



Pengaruh *Bedding shear* terhadap Kestabilan Lereng Tunggal Menggunakan Analisis Keseimbangan Batas dan Probabilistik: Studi Kasus pada Area *Highwall* Tambang Batubara Terbuka PT. "X" di Kalimantan Selatan, Indonesia

(*Influence of Bedding shear on Single Slope Stability Using Limit Equilibrium and Probabilistic Analyses: A Case Study of a Highwall Open-Pit Coal Mine PT. "X" in South Kalimantan, Indonesia*)

Luliana¹, Astrid Fadhilah², Roy Reevey³, Muhammad Annis Wichi Luthfina⁴, Febiyora Chandra Kirana⁵

^{1,2,3} Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Indonesia

⁴ Departemen Teknologi Konstruksi Bangunan Air, Politeknik Pekerjaan Umum, Indonesia

⁵ Fakultas Sains & Teknologi, Universitas Jambi, Indonesia

¹lulianaukan@unsri.ac.id, ²astridfadhilah@unsri.ac.id, ³royrvds@unsri.ac.id, ⁴muhanniswichi@politeknikpu.ac.id, ⁵Febiyorachandrakirana@unja.ac.id

Penulis Korespondensi: Luliana | Email: Lulianaukan@unsri.ac.id

Diterima (*Received*): 26/07/2026 Direvisi (*Revised*): 04/08/2026 Diterima untuk Publikasi (*Accepted*): 05/08/2026

ABSTRAK

Beberapa kejadian longsoran telah dilaporkan akibat keberadaan *bedding shear*, yaitu lapisan yang tersusun atas laminasi yang mengalami pergeseran (*sheared lamination*) dan batulempung karbonan (*carbonaceous mudstone*) yang berasosiasi dengan rembesan air ke dalam lapisan tersebut. Bidang diskontinuitas yang terbentuk menciptakan bidang lemah yang berpotensi menjadi bidang gelincir sehingga memicu terjadinya longsoran. Material penyusun lereng pada lokasi penelitian terdiri atas batupasir, batulempung, serpih berlaminasi, batulanau, dan batubara. Lereng memiliki bidang diskontinuitas berupa bidang perlapisan dan kekar. Geometri lereng tunggal pada lokasi penelitian memiliki tinggi sekitar ± 17 m dengan sudut kemiringan 29° . Salah satu kejadian pergerakan massa batuan terjadi di PIT "X", tepatnya dengan elevasi RL -160 hingga -174, yang disebabkan oleh keberadaan *bedding shear* pada lantai lapisan batubara (*floor seam*) T110. Analisis dilakukan menggunakan metode *Direct Shear Strength Test* (DST), *Rock Mass Rating* (RMR), serta metode Keseimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method*). Analisis *Probability of Failure* (PoF) dilakukan menggunakan perangkat lunak *Slide 6.0* dengan menerapkan kriteria keruntuhan *Mohr-Coulomb* dan *Generalized Hoek-Brown*. Berdasarkan hasil analisis, pada lereng dengan sudut kemiringan 34° diperoleh *Probability of Failure* (PoF) sebesar 23%, sedangkan pada lereng dengan sudut kemiringan 64° diperoleh *Probability of Failure* (PoF) sebesar 17,5%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa keberadaan *bedding shear* memberikan pengaruh terhadap stabilitas lereng dan berpotensi menjadi bidang gelincir yang memicu terjadinya longsoran.

Kata Kunci: *Bedding shear*, Faktor Keamanan (FOS), Lereng tunggal, *Probability of Failure* (PoF)

ABSTRACT

Several slope failure incidents have been reported due to the presence of *bedding shear*, a weak layer characterized by sheared laminations within carbonaceous mudstone and associated with water infiltration into the bedding planes. The resulting discontinuity surface forms a weak plane that may act as a potential failure surface, thereby triggering slope instability. The slope materials at the study site consist of sandstone, mudstone, laminated shale, siltstone, and coal. The rock mass is characterized by discontinuities in the form of bedding planes and joints. The single highwall slope investigated in this study has an approximate height of 17 m and an overall slope angle of 29° . A rock mass failure occurred in Pit "X" between elevations RL -160 m and RL -174 m, which was attributed to the presence of *bedding shear* along the floor of the T110 coal seam. The analysis was conducted using the *Direct Shear Strength Test* (DST), *Rock Mass Rating* (RMR), and the *Limit Equilibrium Method* (LEM). The probability of failure was evaluated using *Slide 6.0* software by applying both the *Mohr-Coulomb* and *Generalized Hoek-Brown* failure criteria. The results indicate that a slope with an inclination angle of 34° has a probability of failure of 23%, whereas a slope with an inclination angle of 64° has a probability of failure of 17.5%. These findings demonstrate that the presence of *bedding shear* significantly influences slope stability by acting as a potential failure surface that may initiate slope failure.

Keywords: *Bedding shear*, Factor of Safety (FoS), *Probability of Failure* (PoF), single slope.

© Author(s) 2026. This is an open access article under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0).

1. Pendahuluan

Longsor lereng batuan merupakan salah satu permasalahan utama dalam kegiatan penambangan terbuka karena dapat mengganggu keselamatan kerja, menurunkan produktivitas, serta meningkatkan biaya operasional akibat terganggunya kegiatan penambangan. Kestabilan lereng dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain kondisi geologi, struktur geologi, karakteristik massa batuan, kondisi hidrogeologi, serta keberadaan bidang diskontinuitas yang berkembang di dalam massa batuan. Bidang diskontinuitas seperti bidang perlapisan, kekar, sesar, dan bidang lemah (*weak interlayer*) diketahui menjadi faktor utama yang mengontrol mekanisme keruntuhan lereng batuan (Xu et al., 2024). Salah satu bentuk bidang lemah yang banyak dijumpai pada tambang batubara adalah *bedding shear*, yaitu lapisan yang tersusun atas *shear clay*, *sheared lamination*, maupun *carbonaceous mudstone* yang mengalami deformasi geser. Lapisan ini umumnya berkembang sejajar dengan bidang perlapisan batubara dan sering berasosiasi dengan infiltrasi maupun rembesan air yang menyebabkan penurunan kuat geser material akibat proses *weathering* dan *water-softening*. Kondisi tersebut menghasilkan bidang diskontinuitas yang berkembang menjadi bidang gelincir potensial sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya longsor (Zhao et al., 2025).

