasikan efek pelapukan dan *water-softening* ke dalam analisis stabilitas lereng. Hasil tersebut menunjukkan bahwa mengabaikan degradasi sifat mekanik akibat air dapat menyebabkan hasil analisis stabilitas menyimpang dari kondisi aktual (Fu et al., 2022).

Pengaruh air terhadap kestabilan *mudstone* juga telah dikonfirmasi melalui penelitian berbasis kondisi lapangan dan pemodelan numerik. Yang et al. (2023) menginvestigasi lereng tambang terbuka yang mengandung *water-sensitive mudstone* dengan mempertimbangkan berbagai kondisi curah hujan. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa infiltrasi air hujan dapat meningkatkan kandungan air pada material dan memengaruhi respons hidromekanik serta kestabilan lereng. Dengan demikian, kondisi hidrologi dan karakteristik sensitivitas *mudstone* terhadap air perlu dipertimbangkan dalam evaluasi kestabilan lereng tambang terbuka. Penelitian Guo et al. (2023) juga menunjukkan pentingnya infiltrasi hujan dalam analisis kestabilan lereng yang tersusun atas kombinasi sandstone dan mudstone.

Perubahan kondisi kadar air juga dapat menghasilkan perubahan yang signifikan terhadap kuat geser mudstone. Fu et al. (2025) melakukan pengujian *large-scale horizontal push shear* pada *carbonaceous mudstone* dalam kondisi alami dan setelah mengalami perendaman hingga jenuh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kejenuhan menyebabkan perubahan signifikan pada karakteristik bidang keruntuhan dan parameter kuat geser. Rata-rata kohesi mengalami penurunan sekitar 33%, sedangkan sudut geser dalam mengalami penurunan sekitar 15% dibandingkan kondisi alami. Perubahan tersebut kemudian dikonfirmasi melalui simulasi numerik yang menunjukkan penurunan faktor keamanan lereng pada kondisi jenuh (Fu et al., 2025). Temuan ini memperlihatkan bahwa penggunaan parameter kuat geser dari kondisi alami tanpa mempertimbangkan kemungkinan kejenuhan dapat menghasilkan evaluasi kestabilan yang kurang konservatif.

Selain kondisi air, struktur geologi dan heterogenitas massa batuan juga berperan penting terhadap mekanisme keruntuhan lereng. Pada lereng tambang terbuka yang memiliki beberapa lapisan lemah, interaksi antara orientasi lapisan, sudut lereng, tinggi lereng, dan variasi spasial parameter geoteknik dapat menghasilkan mekanisme keruntuhan yang kompleks. Zhang et al. (2024) menunjukkan bahwa sudut lereng merupakan salah satu parameter yang sangat berpengaruh terhadap faktor keamanan pada lereng dengan beberapa lapisan lemah dan variasi spasial parameter geoteknik. Peningkatan sudut lereng cenderung menurunkan faktor keamanan, sementara orientasi lapisan lemah dan tinggi lereng juga berpengaruh terhadap deformasi dan mekanisme keruntuhan. Hasil tersebut menegaskan bahwa evaluasi kestabilan lereng tidak hanya bergantung pada nilai rata-rata parameter material, tetapi juga perlu memperhatikan struktur dan variasi spasial kondisi geoteknik.

Dalam analisis kestabilan lereng, pemilihan kriteria keruntuhan dan *strength envelope* merupakan aspek penting karena akan memengaruhi estimasi kekuatan massa batuan dan faktor keamanan. Kriteria Mohr–Coulomb merupakan salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk merepresentasikan hubungan antara tegangan normal dan kuat geser material (Labuz and Zang, 2012). Sementara itu, pendekatan Hoek–Brown dan sistem GSI dikembangkan untuk merepresentasikan kekuatan massa batuan berdasarkan karakteristik massa batuan dan kondisi struktur geologinya (Hoek and Brown, 2019). Pada material *weak rock*, pemilihan kriteria kekuatan menjadi semakin penting karena perilaku material dapat berada pada kondisi transisi antara batuan dan tanah. Wines et al. (2023) menekankan bahwa pemilihan *strength envelope* yang tepat merupakan bagian penting dalam analisis kestabilan lereng tambang terbuka yang tersusun oleh tanah dan *weak rock*.

Berbagai pendekatan empiris juga telah dikembangkan untuk mengevaluasi kestabilan lereng *weak rock*. Azarafza et al. (2022) mengembangkan sistem klasifikasi empiris baru untuk stabilitas lereng *weak rock* berdasarkan karakteristik geoteknik dan geologi. Penelitian tersebut menggunakan 40 lereng *marly rock* di South Pars, Iran, yang mencakup *lime marlstone*, *marlstone*, dan *marly limestone*. Hasilnya digunakan untuk mengembangkan *stability chart* yang dapat membantu evaluasi awal kestabilan lereng. Penelitian tersebut menunjukkan pentingnya mempertimbangkan karakteristik geologi dan kondisi pelapukan dalam evaluasi lereng *weak rock*. Namun, pendekatan empiris tersebut dikembangkan berdasarkan kondisi geologi dan jenis material tertentu sehingga penerapannya pada mudstone di lokasi tambang dengan karakteristik geologi dan hidrogeologi berbeda masih memerlukan validasi (Azarafza et al., 2022).