Penelitian Zhao et al. (2025) menunjukkan bahwa kondisi jenuh menyebabkan nilai kohesi (*cohesion*) *carbonaceous mudstone* menurun sekitar 33%, sedangkan sudut geser dalam (*internal friction angle*) menurun sekitar 15% dibandingkan kondisi alami. Penurunan parameter kuat geser tersebut secara signifikan meningkatkan deformasi lereng dan memperbesar potensi terjadinya kelongsoran, terutama pada lereng yang dikontrol oleh bidang perlapisan (*bedding-controlled slope*). Selain pengaruh kondisi hidrogeologi, orientasi bidang diskontinuitas terhadap geometri lereng juga berperan penting dalam menentukan mekanisme keruntuhan lereng batuan (Wang et al., 2023). Material penyusun lereng pada lokasi penelitian terdiri atas batupasir, batulanau, *sheared lamination*, *carbonaceous mudstone*, dan batubara. Massa batuan memiliki bidang diskontinuitas berupa bidang perlapisan dan kekar yang berkembang sejajar maupun memotong lapisan batuan. Kombinasi antara bidang diskontinuitas tersebut dengan keberadaan *bedding shear* menghasilkan kondisi geologi yang kompleks sehingga dapat menurunkan kestabilan lereng, terutama apabila orientasi bidang lemah searah dengan arah kemiringan lereng. Mekanisme tersebut merupakan salah satu penyebab utama terjadinya *planar failure* maupun *bedding-controlled failure* pada lereng batuan (Wang et al., 2023).

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji pengaruh *bedding shear* dan *carbonaceous mudstone* terhadap kestabilan lereng, sebagian besar penelitian masih berfokus pada karakterisasi sifat mekanik material, pengaruh kejenuhan terhadap penurunan kuat geser, atau simulasi numerik pada kondisi lereng tertentu (Fu et al., 2022; Qu & Diao, 2022; Zhao et al., 2025). Kajian-kajian tersebut umumnya mengevaluasi pengaruh *bedding shear* secara parsial sehingga belum mengintegrasikan karakteristik geologi lapangan, hasil pengujian kuat geser langsung (*Direct Shear Strength Test*), kualitas massa batuan berdasarkan klasifikasi *Rock Mass Rating* (RMR), serta analisis kestabilan lereng secara deterministik dan probabilistik dalam satu kerangka evaluasi yang komprehensif. Selain itu, penelitian mengenai pengaruh variasi ketebalan *bedding shear* terhadap perubahan *Factor of Safety* (FoS) dan *Probability of Failure* (PoF) pada model lereng tunggal di tambang batubara Indonesia masih sangat terbatas. Kesenjangan penelitian tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara karakteristik *bedding shear*, kualitas massa batuan, dan tingkat risiko kelongsoran belum sepenuhnya dipahami untuk mendukung perancangan lereng tambang yang lebih andal.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini menawarkan pendekatan yang mengintegrasikan pemetaan geoteknik, pengujian *Direct Shear Strength Test* (DST), klasifikasi massa batuan menggunakan *Rock Mass Rating* (RMR), analisis deterministik menggunakan *Limit Equilibrium Method* (LEM), serta analisis probabilistik menggunakan *Monte Carlo Simulation* untuk mengevaluasi pengaruh *bedding shear* terhadap kestabilan lereng tunggal. Integrasi berbagai pendekatan tersebut menjadi nilai tambah penelitian ini karena tidak hanya mengevaluasi perubahan nilai *Factor of Safety* (FoS), tetapi juga mengukur tingkat ketidakpastian melalui *Probability of Failure* (PoF), sehingga memberikan representasi kondisi lapangan yang lebih realistis dibandingkan pendekatan yang hanya menggunakan analisis deterministik. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah berupa kerangka evaluasi yang menghubungkan karakteristik geologi, parameter geoteknik, dan risiko kelongsoran sebagai dasar dalam penyusunan desain lereng tambang batubara yang lebih aman dan andal.

Secara regional, wilayah Izin Usaha Pertambangan (IUP) PT "X" termasuk ke dalam Cekungan Barito yang tersusun atas empat satuan formasi berumur Eosen hingga Plistosen, yaitu Formasi Tanjung, Formasi Berai, Formasi Warukin, dan Formasi Dahor. Lokasi penelitian berada pada Formasi Warukin yang berumur Miosen Awal dan diendapkan pada lingkungan paralik-delta dengan ketebalan sekitar 300–500 m. Litologi penyusunnya terdiri atas napal, batulanau, batulempung, batupasir, serta lapisan batubara yang saling bersisipan (Sikumbang & Heryanto, 1994). Kondisi geologi

tersebut menyebabkan berkembangnya bidang perlapisan yang berpotensi menjadi jalur pembentukan bedding shear dan mengontrol mekanisme kelongsoran pada lereng tambang. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh keberadaan dan variasi ketebalan bedding shear terhadap kestabilan lereng tunggal pada area highwall tambang batubara PT "X" menggunakan pendekatan deterministik dan probabilistik. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah dalam mengidentifikasi pengaruh bedding shear terhadap *Factor of Safety* (FoS) dan *Probability of Failure* (PoF), sekaligus menjadi masukan bagi perancangan geometri lereng dan strategi mitigasi longsoran pada tambang batubara terbuka.

2. Data dan Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif yang meliputi pemetaan geoteknik, pengambilan sampel, pengujian laboratorium, serta analisis kestabilan lereng secara deterministik dan probabilistik. Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur mengenai karakteristik bedding shear, mekanisme *bedding-controlled failure*, klasifikasi massa batuan menggunakan *Rock Mass Rating* (RMR), serta penerapan *Limit Equilibrium Method* (LEM) dalam analisis kestabilan lereng tambang batubara.

2.1 Pemetaan Geoteknik dan Pengambilan Sampel

Pemetaan geoteknik dilakukan pada area *highwall* tambang batubara PT "X" melalui 120 titik pengamatan yang tersebar pada lokasi penelitian. Pada setiap titik dilakukan pengamatan terhadap litologi penyusun lereng, geometri lereng, orientasi bidang perlapisan dan kekar, kondisi air tanah, keberadaan *bedding shear*, serta ketebalan lapisan *bedding shear*. Data tersebut selanjutnya digunakan untuk mengidentifikasi persebaran bidang lemah dan menentukan kualitas massa batuan menggunakan metode *Rock Mass Rating* (RMR) berdasarkan parameter kuat batuan utuh (*intact rock strength*), *Rock Quality Designation* (RQD), jarak antarbidang diskontinuitas, kondisi bidang diskontinuitas, dan kondisi air tanah.

Hasil pemetaan menunjukkan bahwa 7 titik pengamatan memiliki lapisan bedding shear dengan ketebalan berkisar antara 0,02–2,00 m, sedangkan titik pengamatan lainnya tidak menunjukkan keberadaan lapisan tersebut. Berdasarkan hasil tersebut, pengambilan sampel dilakukan menggunakan metode *purposive sampling*, yaitu memilih lokasi yang secara geologi merepresentasikan keberadaan *bedding shear*. Sebanyak 7 sampel diambil dari tujuh lokasi yang memiliki bedding shear dengan memperhatikan variasi ketebalan dan kondisi lapisan agar dapat mewakili karakteristik material pada lokasi penelitian.

2.2 Pengujian Laboratorium

Seluruh sampel bedding shear yang diperoleh dari lapangan diuji di laboratorium menggunakan *Direct Shear Strength Test* (DST) sehingga terdapat 7 titik pengujian laboratorium. Pengujian dilakukan untuk memperoleh parameter kuat geser berupa kohesi (c) dan sudut geser dalam (φ) yang selanjutnya digunakan sebagai parameter masukan dalam analisis kestabilan lereng. Selain hasil DST, parameter massa batuan diperoleh melalui klasifikasi *Rock Mass Rating* (RMR) yang kemudian dikonversi menjadi parameter *Generalized Hoek–Brown* sebagai masukan dalam pemodelan geoteknik.

2.3 Analisis Kestabilan Lereng

Analisis kestabilan lereng dilakukan menggunakan perangkat lunak Slide 6.0 (*Rocscience*) dengan menerapkan *Limit Equilibrium Method* (LEM). Massa batuan dimodelkan menggunakan kriteria keruntuhan *Generalized Hoek–Brown*, sedangkan lapisan *bedding shear* dimodelkan menggunakan kriteria *Mohr–Coulomb* berdasarkan hasil pengujian DST. Geometri model disusun berdasarkan kondisi aktual lereng dengan variasi ketebalan bedding shear sebesar 0 m, 1 m, dan 2 m, sedangkan orientasi bidang perlapisan dimodelkan menggunakan sudut rata-rata 34° dan sudut maksimum 64° sesuai hasil pengukuran lapangan. Muka air tanah diasumsikan berada pada kedalaman 1,0–1,5 m sesuai kondisi operasional tambang. Nilai *Factor of Safety* (FOS) minimum yang digunakan sebagai kriteria penerimaan desain adalah 1,20, sehingga model dengan $FOS < 1,20$ dikategorikan tidak stabil, sedangkan model dengan $FOS \geq 1,20$ dikategorikan stabil.

2.4 Analisis Probabilistik

Selain analisis deterministik, penelitian ini juga menerapkan analisis probabilistik menggunakan Monte Carlo Simulation yang tersedia pada perangkat lunak Slide 6.0 untuk mengevaluasi *Probability of Failure* (PoF). Parameter geoteknik yang digunakan dalam simulasi diasumsikan mengikuti distribusi Normal (*Normal Distribution*), karena distribusi ini merupakan distribusi yang umum digunakan untuk merepresentasikan variasi alami parameter geoteknik yang diperoleh dari hasil pengujian laboratorium dan pengamatan lapangan. Simulasi dilakukan dengan 1.000 iterasi, karena jumlah tersebut telah mampu menghasilkan nilai *Factor of Safety* (FoS) dan *Probability of Failure* (PoF) yang konvergen serta stabil, sehingga cukup representatif untuk mengevaluasi ketidakpastian parameter geoteknik tanpa meningkatkan waktu komputasi secara signifikan. Hasil analisis deterministik dan probabilistik kemudian dibandingkan untuk mengevaluasi pengaruh keberadaan serta ketebalan *bedding shear* terhadap kestabilan lereng tunggal pada lokasi penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

Karakteristik *bedding shear* dan pengaruhnya terhadap kestabilan lereng dianalisis melalui pemetaan geoteknik, pengujian *Direct Shear Strength Test* (DST), serta klasifikasi massa batuan menggunakan *Rock Mass Rating* (RMR). Parameter geoteknik yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai masukan dalam analisis kestabilan lereng secara deterministik menggunakan *Limit Equilibrium Method* (LEM) untuk memperoleh nilai *Factor of Safety* (FoS), serta secara probabilistik menggunakan *Monte Carlo Simulation* untuk mengevaluasi *Probability of Failure* (PoF). Hasil kedua pendekatan tersebut digunakan untuk mengkaji pengaruh karakteristik *bedding shear* terhadap mekanisme kelongsoran dan tingkat kestabilan lereng pada lokasi penelitian.

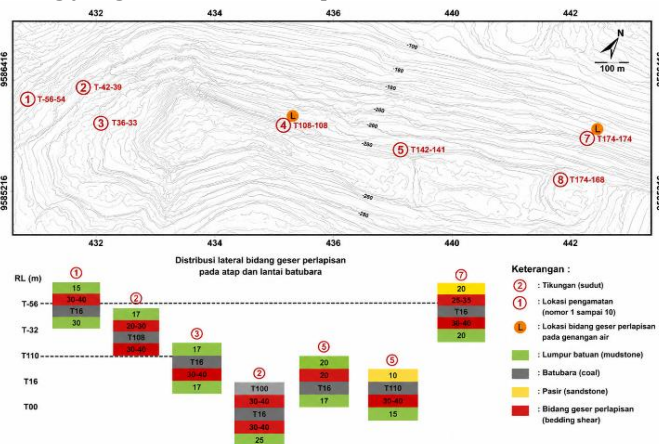
3.1. Karakteristik *Bedding shear* dan Pengaruhnya terhadap Massa Batuan

Berdasarkan hasil pemetaan geoteknik, *bedding shear* pada lokasi penelitian berkembang pada bagian atap semu (*pseudo roof*) dan lantai (*floor*) lapisan batubara. Secara litologi, lapisan ini tersusun atas batulempung (*claystone*), lempung serpihan (*flake clay*), laminasi yang mengalami pergeseran (*sheared lamination*), serta batulempung karbonan (*carbonaceous mudstone*). Keberadaan lapisan tersebut membentuk bidang diskontinuitas yang mempunyai kuat geser lebih rendah dibandingkan batuan di sekitarnya sehingga berpotensi berkembang menjadi bidang gelincir (*failure surface*). Karakteristik tersebut sesuai dengan konsep *bedding-controlled failure*, yaitu mekanisme longsor yang dikontrol oleh keberadaan bidang perlapisan atau lapisan lemah yang berkembang sejajar dengan struktur sedimen dan mengalami penurunan kuat geser akibat proses deformasi maupun infiltrasi air (Ontosari, 2011; Qu & Diao, 2022).

Hasil observasi lapangan menunjukkan bahwa ketebalan *bedding shear* pada lokasi penelitian berkisar antara 0,02–2,00 m, dengan ketebalan rata-rata 0,46 m. Dari 12 lokasi pengamatan, sebanyak 7 lokasi menunjukkan keberadaan *bedding shear*, sedangkan 5 lokasi lainnya tidak memperlihatkan perkembangan lapisan tersebut (Gambar 1). Variasi ketebalan ini menunjukkan bahwa perkembangan *bedding shear* dipengaruhi oleh kondisi geologi lokal, khususnya perubahan litologi, intensitas deformasi, serta kondisi hidrogeologi. Pada lokasi dengan ketebalan *bedding shear* yang lebih besar, bidang lemah berkembang lebih kontinu sehingga meningkatkan peluang terbentuknya bidang gelincir yang memotong lereng.