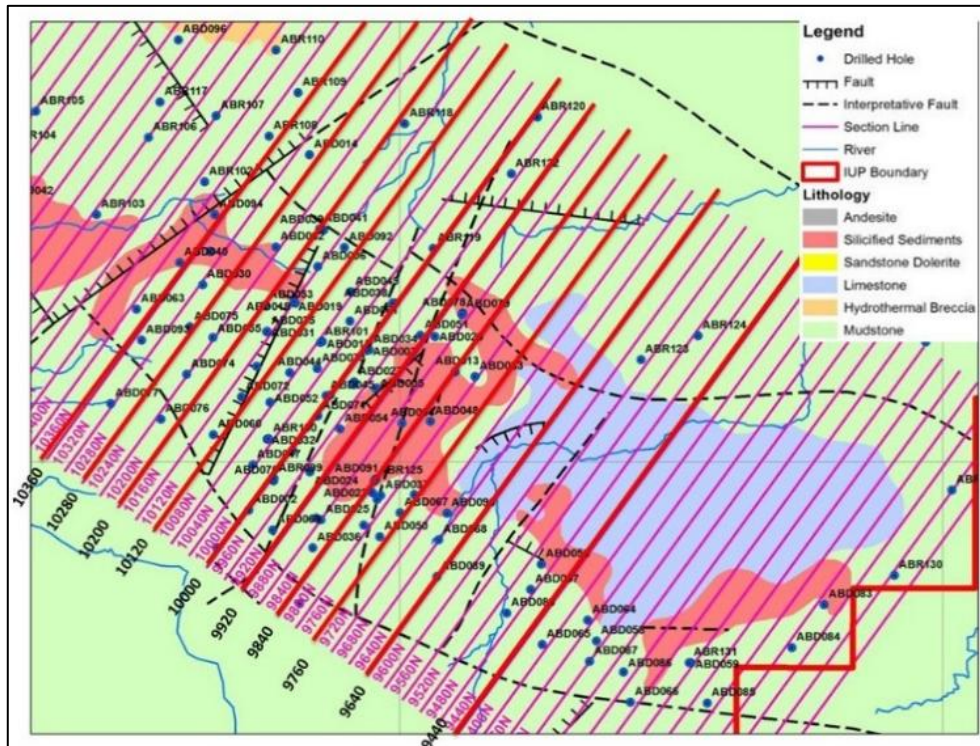
Pada skala pertambangan, pendekatan berbasis karakterisasi dan pemodelan juga telah diterapkan pada massa batuan lemah. Fournier et al. (2013) menunjukkan pentingnya karakterisasi geoteknik dan pemodelan kestabilan dalam evaluasi massa batuan lemah pada tambang terbuka. Saunders and LeRiche (2021) juga menekankan perlunya pertimbangan khusus terhadap kestabilan *weak rock* dalam pengambilan keputusan terkait infrastruktur permanen pada tambang terbuka. Hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa evaluasi lereng *weak rock* harus mempertimbangkan kondisi aktual lokasi, karakteristik massa batuan, dan konsekuensi teknis dari ketidakstabilan.

Meskipun berbagai penelitian telah memberikan kontribusi penting terhadap pemahaman sifat mekanik mudstone, *weathering*, *water-softening*, infiltrasi hujan, karakteristik struktur, serta analisis kestabilan lereng, masih terdapat kesenjangan penelitian. Sebagian penelitian berfokus pada karakterisasi material dan pengujian laboratorium, sedangkan penelitian lainnya berfokus pada pemodelan numerik pada kondisi lingkungan tertentu. Beberapa penelitian telah mengintegrasikan pengaruh air atau pelapukan ke dalam model stabilitas, tetapi integrasi antara parameter geoteknik mudstone yang bersifat *site-specific*, perubahan kuat geser akibat kondisi air, karakteristik struktur massa batuan, dan penentuan geometri lereng tambang terbuka yang aman masih relatif terbatas. Selain itu, hasil penelitian yang bersifat *case-specific* belum selalu dapat langsung diterapkan pada lokasi tambang dengan karakteristik geologi dan hidrogeologi yang berbeda.

Kesenjangan tersebut menunjukkan bahwa evaluasi kestabilan lereng mudstone perlu diarahkan tidak hanya untuk menentukan apakah suatu lereng berada dalam kondisi stabil atau tidak, tetapi juga untuk menerjemahkan karakteristik geoteknik material menjadi rekomendasi desain yang dapat diterapkan pada kegiatan pertambangan. Pendekatan tersebut membutuhkan integrasi antara karakterisasi material, penentuan parameter kuat geser, pemilihan kriteria keruntuhan yang sesuai, analisis faktor keamanan, serta evaluasi berbagai alternatif geometri lereng. Dengan demikian, hubungan antara karakteristik material → parameter geoteknik → kriteria keruntuhan → faktor keamanan → geometri lereng menjadi bagian penting dalam membangun desain lereng yang lebih representatif.

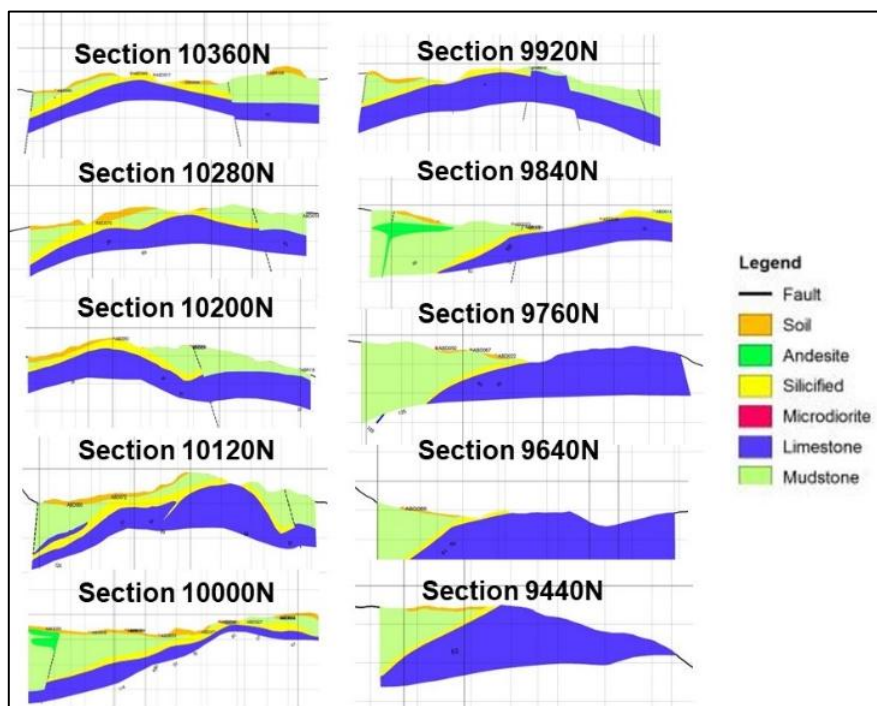
Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan lereng tambang terbuka yang tersusun oleh material *mudstone* dengan mempertimbangkan karakteristik geoteknik dan kondisi material yang relevan terhadap kondisi lapangan. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh parameter kuat geser dan geometri lereng terhadap faktor keamanan serta menentukan konfigurasi lereng yang memenuhi tingkat kestabilan yang dipersyaratkan. Kontribusi utama penelitian ini adalah mengintegrasikan karakterisasi *weak mudstone* dengan analisis kestabilan untuk menghasilkan rekomendasi tinggi dan sudut lereng keseluruhan yang bersifat *site-specific* dan aplikatif bagi perencanaan tambang terbuka. Pendekatan tersebut diharapkan dapat memperkecil kesenjangan antara hasil karakterisasi material di laboratorium dan kebutuhan desain geometri lereng pada kondisi operasional tambang.