Secara visual, *bedding shear* pada kondisi kering memiliki tekstur keras dan rapuh. Namun, pada bagian yang mengalami kejenuhan akibat rembesan air, material berubah menjadi lunak, plastis, dan mudah terdeformasi ketika diberi beban. Perubahan karakteristik mekanik

tersebut menunjukkan bahwa infiltrasi air merupakan salah satu faktor utama yang mengendalikan penurunan kuat geser lapisan *carbonaceous mudstone*. Zhao et al. (2025) melaporkan bahwa *carbonaceous mudstone* yang mengalami kondisi jenuh menunjukkan penurunan sifat mekanik yang signifikan akibat proses *water-softening*, di mana nilai kohesi rata-rata menurun sekitar 33%, sedangkan sudut geser dalam menurun sekitar 15% dibandingkan kondisi alami. Penurunan parameter tersebut menyebabkan deformasi lereng meningkat dan memperbesar kemungkinan terjadinya longsor pada lereng yang dikontrol oleh lapisan karbonan.



Gambar 1. Peta Sebaran *Bedding shear* pada Area *Highwall*

Untuk mengetahui karakteristik mekanik lapisan *bedding shear*, dilakukan *Direct Shear Strength Test* (DST) terhadap sampel yang diambil dari lokasi penelitian. Hasil pengujian menunjukkan nilai kohesi sebesar 12,7 kPa dan sudut geser dalam sebesar 16,5°. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa *bedding shear* memiliki kekuatan geser yang relatif rendah dibandingkan batuan penyusun lereng seperti batupasir maupun batulanau. Nilai kohesi yang rendah menunjukkan bahwa gaya ikat antarpartikel pada lapisan *bedding shear* relatif lemah, sedangkan sudut geser dalam yang kecil menunjukkan rendahnya kemampuan material dalam menahan gaya geser. Kondisi tersebut menyebabkan lapisan ini berfungsi sebagai bidang lemah (*weak layer*) yang lebih mudah mengalami deformasi dibandingkan batuan di atas maupun di bawahnya.

Hasil pengujian ini sejalan dengan penelitian Zhao et al. (2025), yang menunjukkan bahwa *carbonaceous mudstone* merupakan batuan lunak yang sangat sensitif terhadap perubahan kadar air. Setelah mengalami kejenuhan, kekuatan geser material mengalami penurunan yang signifikan sehingga memperbesar potensi berkembangnya bidang gelincir pada lereng. Penelitian tersebut juga menegaskan bahwa pengujian kuat geser secara langsung (*direct shear test*) merupakan metode yang efektif untuk memperoleh parameter kohesi dan sudut geser dalam yang

representatif terhadap kondisi lapangan, terutama pada batuan lunak yang telah mengalami pelapukan dan deformasi.

Selain pengujian laboratorium, dilakukan pula klasifikasi massa batuan menggunakan *metode Rock Mass Rating (RMR)* yang dikembangkan oleh Bieniawski (1979). Penilaian dilakukan berdasarkan lima parameter utama, yaitu kekuatan batuan utuh (*Intact Rock Strength*), *Rock Quality Designation (RQD)*, jarak antarbidang diskontinuitas, kondisi bidang diskontinuitas, dan kondisi air tanah. Hasil pembobotan masing-masing parameter disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi *Rock Mass Rating (RMR)* pada Lokasi Penelitian

Hasil	Batupasir		Batulempung		Batubara	
	Bobot	Kelas	Bobot	Kelas	Bobot	Kelas
Mak	62	Baik	68	Baik	63	Baik
Min	52	Sedang	34	Buruk	35	Buruk
Rata-rata	57	Sedang	52,1	Sedang	46,47	Sedang

Parameter RMR digunakan sebagai dasar dalam menentukan kualitas massa batuan sebelum dilakukan pemodelan numerik menggunakan *Slide 6.0*. Keberadaan *bedding shear* memberikan pengaruh langsung terhadap nilai RMR, terutama pada parameter kondisi bidang diskontinuitas dan kondisi air tanah. Lapisan *bedding shear* yang mengalami pelunakan akibat rembesan air menyebabkan kualitas massa batuan menurun sehingga menghasilkan nilai RMR yang lebih rendah dibandingkan lokasi yang tidak memiliki *bedding shear*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa klasifikasi massa batuan tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik batuan utuh, tetapi juga oleh perkembangan bidang lemah dan kondisi hidrogeologi yang berkembang pada lereng.

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa kombinasi antara ketebalan *bedding shear*, kondisi kejenuhan, dan kualitas massa batuan (RMR) merupakan faktor utama yang mengontrol kestabilan lereng pada lokasi penelitian. Temuan ini sejalan dengan Melentijević et al. (2024), yang menyatakan bahwa kualitas massa batuan, parameter kuat geser, serta ketidakpastian parameter geoteknik merupakan faktor dominan yang mempengaruhi nilai *Factor of Safety (FoS)* dan *Probability of Failure (PoF)* pada analisis kestabilan lereng berbasis *Generalized Hoek–Brown* dan *Limit Equilibrium Method*

3.2. Analisis *Factor of Safety (FoS)* Lereng Tunggal

Analisis kestabilan lereng pada penelitian ini dilakukan menggunakan *Limit Equilibrium Method (LEM)* dengan perangkat lunak *Slide 6.0*. Parameter masukan model diperoleh dari hasil pemetaan geoteknik, klasifikasi massa batuan menggunakan *Rock Mass Rating (RMR)*, serta hasil

Direct Shear Strength Test (DST) terhadap material *bedding shear*. Kriteria keruntuhan yang diterapkan adalah *Generalized Hoek–Brown* untuk massa batuan dan *Mohr–Coulomb* pada lapisan *bedding shear* (Tabel 2), sehingga karakteristik mekanik batuan utuh maupun bidang lemah dapat direpresentasikan secara lebih realistis.

Pemilihan *Generalized Hoek–Brown* didasarkan pada kemampuannya dalam menggambarkan perilaku massa batuan yang telah mengalami rekahan dan pelapukan melalui parameter *Geological Strength Index (GSI)*, m_i , σ_{ci} , serta *Disturbance Factor (D)*. Melentijević et al. (2024) menjelaskan bahwa penggunaan *Generalized Hoek–Brown* menghasilkan representasi kondisi massa batuan yang lebih baik dibandingkan penggunaan parameter *Mohr–Coulomb* ekuivalen, khususnya pada lereng batuan yang memiliki bidang diskontinuitas dan kualitas massa batuan yang bervariasi. Selain itu, analisis berbasis *Limit Equilibrium Method (LEM)* masih menjadi metode yang paling luas digunakan dalam evaluasi kestabilan lereng tambang karena mampu mengidentifikasi bidang gelincir kritis dengan tingkat akurasi yang tinggi.