Perusahaan tambang ini terdiri beberapa *pit* utama yang prospek untuk ditambang secara teknis dan ekonomis. Penelitian ini menganalisis kestabilan lereng pada salah satu pit yaitu *Pit B* seluas 91 Ha. Untuk menganalisis kestabilan lereng *pit B* menggunakan sepuluh penampang (*section*) geoteknik yang tersebar diseluruh area prospek *pit B* pada garis tebal warna merah (Gambar 1).



Gambar 1. Area prospek dan Garis Penampang Geoteknik

Berdasarkan Gambar 1, *Mudstone* yang berwarna hijau tersebar di semua area prospek penambangan. Pemilihan sepuluh penampang geoteknik cukup representatif untuk analisis kestabilan lereng di *pit* B. Hasil sepuluh penampang dari area prospek yang semuanya memiliki lapisan *mudstone* dengan ketebalan bervariasi dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Lapisan *Mudstone* (material lemah) pada sepuluh penampang di Pit B

Analisis lereng ini dilakukan pada material penyusun berupa *soft material* mayoritas *mudstone* yang memiliki ketebalan mulai dari 50 hingga 102 meter. Material ini cenderung tidak stabil pada lereng dalam kondisi alami dikarenakan bersifat lunak dan sangat sensitif jika dialiri air. Faktor gempa juga sangat

mempengaruhi kestabilan lereng karena diketahui lokasi pit berada pada daerah yang rawan gempa dengan magnitude yang cukup tinggi.

## METODOLOGI

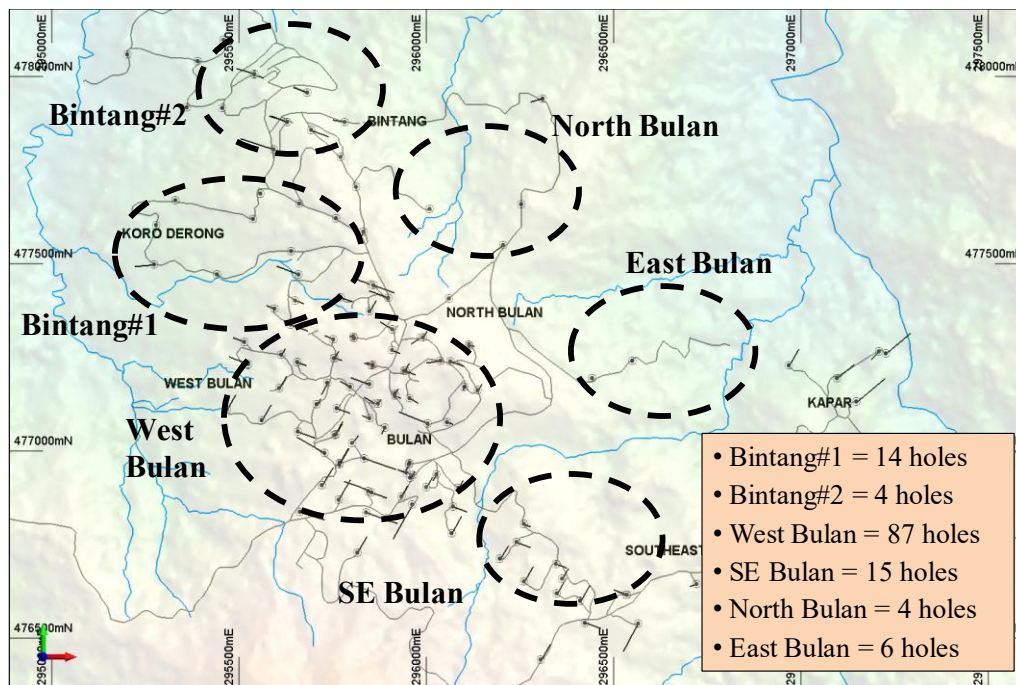
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif untuk mengevaluasi kestabilan lereng tambang terbuka yang tersusun oleh material *weak rock*, dominan mudstone. Metodologi penelitian dirancang untuk memperoleh hubungan antara karakteristik geoteknik material, geometri lereng, perubahan beban material, dan faktor keamanan (FK), sehingga dapat ditentukan konfigurasi geometri lereng yang memenuhi kriteria kestabilan.

Tahapan penelitian meliputi karakterisasi geologi dan geometri lereng aktual; karakterisasi sifat fisik dan mekanik *mudstone*; penentuan parameter desain; pembangunan model geoteknik; analisis kestabilan lereng; analisis sensitivitas terhadap perubahan beban material, geometri, dan faktor keamanan; evaluasi FK terhadap kriteria sesuai aturan; dan penentuan rekomendasi geometri lereng.

Karakterisasi geologi dilakukan untuk memperoleh kondisi material dan struktur geologi yang berpengaruh terhadap kestabilan lereng. Parameter yang dikaji meliputi litologi, tingkat pelapukan, kondisi rekahan, orientasi bidang diskontinuitas, kondisi bidang perlapisan, serta keberadaan lapisan lemah.

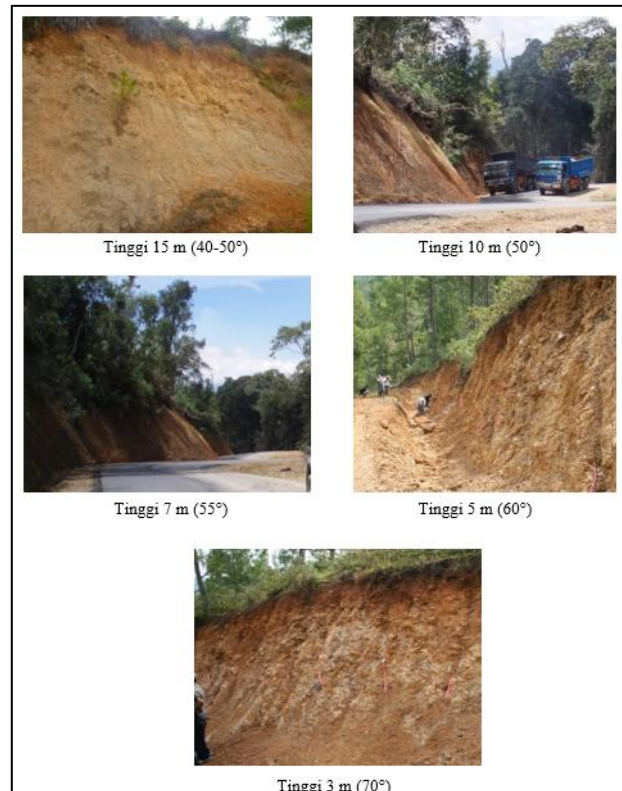
Geometri lereng yang digunakan dalam pemodelan meliputi tinggi jenjang (*bench height*), sudut muka jenjang (*bench face angle*), lebar berm, tinggi lereng keseluruhan (*overall slope height*), dan sudut lereng keseluruhan (*overall slope angle*). Geometri awal ditentukan berdasarkan kondisi aktual atau desain tambang, kemudian divariasikan untuk memperoleh batas geometri yang masih memenuhi kriteria kestabilan.

Observasi lapangan dilakukan untuk dapat memanfaatkan beberapa lubang bor geoteknik dari sebaran pengeboran (Gambar 3) yang digunakan untuk memilih sampel yang akan diuji sifat fisik dan sifat mekanis di laboratorium. Pemilihan sampel ini cukup diperhatikan agar pemodelan lereng menjadi representatif terhadap karakter geologi, karakter sifat fisik dan sifat mekanik yang dinilai berdasarkan massa jenis, kohesi, dan sudut geser dalam.



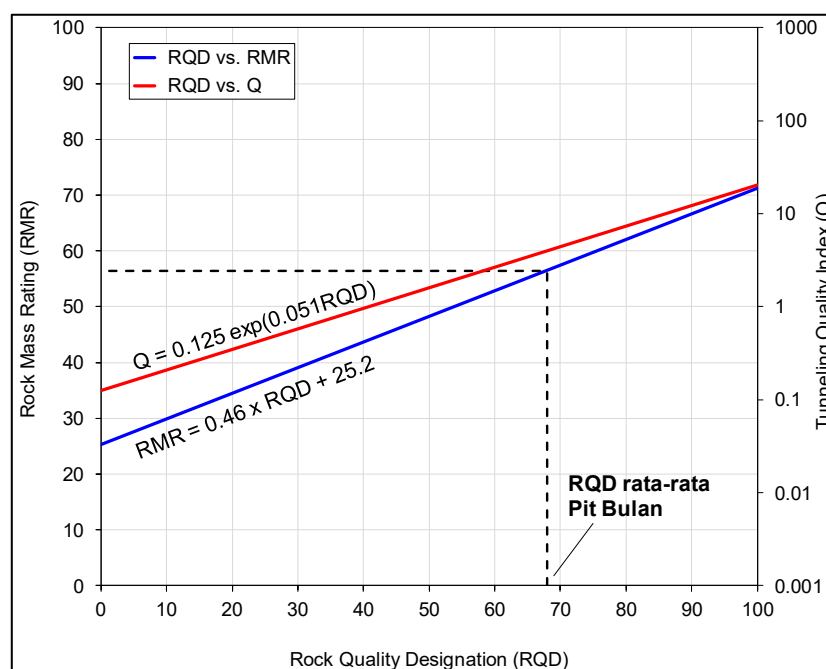
Gambar 3. Sebaran Lubang Bor Geoteknik dan Pengambilan Data pada Area Bulan.

Observasi lapangan dilanjutkan dengan menilai kualitas massa batuan *mudstone* berdasarkan nilai *Rock Quality Designation* (RQD) yang dikumpulkan dari beberapa singkapan dengan variasi tinggi dan sudut lereng yang telah terbentuk. Hal ini dilakukan untuk mendukung hasil uji laboratorium yang bersifat insitu menjadi massa material yang lebih luas. Selain itu beberapa singkapan digunakan untuk geometri model awal yang secara aktual dalam kondisi aman, singkapan lereng *mudstone* seperti pada Gambar 4.



**Gambar 4.** Lokasi Singkapan Batuan *Mudstone*.

Selanjutnya perolehan nilai RQD rata-rata yang dikonversi menjadi nilai Rock Mass Rating (RMR). Nilai RMR ini merupakan salah satu data penting dalam menilai kualitas massa batuan. Hasil konversi RMR seperti pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Nilai Kualitas Massa Batuan hasil konversi RQD menjadi RMR

Pengujian beberapa sampel dilaboratorium bertujuan untuk mendapatkan parameter sifat fisik berupa massa jenis dan sifat mekanis berupa kuat tekan dan *Modulus Young*. Uji sampel ini dilakukan pada semua material penyusun lereng yaitu *mudstone*, *jasperoid* dan *limestone*. Data hasil uji ini selanjutnya diolah untuk mendapatkan nilai rata-rata dan deviasi massa batuan. Pengolahan data ini merujuk pada kriteria keruntuhan Mohr-Coulumb dimana hasilnya seperti pada Tabel 1. Kriteria Mohr-Coulumb digunakan karena parameter

kohesi dan sudut geser dalam dapat diperoleh secara langsung dari hasil pengujian laboratorium dan dapat digunakan untuk mengevaluasi respons kuat geser material terhadap perubahan tegangan normal (Labuz and Zang, 2012). Pemilihan *strength envelope* juga menjadi aspek penting pada material *weak rock* karena karakteristik kekuatan material dapat berbeda dengan batuan kompeten (Wines et al., 2023).