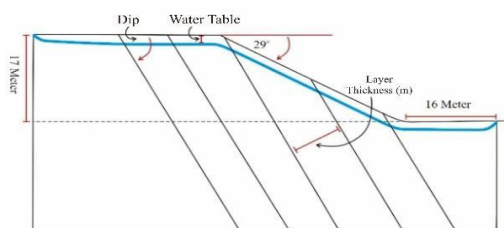
Tabel 2. Parameter Material Massa Batuan Berdasarkan Kriteria *Generalized Hoek–Brown*

Litologi	Parameter Statistik	GSI	Berat Isi (kN/m³)	UC S (kPa)	mb	s	a
Batupasir	Maksimum	77	22,00	6,70	5,272	0,03192	0,522344
	Minimum	31	20,00	1,20	0,541	0,00041	0,501463
	Rata-rata	55,29	21,47	2,68	3,105	0,00724	0,506709
Batulempung	Maksimum	65,50	27,00	22,31	3,518	0,11174	0,588090
	Minimum	25,00	20,21	0,71	0,711	0,00127	0,501975
	Rata-rata	48,00	23,55	5,15	1,443	0,01128	0,508890
Batubara	Maksimum	58,00	23,00	9,56	2,682	0,50320	0,533430
	Minimum	15,00	12,00	2,60	0,928	0,00021	0,501975
	Rata-rata	29,08	13,07	5,10	1,647	0,08088	0,514210

Model lereng tunggal dibangun menggunakan geometri aktual hasil pengukuran lapangan dengan tinggi lereng sekitar 17 m, sudut lereng 29°, dan lebar jalan 16 m (Gambar 2). Untuk mengevaluasi pengaruh *bedding shear*, setiap model disimulasikan dalam tiga kondisi, yaitu tanpa *bedding shear*, *bedding shear* setebal 1 m, dan *bedding shear* setebal 2 m. Selain itu, orientasi bidang perlapisan

dimodelkan menggunakan dua kondisi, yaitu sudut rata-rata 34° dan sudut maksimum 64°, sesuai hasil pengukuran lapangan.

Asumsi muka air tanah dibuat konstan pada kedalaman 1–1,5 m sesuai rekomendasi desain perusahaan sehingga pengaruh perubahan nilai *Factor of Safety* (FoS) terutama dikendalikan oleh variasi ketebalan *bedding shear*. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi yang lebih jelas terhadap kontribusi lapisan lemah terhadap kestabilan lereng tanpa dipengaruhi oleh perubahan kondisi hidrogeologi pada setiap model.



Gambar 2. Geometri Lereng Tunggal pada Lokasi Penelitian

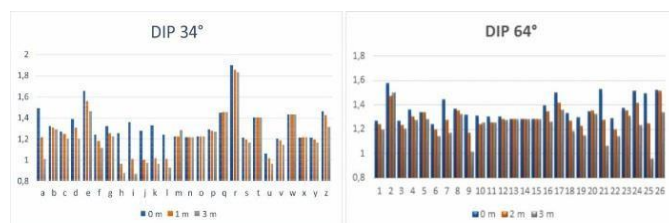
Hasil analisis menunjukkan bahwa setiap model menghasilkan nilai *Factor of Safety* (FoS) yang berbeda (Tabel 3). Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan ketebalan *bedding shear* memberikan pengaruh langsung terhadap kestabilan lereng. Semakin besar ketebalan *bedding shear*, semakin kecil nilai *Factor of Safety*, karena bertambahnya ketebalan lapisan lemah menyebabkan luas bidang dengan kuat geser rendah semakin besar sehingga tahanan geser (*shear resistance*) yang bekerja pada bidang gelincir menurun. Kondisi ini menyebabkan keseimbangan antara gaya penahan (*resisting force*) dan gaya penggerak (*driving force*) bergeser menuju kondisi yang kurang stabil.

Fenomena tersebut sesuai dengan teori mekanisme kelongsoran pada lereng batuan berlapis yang dikemukakan oleh Qu dan Diao (2022), bahwa keberadaan lapisan lemah sejajar bidang perlapisan mengontrol perkembangan bidang gelincir dan menentukan lokasi keruntuhan lereng. Pada lereng yang tersusun oleh beberapa lapisan batuan dengan bidang lemah yang menerus, bidang gelincir cenderung berkembang mengikuti lapisan tersebut sehingga nilai *Factor of Safety* menjadi lebih rendah dibandingkan lereng yang tersusun oleh satu lapisan batuan yang homogen.

Tabel 3. Hasil Analisis *Factor of Safety* (FoS) pada Model Lereng Tunggal

Kategori	Ketebalan Litologi (m)			Kemiringan Lapisan 34°			Kemiringan Lapisan 64°		
	Batupasir	Batuempun	Batubara	0 m	1 m	2 m	0 m	1 m	2 m
Batupasir	10	9	7	1,492	1,214	1,009	1,269	1,241	1,197
	10	9	40	1,320	1,301	1,285	1,580	1,469	1,497
	10	9	0,5	1,265	1,245	1,196	1,269	1,236	1,203
	10	35	7	1,386	1,301	1,198	1,363	1,304	1,276
	10	35	40	1,656	1,558	1,463	1,342	1,339	1,286
	10	35	0,5	1,233	1,177	1,113	1,243	1,195	1,144
	10	0,6	7	1,317	1,251	1,219	1,446	1,273	1,170
	10	0,6	40	1,251	0,959	0,869	1,364	1,355	1,328
	10	0,6	0,5	1,352	1,006	0,865	1,321	1,173	1,017
	42	9	7	1,273	0,997	0,965	1,311	1,241	1,254
Batuempung	42	9	40	1,325	1,015	0,961	1,305	1,252	1,256
	42	9	0,5	1,234	1,004	0,925	1,302	1,286	1,277
	42	35	7	1,218	1,218	1,280	1,281	1,281	1,281
	42	35	40	1,211	1,211	1,211	1,281	1,281	1,281
	42	35	0,5	1,221	1,221	1,221	1,281	1,281	1,281
	42	0,6	7	1,286	1,276	1,263	1,395	1,345	1,261
	42	0,6	40	1,446	1,453	1,453	1,500	1,419	1,360
	42	0,6	0,5	1,806	1,858	1,829	1,334	1,269	1,181
	0,6	9	7	1,209	1,191	1,162	1,298	1,223	1,150
	0,6	9	40	1,400	1,400	1,400	1,344	1,350	1,323
Batubara	0,6	9	0,5	1,060	1,011	0,960	1,527	1,278	1,063
	0,6	35	7	1,201	1,182	1,140	1,288	1,196	1,142
	0,6	35	40	1,431	1,430	1,430	1,371	1,350	1,309
	0,6	35	0,5	1,210	1,213	1,215	1,511	1,419	1,235
	0,6	0,6	7	1,209	1,188	1,162	1,492	1,250	0,960
	0,6	0,6	40	1,461	1,426	1,312	1,519	1,511	1,337

Namun demikian, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa tidak seluruh model mengalami penurunan *Factor of Safety* yang signifikan akibat penambahan ketebalan *bedding shear*. Berdasarkan interpretasi terhadap Gambar 3 dan Gambar 4, beberapa lereng masih menunjukkan perubahan nilai FoS yang relatif kecil.

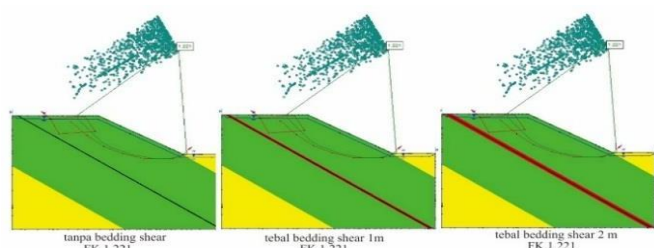


Gambar 3. Diagram Blok yang Menunjukkan Pengaruh Ketebalan *Bedding shear* terhadap *Factor of Safety* (FoS).

Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa ketebalan *bedding shear* bukan merupakan satu-satunya faktor pengontrol kestabilan lereng. Geometri lereng, ketebalan masing-masing lapisan batuan, posisi *bedding shear* terhadap kaki lereng, serta orientasi bidang perlapisan turut menentukan berkembang atau tidaknya bidang gelincir.

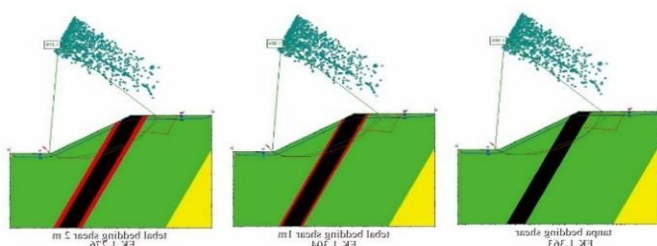
Hasil ini menunjukkan bahwa lereng yang tersusun oleh satu lapisan batuan yang relatif tebal tanpa *bedding shear* pada daerah lereng curam mempunyai kestabilan yang lebih baik dibandingkan lereng yang terdiri atas beberapa lapisan batuan tipis dengan sisipan *bedding shear* (Gambar 5).

Pada kondisi tersebut, bidang gelincir harus memotong batuan utuh yang memiliki kuat geser lebih tinggi sehingga memerlukan gaya penggerak yang lebih besar untuk menghasilkan longsoran. Sebaliknya, apabila *bedding shear* berkembang secara menerus di sepanjang bidang perlapisan, bidang gelincir cenderung mengikuti lapisan tersebut sehingga mekanisme keruntuhan berubah menjadi *bedding-controlled failure*.



Gambar 4. Model Lereng Tunggal yang Tidak Menunjukkan Perubahan Faktor Keamanan akibat Penambahan Ketebalan *Bedding Shear*

Interpretasi tersebut sejalan dengan penelitian Zhao et al. (2025) yang menunjukkan bahwa lapisan *carbonaceous mudstone* yang mengalami pelunakan akibat kejenuhan air mempunyai kuat geser yang jauh lebih rendah dibandingkan batuan sekitarnya sehingga menjadi jalur utama propagasi bidang gelincir. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa penurunan kohesi dan sudut geser dalam akibat proses *water-softening* menyebabkan deformasi lereng meningkat secara signifikan dan mempercepat terjadinya ketidakstabilan lereng.



Gambar 5. Model Lereng Tunggal yang Menunjukkan Perubahan Faktor Keamanan akibat Penambahan Ketebalan *Bedding Shear*

Dalam penelitian ini, nilai *Factor of Safety* minimum yang digunakan sebagai kriteria penerimaan desain adalah 1,20, sesuai dengan kriteria desain lereng tambang terbuka yang diterapkan perusahaan. Model yang menghasilkan $FoS <$

1,20 dikategorikan tidak memenuhi kriteria kestabilan sehingga memerlukan perbaikan geometri lereng (*redesign*). Hasil ini menunjukkan bahwa keberadaan *bedding shear* perlu dipertimbangkan secara eksplisit pada tahap desain lereng karena lapisan tersebut dapat menurunkan *Factor of Safety* meskipun geometri lereng secara umum masih memenuhi rekomendasi desain.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa pengaruh *bedding shear* terhadap kestabilan lereng tidak hanya ditentukan oleh ketebalan lapisan tersebut, tetapi juga oleh kontinuitas bidang lemah, orientasi bidang perlapisan terhadap muka lereng, kualitas massa batuan (RMR/GSI), serta kondisi kejenuhan material. Oleh karena itu, integrasi antara hasil pemetaan geoteknik, pengujian kuat geser, klasifikasi massa batuan, dan analisis *Limit Equilibrium Method* memberikan pendekatan yang lebih representatif dalam mengevaluasi kestabilan lereng tambang batubara dibandingkan hanya menggunakan analisis deterministik berdasarkan geometri lereng semata. Temuan ini konsisten dengan rekomendasi Melentijević et al. (2024), yang menyatakan bahwa evaluasi kestabilan lereng batuan harus mempertimbangkan kombinasi parameter geoteknik, ketidakpastian sifat massa batuan, serta karakteristik bidang lemah agar nilai *Factor of Safety* yang diperoleh lebih representatif terhadap kondisi lapangan.

3.3. Analisis *Probability of Failure* (PoF)

Selain analisis deterministik menggunakan *Factor of Safety* (FoS), penelitian ini juga menerapkan analisis probabilistik melalui *Monte Carlo Simulation* pada perangkat lunak *Slide 6.0* untuk mengevaluasi tingkat ketidakpastian parameter geoteknik terhadap kestabilan lereng. Pendekatan probabilistik dipilih karena parameter geoteknik, seperti kohesi, sudut geser dalam, kuat tekan batuan, kualitas massa batuan, dan kondisi bidang diskontinuitas, pada kenyataannya memiliki variasi alami sehingga tidak dapat direpresentasikan hanya oleh satu nilai tunggal. Dengan demikian, analisis probabilistik mampu memberikan estimasi risiko kegagalan lereng yang lebih realistis dibandingkan analisis deterministik semata.