Tabel 1. Parameter Massa Batuan Penyusun Lereng

| Material Penyusun | Parameter                          | Rata-rata | Standar Deviasi |
|-------------------|------------------------------------|-----------|-----------------|
| Mudstone          | Berat natural (kN/m <sup>3</sup> ) | 23        | 0,60            |
|                   | Kohesi (kPa)                       | 52        | 19              |
|                   | Sudut geser dalam (°)              | 30        | 11              |
| Jasperoid         | Berat natural (kN/m <sup>3</sup> ) | 24        | 0,67            |
|                   | Kohesi (kPa)                       | 1716      | 10,40           |
|                   | Sudut geser dalam (°)              | 53        | 0,15            |
| Sandstone         | Berat natural (kN/m <sup>3</sup> ) | 25        | 0,64            |
|                   | Kohesi (kPa)                       | 893       | 9,19            |
|                   | Sudut geser dalam (°)              | 47        | 0,16            |

Pemodelan lereng dimulai dari desain geometri lereng yang terdiri dari tinggi dan sudut keseluruhan lereng. Kondisi dan muka air tanah (MAT) juga dimodelkan untuk mempertimbangkan kejenuhan lereng pada saat hujan terjadi. MAT dimodelkan pada elevasi 15-25 meter dari permukaan lereng dan menggunakan koefisien tekanan pori sebesar 0.8 ( $H_u=0.8$ ). Selanjutnya model lereng juga mempertimbangkan koefisien getaran seismik gempa sebesar 0,05 ( $k_H=0.05$ ), nilai ini disesuaikan dengan lokasi penambangan. Semua parameter diatas akan digunakan untuk model lereng pit sedangkan untuk model lereng timbunan hanya menggunakan parameter kohesi dan sudut gesek dalam batuan *mudstone* sebesar 50% dari nilai awal, hal ini dikarenakan material timbunan sudah hancur (*loose material*) diakibatkan oleh kegiatan penggalian dan peledakan. Pemodelan, interpretasi dan analisis FK untuk lereng pit dan lereng timbunan menggunakan aplikasi berbasis metode kesetimbangan batas dimana menggunakan perangkat lunak Slide. Analisis kestabilan lereng berdasarkan hasil interpretasi model yang disesuaikan dengan batas kriteria seperti pada tabel 2.

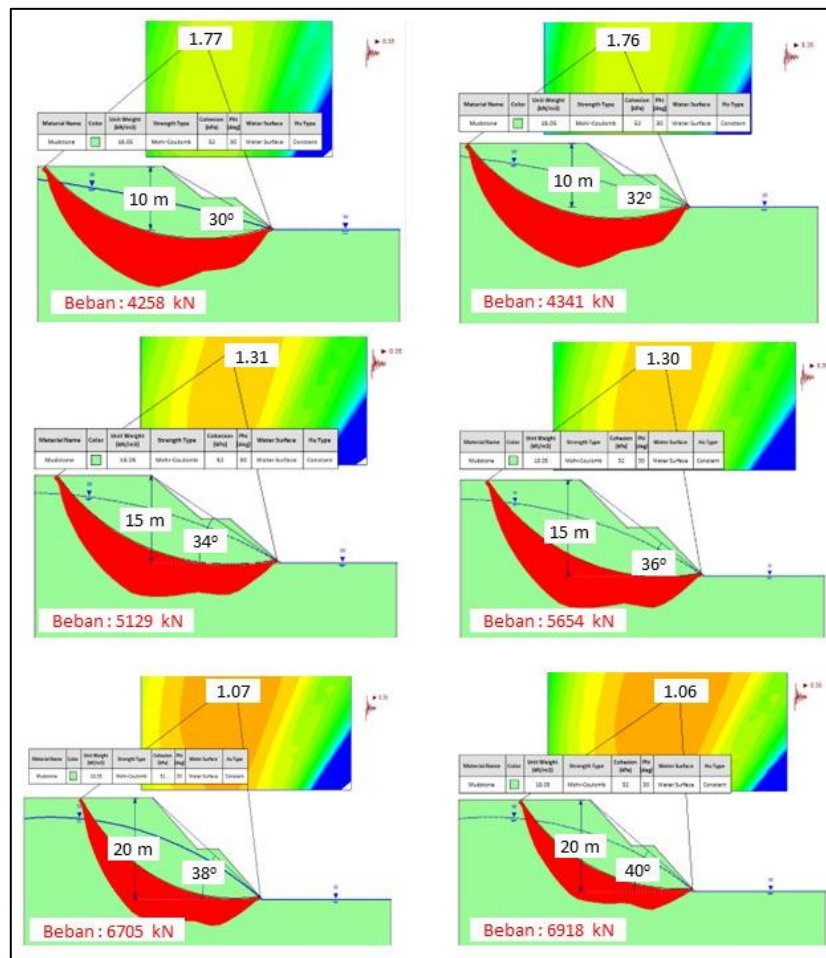
Tabel 2. Kriteria Kestabilan Lereng Menurut Keputusan Menteri ESDM Tahun 2018

| Jenis Lereng       | Keparahan Longsor | Kriteria dapat diterima |            |                      |
|--------------------|-------------------|-------------------------|------------|----------------------|
|                    |                   | FK Statik               | FK Dinamik | Prob. Longsor (FK≤1) |
| Tunggal            | Rendah – 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%                   |

Analisis kestabilan ini dilakukan dengan variasi geometri model lereng, baik menurunkan ketinggian dan melandaikan kemiringan lereng. Variasi dilakukan agar beban massa batuan berkurang sehingga dapat meningkatkan faktor keamanan dan menurunkan probabilitas kelongsoran. Batas kestabilan lereng yang dijadikan tetapan oleh peneliti adalah faktor keamanan minimal 1,3 pada kondisi statis dan minimal 1,0 kondisi dinamis serta probabilitas kelongsoran 15-20%.