Metode *Monte Carlo Simulation* bekerja dengan menghasilkan ribuan kombinasi parameter masukan berdasarkan distribusi statistik yang telah ditentukan, kemudian menghitung *Factor of Safety* (FoS) pada setiap kombinasi tersebut. Distribusi nilai FoS yang dihasilkan selanjutnya digunakan untuk menentukan *Probability of Failure* (PoF) atau *Probability of Failure* (PoF), yaitu peluang terjadinya kondisi $FoS < 1,0$ atau di bawah batas kestabilan yang telah ditentukan. Pendekatan ini telah menjadi salah satu metode yang direkomendasikan dalam analisis kestabilan lereng modern karena mampu mengakomodasi ketidakpastian parameter geoteknik yang tidak dapat diakomodasi oleh analisis deterministik.

Melentijević et al. (2024) menegaskan bahwa analisis probabilistik memberikan informasi yang lebih representatif mengenai tingkat keandalan lereng (*reliability*) dibandingkan hanya menggunakan nilai *Factor of Safety*, khususnya pada lereng batuan yang memiliki variasi kualitas massa batuan dan bidang diskontinuitas.

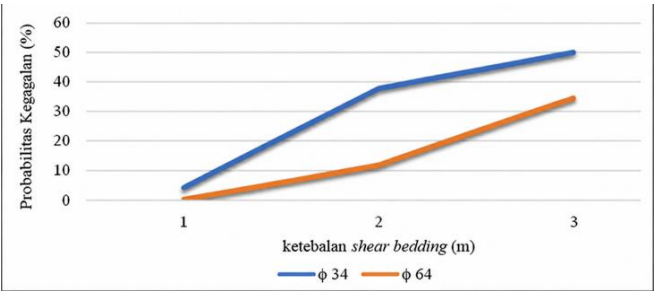
Hasil analisis probabilistik pada penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan ketebalan *bedding shear* memberikan pengaruh langsung terhadap nilai *Probability of Failure* (PK) (Tabel 4 dan Gambar 6). Secara umum, semakin besar ketebalan *bedding shear*, semakin tinggi nilai *Probability of Failure*, yang menunjukkan bahwa peluang terjadinya longsor meningkat seiring berkembangnya lapisan lemah pada massa batuan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa keberadaan *bedding shear* tidak hanya menurunkan nilai *Factor of Safety*, tetapi juga meningkatkan ketidakpastian perilaku lereng akibat berkurangnya tahanan geser sepanjang bidang perlapisan.

Tabel 4. Hasil Analisis *Probability of Failure* (PoF) pada Model Lereng Tunggal

Hasil	Parameter Statistik	Kemiringan Lapisan 34°			Kemiringan Lapisan 64°		
		0 m	1 m	2 m	0 m	1 m	2 m
Faktor Keamanan (FOS)	FOS minimum	1,0	0,9	0,8	1,2	1,1	0,9
	FOS maksimum	6	6	7	4	7	6
	FOS rata-rata	1,3	1,2	1,2	1,3	1,3	1,2
	FOS < 1,2	3	4	0	7	0	3
Jumlah Data	FOS ≥ 1,2	1	10	13	0	3	9
	Total data	25	16	13	26	23	17
Probability of Failure (PoF)	PK	0,0	0,3	0,5	0,0	0,1	0,3
	PK (%)	4	8	0	0	2	5
	PK (%)	4%	38 %	50 %	0%	12 %	35 %

Pada kemiringan bidang perlapisan 34°, rata-rata *Probability of Failure* mencapai 23% untuk setiap penambahan ketebalan *bedding shear* sebesar 1 m, sedangkan pada kemiringan 64° rata-rata *Probability of Failure* sebesar 17,50%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa lereng dengan orientasi bidang perlapisan 34° memiliki potensi longsor yang lebih tinggi dibandingkan lereng dengan orientasi 64°. Kondisi ini menunjukkan bahwa orientasi bidang lemah terhadap geometri lereng merupakan faktor yang sangat menentukan berkembangnya bidang gelincir. Pada kemiringan sekitar 34°, orientasi *bedding shear* lebih sejajar dengan arah lereng sehingga menghasilkan komponen gaya geser yang lebih besar pada bidang lemah. Sebaliknya, pada kemiringan 64°, orientasi bidang perlapisan relatif kurang

menguntungkan bagi perkembangan bidang gelincir sehingga nilai *Probability of Failure* menjadi lebih rendah.



Gambar 6. Hubungan Ketebalan *Bedding shear* terhadap *Probability of Failure* (PoF)

Hasil tersebut konsisten dengan teori *bedding-controlled failure* yang dikemukakan oleh Qu dan Diao (2022), yaitu bahwa orientasi bidang perlapisan terhadap muka lereng merupakan faktor utama yang mengendalikan mekanisme kelongsoran pada lereng batuan berlapis. Apabila orientasi bidang lemah mendekati arah kemiringan lereng, maka tahanan geser sepanjang bidang tersebut berkurang sehingga bidang gelincir lebih mudah berkembang mengikuti lapisan batuan. Sebaliknya, apabila orientasi bidang perlapisan tidak searah dengan muka lereng, mekanisme keruntuhan menjadi lebih kompleks karena bidang gelincir harus memotong batuan utuh yang memiliki kuat geser lebih tinggi.

Peningkatan nilai *Probability of Failure* akibat bertambahnya ketebalan *bedding shear* juga menunjukkan bahwa lapisan tersebut berperan sebagai weak interlayer yang mengurangi kapasitas tahanan geser massa batuan. Semakin tebal lapisan *bedding shear*, semakin besar bagian bidang gelincir yang melewati material dengan nilai kohesi dan sudut geser dalam yang rendah. Akibatnya, keseimbangan antara gaya penahan (*resisting force*) dan gaya penggerak (*driving force*) bergeser menuju kondisi yang lebih tidak stabil. Fenomena ini sejalan dengan hasil penelitian Zhao et al. (2025), yang menunjukkan bahwa carbonaceous mudstone yang mengalami kejenuhan air mengalami penurunan kohesi sekitar 33% dan sudut geser dalam sekitar 15%, sehingga memperbesar deformasi dan meningkatkan peluang terjadinya longsor.

Analisis probabilistik juga menunjukkan bahwa tidak semua model mengalami peningkatan *Probability of Failure* secara linier terhadap penambahan ketebalan *bedding shear*. Hal ini menunjukkan bahwa *Probability of Failure* (PoF) dipengaruhi oleh interaksi beberapa parameter geoteknik, antara lain kualitas massa batuan (RMR/GSI), geometri lereng, orientasi bidang diskontinuitas, ketebalan lapisan batuan, dan kondisi hidrogeologi. Dengan demikian, *bedding shear* merupakan faktor dominan, namun bukan satu-satunya faktor yang mengendalikan kestabilan lereng.