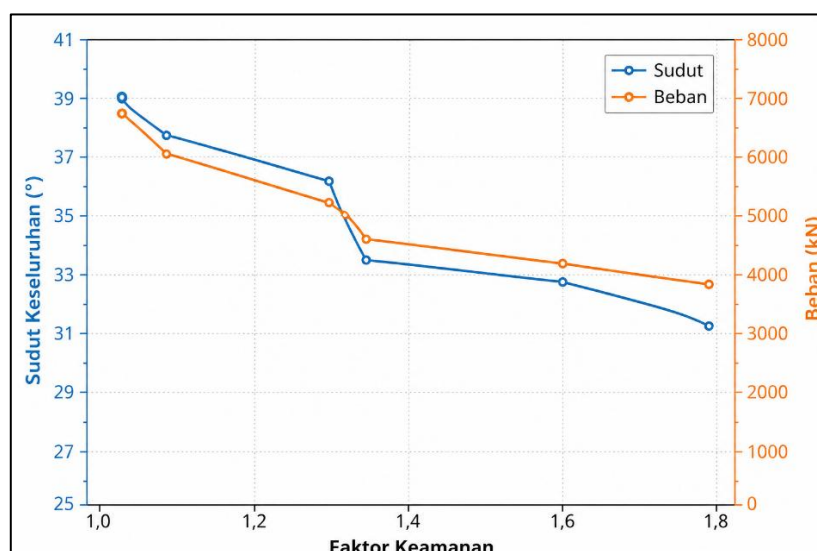
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil simulasi enam model variasi tinggi dan sudut lereng serta interpretasi faktor keamanan pada Gambar 6 didapatkan bahwa penurunan tinggi lereng sebesar 5 meter dan penurunan sudut sebesar 2° mempengaruhi penurunan beban lereng antara 17-23% yang menyebabkan kenaikan faktor keamanan 22-35%.



Gambar 6. Hasil Simulasi Model Variasi Tinggi dan Sudut Lereng

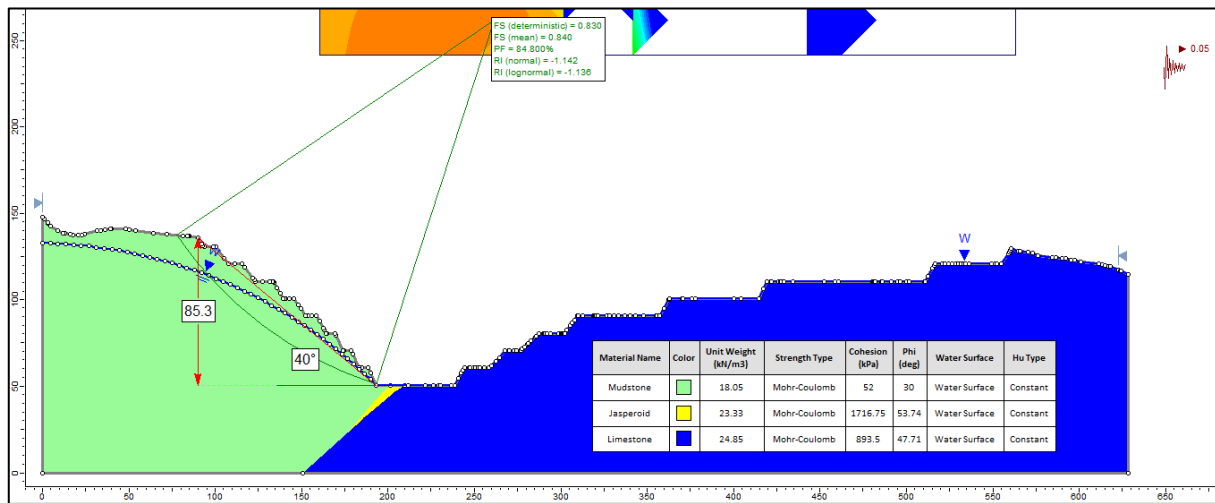
Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa material *mudstone* masih aman jika menggunakan geometri tinggi keseluruhan 20 m pada sudut kemiringan keseluruhan 40°. Selanjutnya hasil 6 simulasi dilanjutkan dengan beberapa simulasi yang lain untuk mendapatkan geometri tinggi dan sudut yang optimal dan dapat diterapkan oleh perusahaan dengan Batasan kriteria kestabilan sesuai aturan. Hasil simulasi ini pula menghasilkan korelasi dengan perubahan beban yang menerangkan bahwa semakin rendah dan semakin landai suatu lereng maka semakin besar faktor keamanan dan semakin berkurang bebannya seperti pada gambar 7.



Gambar 7. Korelasi Perubahan Sudut terhadap Perubahan Faktor Keamanan dan Beban Material Lereng

### Kestabilan Lereng Pit

Analisis kestabilan lereng pit dengan desain awal (sebelum pelandaian) menunjukkan bahwa hanya 3 dari 10 penampang yang dianalisis dapat dinyatakan aman dan memenuhi kriteria aturan Kepmen. Salah satu model lereng pada kondisi awal menunjukkan faktor keamanan sebesar 0,91 dan probabilitas longsor sebesar 85% seperti pada Gambar 8.



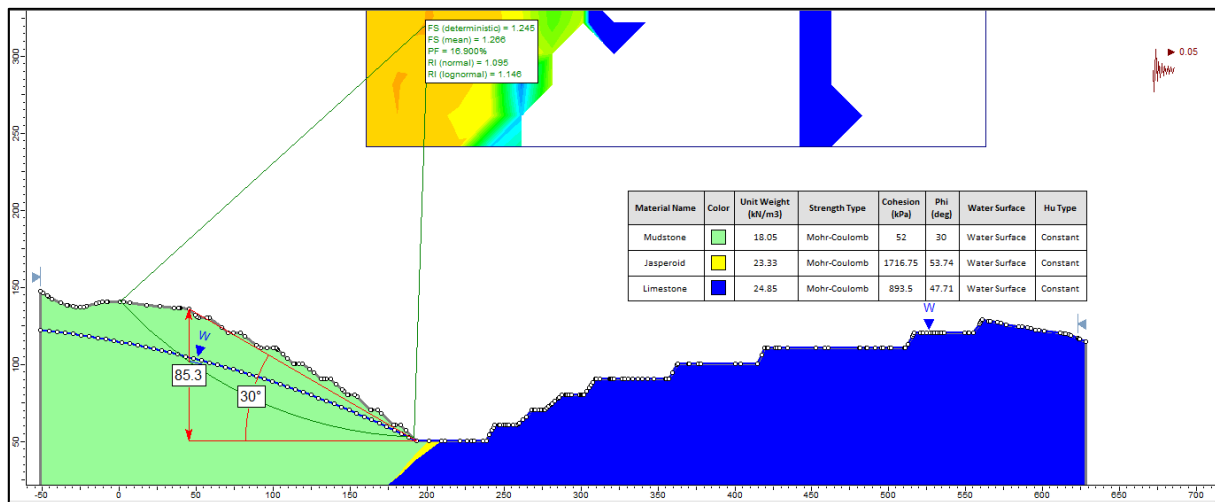
Gambar 8. Kondisi Lereng Awal pada Penampang 9760 N