Temuan ini memperkuat hasil analisis deterministik yang menunjukkan bahwa beberapa model tetap memiliki *Factor of Safety* yang relatif tinggi meskipun memiliki bedding shear, karena lapisan tersebut tidak berkembang secara menerus atau tidak berpotongan langsung dengan bidang gelincir kritis.

Evaluasi tingkat kestabilan lereng selanjutnya dilakukan dengan membandingkan nilai *Probability of Failure* terhadap kriteria penerimaan desain lereng tambang terbuka yang direkomendasikan oleh SRK (2010), yaitu *Probability of Failure* $\leq 25\%$. Berdasarkan hasil penelitian, seluruh model yang masih berada di bawah batas tersebut dikategorikan memenuhi tingkat risiko yang dapat diterima, sedangkan model yang memiliki *Factor of Safety* $< 1,20$ tetap memerlukan evaluasi lebih lanjut meskipun nilai *Probability of Failure* masih berada pada batas yang diizinkan. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan *Factor of Safety* dan *Probability of Failure* secara bersamaan memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih komprehensif dibandingkan hanya menggunakan salah satu parameter saja.

Sebanyak 32 dari 162 model menghasilkan *Factor of Safety* $< 1,20$, atau sekitar 23% dari keseluruhan model yang dianalisis. Model-model tersebut kemudian dilakukan desain ulang (*redesign*) untuk meningkatkan kestabilan lereng. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kestabilan lereng dapat ditingkatkan melalui pengurangan sudut lereng dengan rata-rata sekitar 5° , disertai peningkatan tinggi lereng sekitar 0,42 m. Perubahan geometri tersebut meningkatkan tahanan terhadap gaya geser sehingga nilai *Factor of Safety* meningkat dan *Probability of Failure* menurun hingga memenuhi kriteria desain yang dipersyaratkan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi analisis deterministik menggunakan *Limit Equilibrium Method* (LEM) dan analisis probabilistik menggunakan *Monte Carlo Simulation* memberikan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap kestabilan lereng dibandingkan penggunaan *Factor of Safety* saja. Integrasi kedua pendekatan tersebut mampu menjelaskan bahwa bedding shear merupakan faktor geologi yang secara signifikan mengontrol kestabilan lereng melalui penurunan parameter kuat geser, peningkatan probabilitas terbentuknya bidang gelincir, dan bertambahnya risiko kegagalan lereng. Oleh karena itu, keberadaan bedding shear perlu dipertimbangkan secara eksplisit dalam tahap investigasi geoteknik, pemodelan lereng, dan penyusunan desain tambang agar risiko longsoran dapat diminimalkan serta keselamatan dan keberlanjutan operasi penambangan dapat terjaga.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengevaluasi pengaruh bedding shear terhadap kestabilan lereng tunggal pada tambang terbuka melalui integrasi pemetaan geoteknik, *Direct Shear Strength Test* (DST), klasifikasi massa batuan menggunakan *Rock Mass Rating* (RMR), serta analisis deterministik dan probabilistik menggunakan *Limit Equilibrium Method* (LEM) dan *Monte Carlo Simulation*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bedding shear merupakan bidang lemah yang berperan penting dalam mengontrol kestabilan lereng melalui penurunan tahanan geser pada massa batuan. Pengaruh bedding shear terhadap nilai *Factor of Safety* (FoS) tidak hanya ditentukan oleh ketebalan lapisan tersebut, tetapi juga oleh kontinuitas bidang lemah, orientasi bidang perlapisan, kualitas massa batuan, serta kondisi kejenuhan material. Lereng yang tersusun oleh lapisan batuan tebal tanpa bedding shear pada daerah lereng curam cenderung memiliki tingkat kestabilan yang lebih tinggi dibandingkan lereng yang tersusun oleh beberapa lapisan batuan dengan sisipan bedding shear.

Analisis probabilistik menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan bedding shear meningkatkan *Probability of Failure* (PoF), dengan rata-rata nilai sebesar 23% pada kemiringan bidang perlapisan 34° dan 17,50% pada kemiringan 64° , yang mengindikasikan bahwa orientasi bidang perlapisan turut mengendalikan potensi kelongsoran. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan yang mengintegrasikan analisis deterministik dan probabilistik mampu memberikan evaluasi kestabilan lereng yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan *Factor of Safety* saja. Oleh karena itu, identifikasi bedding shear sejak tahap investigasi geoteknik serta penerapannya dalam pemodelan lereng perlu menjadi bagian penting dalam perencanaan desain lereng tambang terbuka untuk meningkatkan keselamatan operasi dan meminimalkan risiko longsoran.

5. Referensi

- Arif, I. (2016). *Geoteknik Tambang*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Bieniawski, Z. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineering and Geologists in mining, Civil and Petroleum Engineering*. Wiley-Interscience.
- Endartyanto, A. (2007). *Analisis Kestabilan Lereng Dengan Menggunakan*. Institut Teknologi Bandung.
- 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). <https://doi.org/10.3390/ijerph192114308>

- Hoek, E., Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek Brown Failure Criterion - 2002 Edition. Toronto: NARMS-TAC Conference.
- Hoek, H., & Brown, E. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Engng Div.*, , 1013-1035.
- Steffen, O., Contreras, L., Terbrugge, P., & Venter, J. (Design", the 42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd US-Canada Rock Mechanics Symposium). A Risk Evaluation Approach for Pit Slope. San Francisco.
- Ontosari, D., Umboro, S., & Wandu. (2011). Kajian Geoteknik Untuk Penanganan Kelongsoran di Low wall Pit T1 Site Sambarata, PT. Berau Coal, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur. Prosiding TPT XX PERHAPI 2011 (hal. 451). PERHAPI.
- Qu, X., & Diao, F. (2022). Stability assessment for hard anti-inclined bedded rock slopes using a limit equilibrium method. *Frontiers in Earth Science*, 10(September), 1–19. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.970550>
- Wang, S., Mo, D., Wu, Q., Bu, X., Xue, J., & Zhang, C. (2023). Design and analysis of sustainable models for Qinling ecological protection and mining development. *Minerals Engineering*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108446>
- Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2004). Rock Slope Engineering (civil and mining) 4th Edition. New York: Spon Press.
- Yu, C., Meng, K., Zhu, Z., Liu, S., Zhou, Z., Zhang, H., & Xu, M. (2024). Impacts of cadmium accumulation on the diversity, assembly processes, and co-occurrence patterns of archaeal communities in marine sediments. *Science of the Total Environment*, 926. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171936>
- Zhao, J., Chen, H., & Nie, R. (2025). Research on the Shear Performance of Carbonaceous Mudstone Under Natural and Saturated Conditions and Numerical Simulation of Slope Stability. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(12), 1–24. <https://doi.org/10.3390/app15126935>