Selanjutnya akan dilakukan simulasi model pelandaian kemiringan dan mengurangi tinggi pada 7 lereng yang belum aman dan belum memenuhi kriteria aturan kepmen. Kondisi awal geometri lereng dan kriteria kestabilan pada sepuluh penampang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Geometri dan Kestabilan Lereng pada Kondisi Awal

| Penampang | Geometri Lereng |              | Kriteria kestabilan |            |                          |
|-----------|-----------------|--------------|---------------------|------------|--------------------------|
|           | Tinggi (meter)  | Sudut (...°) | FK Statik           | FK Dinamik | Probabilitas Longsor (%) |
| 10360 N   | 43              | 30           | 1,62                | 1,47       | 0%                       |
| 10280 N   | 40              | 45           | 1,82                | 1,69       | 0%                       |
| 10200 N   | 57              | 41           | 1,30                | 1,21       | 8%                       |
| 10120 N   | 77              | 45           | 0,97                | 0,89       | 53%                      |
| 10000 N   | 78              | 42           | 1,05                | 0,96       | 39%                      |
| 9920 N    | 90              | 39           | 0,97                | 0,89       | 52%                      |
| 9840 N    | 88              | 41           | 0,97                | 0,89       | 52%                      |
| 9760 N    | 85              | 40           | 0,91                | 0,82       | 67%                      |
| 9640 N    | 102             | 45           | 0,73                | 0,68       | 98%                      |
| 9440 N    | 77              | 41           | 0,97                | 0,88       | 53%                      |

Simulasi pelandaian kemiringan yang dilakukan pada model penampang 9760 N hingga 10° agar menghasilkan kondisi aman dan memenuhi kriteria aturan kepmen. Pelandaian ini menghasilkan geometri lereng akhir dengan sudut keseluruhan 30° dan tinggi 85 m. Geometri lereng ini berada pada kondisi yang aman dengan faktor keamanan dinamik sebesar 1,24 dan probabilitas keruntuhan 16,9% seperti pada Gambar 9.



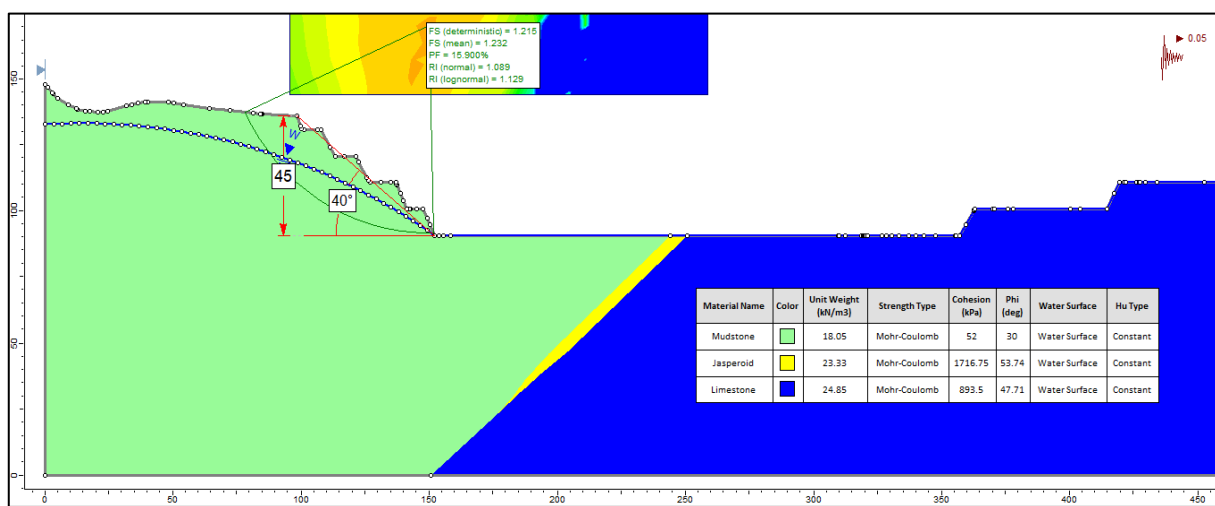
Gambar 9. Lereng 9760 N setelah pelandaian (aman dan memenuhi kriteria aturan kepmen)

Hasil simulasi model pelandaian kemiringan untuk sepuluh penampang yang hasil nya aman dan memenuhi kriteria aturan kepmen dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Simulasi Model Pelandaian Lereng

| Geometri  |                |              | Hasil Simulasi |            |                          |
|-----------|----------------|--------------|----------------|------------|--------------------------|
| Penampang | Tinggi (meter) | Sudut (...°) | FK Statik      | FK Dinamik | Probabilitas Longsor (%) |
| 10120 N   | 70             | 32           | 1.37           | 1.23       | 17.7                     |
| 10000 N   | 78             | 30           | 1.37           | 1.22       | 18.1                     |
| 9920 N    | 85             | 29           | 1.38           | 1.24       | 18.1                     |
| 9840 N    | 88             | 28           | 1.3            | 1.15       | 16.9                     |
| 9760 N    | 85             | 30           | 1.39           | 1.24       | 16.9                     |
| 9640 N    | 102            | 24           | 1.39           | 1.22       | 19.6                     |
| 9440 N    | 77             | 31           | 1.36           | 1.22       | 18.9                     |

Simulasi pengurangan tinggi lereng yang dilakukan pada model penampang 9760 N hingga 40 m agar menghasilkan kondisi aman dan memenuhi kriteria aturan kepmen. Simulasi ini menghasilkan geometri lereng akhir dengan sudut keseluruhan 40° dan tinggi 45 m. Geometri lereng ini berada pada faktor keamanan dinamik 1,21 dan probabilitas runtuh 15,9% dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Lereng 9760 N setelah pengurangan tinggi

Hasil simulasi model pengurangan tinggi lereng untuk sepuluh penampang yang hasil nya aman dan memenuhi kriteria aturan kepmen dapat dilihat pada Tabel 6.

**Tabel 6.** Hasil Simulasi Model Pengurangan Tinggi Lereng

| Penampang | Geometri       |              | Hasil Simulasi |            |                          |
|-----------|----------------|--------------|----------------|------------|--------------------------|
|           | Tinggi (meter) | Sudut (...°) | FK Statik      | FK Dinamik | Probabilitas Longsor (%) |
| 10120 N   | 37             | 49           | 1.41           | 1.31       | 6.6                      |
| 10000 N   | 38             | 48           | 1.31           | 1.22       | 14.2                     |
| 9920 N    | 35             | 40           | 1.31           | 0.95       | 15.5                     |
| 9840 N    | 33             | 41           | 1.3            | 1.19       | 15.1                     |
| 9760 N    | 45             | 40           | 1.33           | 1.21       | 15.9                     |
| 9640 N    | 38             | 40           | 1.32           | 1.19       | 16                       |
| 9440 N    | 37             | 47           | 1.33           | 1.22       | 13.6                     |

## PENUTUP

### Simpulan dan Saran

Analisis kestabilan lereng pit dan lereng timbunan telah mendapatkan geometri lereng yang aman dan memenuhi kriteria aturan kepmen dan dapat diterapkan pada lereng dengan material penyusun yang lemah terkhusus *mudstone*.

Rekomendasi geometri lereng pit diberikan dua pilihan. Pelandaian sudut dan pengurangan ketinggian lereng. Lereng pit akan aman jika lebih landai 10° dari rencana awal dengan *overall slope* 24-32° dan ketinggian lereng 70-102 meter. Lereng pit juga akan aman jika tinggi lereng pit dikurangi 40 meter dari rencana awal dengan *overall slope* 40-49° dan ketinggian lereng 33-45 meter.

Geometri untuk lereng timbunan direkomendasikan menggunakan 2 jenjang dengan tinggi maksimum 40 meter dan kemiringan keseluruhan (*overall slope*) 40°. Geometri ini dapat digunakan pada kondisi dinamis dengan nilai faktor keamanan 1,06 dan probabilitas keruntuhan kurang dari 20%.

Penilaian massa batuan dilapangan belum dimodelkan kedalam pemodelan lereng tiga dimensi (3D), hal ini cukup penting dikarenakan kemungkinan ketidakstabilan dapat terjadi pada titik tertentu.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada perusahaan tambang emas di Aceh yang telah memberikan kesempatan untuk penggunaan data. Tanpa mengurangi rasa hormat kepada pimpinan perusahaan dengan tujuan untuk menghindari konflik kepentingan maka penulisan nama, *profile* dan lokasi perusahaan akan disamarkan dalam paper ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- Azarafza, M., Hajialilue Bonab, M. & Derakhshani, R. (2022). A novel empirical classification method for weak rock slope stability analysis. *Scientific Reports*, 12, 14744. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19246-w>.
- Cripps, J.C. and Taylor, R.K. (1981), The engineering properties of mudrocks. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 14(4), pp.325–346.
- Dick, J.C., Shakoor, A. and Wells, N.A. (1994), Lithological controls of mudrock durability. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 27(1), pp.31–46.
- Fournier, M., Mercer, R., Yang, D. & Miller, J. (2013). Characterisation and stability modelling in weak rock masses of the Robinson Mine. *Slope Stability 2013*, pp. 595–609. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1308\\_39\\_Fournier](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1308_39_Fournier)
- Fu, Y. et al. (2025). Research on the shear performance of carbonaceous mudstone under natural and saturated conditions and numerical simulation of slope stability. *Applied Sciences*, 15(12), 6935. <https://doi.org/10.3390/app15126935>.
- Fu, Y., Liu, Z., Zeng, L., Gao, Q., Luo, J. & Xiao, X. (2022). Numerical analysis method that considers weathering and water-softening effects for the slope stability of carbonaceous mudstone. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(21), 14308. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114308>.
- Gibo, S., Nakamura, S., Higa, Y. & Yoshizawa, M. (2003). The shear strength of strongly weathered and fractured mudstones for slope stability analysis. *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 2003(227), 673–678. <https://doi.org/10.11408/jsidre1965.2003.673>.

- Guo, Y., Du, Y., Shan, W., Liu, M. and Zhang, C. (2023), Numerical analysis on the stability of sandstone-covered mudstone cutting slopes considering rainfall infiltration. *Applied Sciences*, 13(3), 1802. <https://doi.org/10.3390/app13031802>.
- Hoek, E. and Brown, E.T. (2019), The Hoek–Brown failure criterion and GSI–2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), pp.445–463. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>.
- Labuz, J.F. and Zang, A. (2012), Mohr–Coulomb failure criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(6), pp.975–979. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0281-7>.
- Lee, D.-H., Lin, H.-M. and Wu, J.-H. (2007), The basic properties of mudstone slopes in southwestern Taiwan. *Journal of GeoEngineering*, 2(3), pp.81–95. [https://doi.org/10.6310/JOG.2007.2\(3\).1](https://doi.org/10.6310/JOG.2007.2(3).1).
- Saunders, E. & LeRiche, A. (2021). Weak rock open pit slope stability considerations to inform workplan for evaluating the position of permanent mine infrastructure: A northern Canada mine case study. *Mine Closure 2021*. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_repo/2152\\_119](https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2152_119).
- Sharma, D.R. (2025). Slope stability analysis in weak rock formations: Engineering implications and risk mitigation. *International Journal of Geography, Geology and Environment*, 7(8), 35–45. <https://doi.org/10.22271/27067483.2025.v7.i8a.392>.
- Wines, D.R., Zhang, W., van Rensburg, J. & Lucarelli, A. (2023). Selection of appropriate strength envelopes for open pit slope stability analyses in soils and weak rocks. *SSIM 2023: Third International Slope Stability in Mining Conference*, pp. 277–290. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_repo/2335\\_15](https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2335_15)
- Yang, G., Chen, Y., Liu, X., Yang, R. and Zhang, J. (2023), Stability analysis of a slope containing water-sensitive mudstone considering different rainfall conditions at an open-pit mine. *International Journal of Coal Science & Technology*, 10, Article 64. <https://doi.org/10.1007/s40789-023-00619-z>
- Zhang, Q., Zhang, H., Wang, L., Li, Q. et al. (2024). Effect of structural characteristics on the stability of multi-weak rock slopes considering the spatial variability of geotechnical parameters. *Scientific Reports*, 14, 30618.